

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE EQUIPOS ELECTRO-MÉDICOS EN LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL HOSPITAL 'SAN LUIS' DE OTAVALO

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Axel Fernando Luna Duque

DIRECTOR:

Ing.Olger Gilberto Arellano Bastidas

Ibarra,2025

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL
NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004742944		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Luna Duque Axel Fernando		
DIRECCIÓN:	Jacinto Collahuazo 4ta Etapa, Otavalo		
EMAIL:	aflunad@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0988518372

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE EQUIPOS ELECTRO-MÉDICOS EN LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL HOSPITAL 'SAN LUIS' DE OTAVALO
AUTOR :	Luna Duque Axel Fernando
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	12/05/2025
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Gerardo Collaguazo, PhD. Ing. Olger Arellano, MSc.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS



2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 12 días del mes de mayo de 2025

EL AUTOR:

Luna Duque Axel Fernando

CI:1004742944



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS



CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Ing Olger Gilberto Arellano Bastidas Msc en calidad de director del señor estudiante Axel Fernando Luna Duque certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE EQUIPOS ELECTRO-MÉDICOS EN LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL HOSPITAL 'SAN LUIS' DE OTAVALO"

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Ing Olger Gilberto Arellano Bastidas Msc

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



DEDICATORIAS

El presente trabajo de grado está dedicado a mis padres, Enrique Luna y Patricia Duque, por ser mi guía, mi fuerza y mi inspiración constante. Gracias por su amor incondicional, su ejemplo y su incansable apoyo en cada paso de este camino.

A mi pareja, Katherine Jaramillo, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, por su paciencia, compañía y palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante.

A mis hermanos Brandon Luna y Renato Luna por estar a mi lado en cada momento y a toda mi familia, por su cariño, motivación y por estar siempre presentes, brindándome el ánimo necesario para alcanzar esta meta.

Este logro también es suyo.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Enrique Luna y Patricia Duque, por su amor incondicional, por ser mi pilar en cada etapa de mi vida y por motivarme constantemente a luchar por mis sueños. Este logro no habría sido posible sin su apoyo y confianza.

Agradezco profundamente al Ingeniero Olger Arellano, director de este trabajo de titulación, por su orientación, compromiso y valiosos aportes durante el desarrollo del proyecto. De igual manera, al Ingeniero Gerardo Collaguazo, asesor, por su acompañamiento y guía constante que enriquecieron cada etapa del proceso.

Extiendo también mi gratitud al personal del Hospital San Luis de Otavalo, por abrirme las puertas y facilitar el desarrollo de esta investigación con total disposición y colaboración.

Finalmente, a todos los docentes de la carrera de Electricidad, quienes a lo largo de estos años han contribuido con su enseñanza, experiencia y dedicación a mi formación académica y profesional.

Gracias a todos por ser parte fundamental de este logro.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**



Tabla de Contenido

RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPITULO I.....	16
1.1 Problema de investigación.....	16
1.1.1 Problemática a investigar.	16
1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación	17
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Alcance y delimitación	17
1.4 Justificación	18
CAPÍTULO II.....	20
2.1 Antecedentes	20
2.2 Calidad de energía	23
2.2.1 Importancia de la calidad de energía.....	23
2.3 Defectos de la calidad de energía eléctrica	24
2.3.1 THD (Distorsión armónica)	24
2.3.2 Notching(Muecas).....	25
2.3.3 Noise (Ruido).....	26
2.3.4 Variaciones de voltaje	27
2.3.4.1 Overvoltage(Sobrevoltaje)	27
2.3.4.2 Undervoltage(Bajo voltaje)	28



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**



2.3.5 Variaciones de voltaje de corta duración.....	29
2.3.5.1 Sags	29
2.3.5.2 Swells	29
2.3.6 Transitorios	30
2.3.6.1 Transitorios impulsivos	30
2.3.6.1 Transitorios Oscilatorios.....	31
2.3.7 Off Set(Dc)	32
2.3.8 Flicker.....	32
2.3.9 Interrupciones	33
2.4 Regulación No. ARCERNNR-002/20 (codificada)	34
2.4.1 Atributos de Calidad.....	34
2.4.1.1 Calidad de producto	34
2.4.1.2 Calidad de servicio técnico	36
2.4.1.3 Calidad del servicio comercial.....	38
CAPÍTULO III.....	39
3.1 Descripción del lugar de estudio.....	39
3.2. Metodología	40
3.2.1 Visitas técnicas In situ.....	40
3.2.2 Levantamiento de Información técnica del hospital	41
3.2.2.1 Transformador	41
3.2.2.1 Puesta a tierra	41
3.2.2.2 Diagnostico de las instalaciones	42
3.2.2.3 Equipos electro médicos.....	42
3.3 Mediciones y análisis de calidad de energía transformador 500kva y 75kva	47



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**



3.3.1 Materiales	47
3.3.1.1 Fluke 435 Series II	47
3.3.1.2 Power Log 430	48
3.3.1.3 Pinza amperimétrica Truper Mut 202	48
3.3.2 Perfil de voltaje.....	49
3.3.3 Flicker.....	51
3.3.4 THD Distorsión armónica total.....	52
3.3.3.1 Distorsión armónica individual	54
3.3.5 Desequilibrio de voltaje	55
3.3.6 Eventos de voltaje.....	55
3.3.5.1 Huecos	56
3.3.5.2 Causas sags.....	60
3.3.7 Cargabilidad.....	60
CAPITULO IV.....	62
4.1 Métodos para la mitigación de huecos de voltaje.....	62
4.1.1 Volante de Inercia	62
4.1.2 SAI Estático con Almacenamiento Mínimo de Energía.....	62
4.1.3 Restaurador Dinámico de voltaje (DVR).....	63
4.1.3.1 Red eléctrica (DVR-1).....	64
4.1.3.2 Unidad adicional de almacenamiento de energía (DVR-2)	64
4.1.3 Statcom	65
4.1.4 Superconductor de almacenamiento de energía (SMES)	65
4.1.5 Compressed Air Energy Storage (CAES)	65
4.1.6 Corrector Dinámico (DySC)	66
4.2 Selección de métodos	67



4.3 Corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S.....	69
4.3.1 Instalación corrector dinámico de voltaje	70
4.4 SAI SLC-80-CUBE3+ B1 A.....	71
4.4.1 Instalación SAI	74
4.5 Comparativa de tecnologías	76
4.5.6 Ventajas y limitaciones	78
4.6 Propuesta de mejora	78
4.6.1 Estudio de factibilidad	78
4.6.1.1 Viabilidad técnica	79
4.6.1.2 Viabilidad operativa.....	79
4.6.1.3 Viabilidad económica	80
Conclusiones	83
Recomendaciones	84

Índice de Figuras

<i>Fig.1.</i>	<i>Deformación de las señales de voltaje y corriente por el efecto de cargas no lineales.</i>	<i>25</i>
<i>Fig.2.</i>	<i>Muecas.</i>	<i>26</i>
<i>Fig.3.</i>	<i>Onda sinusoidal con ruido</i>	<i>26</i>
<i>Fig.4.</i>	<i>Variaciones de voltaje</i>	<i>27</i>
<i>Fig.5.</i>	<i>Ejemplo de sobrevoltaje</i>	<i>28</i>
<i>Fig.6.</i>	<i>Ejemplo de bajo voltaje.</i>	<i>28</i>
<i>Fig.7.</i>	<i>Sags.</i>	<i>29</i>
<i>Fig.8.</i>	<i>Swells</i>	<i>30</i>
<i>Fig.9.</i>	<i>Transitorio impulsivo positivo.</i>	<i>31</i>
<i>Fig.10.</i>	<i>Transitorio oscilatorio.</i>	<i>32</i>
<i>Fig.11.</i>	<i>Respuesta del ojo a fluctuaciones de brillo luminoso.</i>	<i>33</i>
<i>Fig.12.</i>	<i>Pérdida total de voltaje durante un lapso temporal.</i>	<i>34</i>
<i>Fig.13.</i>	<i>Ubicación geográfica Hospital San Luis de Otavalo.</i>	<i>39</i>
<i>Fig.14.</i>	<i>Equipo rayos X Quantum</i>	<i>43</i>
<i>Fig.15.</i>	<i>Tablero de Equipo rayos X Quantum</i>	<i>44</i>
<i>Fig.16.</i>	<i>Analizadores de calidad eléctrica y energía Fluke 435 Series II</i>	<i>48</i>
<i>Fig.17.</i>	<i>Pinza amperimétrica MUT 202.</i>	<i>49</i>
<i>Fig.18.</i>	<i>Voltaje Fase transformador 75kVA</i>	<i>50</i>
<i>Fig.19.</i>	<i>Voltaje Fase transformador 500kVA</i>	<i>50</i>
<i>Fig.20.</i>	<i>Flicker transformador 500kVA</i>	<i>51</i>
<i>Fig.21.</i>	<i>Flicker transformador 75kVA</i>	<i>52</i>
<i>Fig.22.</i>	<i>THD transformador 500kVA</i>	<i>53</i>
<i>Fig.23.</i>	<i>THD transformador 75kVA</i>	<i>53</i>
<i>Fig.24.</i>	<i>Armonico 3 transformador 500kVA</i>	<i>54</i>



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**



<i>Fig.25. Armonico 3 transformador 75kVA</i>	<i>54</i>
<i>Fig.26. Desequilibrio de voltaje transformador 500kVA.....</i>	<i>55</i>
<i>Fig.27. Huecos y picos transformador de 500kVA</i>	<i>56</i>
<i>Fig.28. Evento de voltaje 1</i>	<i>57</i>
<i>Fig.29. Evento de voltaje 2.....</i>	<i>58</i>
<i>Fig.30. Evento de voltaje 4.....</i>	<i>58</i>
<i>Fig.31. Evento de voltaje 5.....</i>	<i>59</i>
<i>Fig.32. Evento de voltaje 6.....</i>	<i>60</i>
<i>Fig.33. SAI estático</i>	<i>63</i>
<i>Fig.34. Restaurador Dinámico de Tensión (DVR).....</i>	<i>64</i>
<i>Fig.35. Esquema sistema de almacenamiento SMES</i>	<i>65</i>
<i>Fig.36. Diagrama sistema de almacenamiento CAES.....</i>	<i>66</i>
<i>Fig.37. Diagrama corrector dinámico</i>	<i>67</i>
<i>Fig.38. Corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S.....</i>	<i>69</i>
<i>Fig.39. Diagrama de conexiones Corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S.....</i>	<i>71</i>
<i>Fig.40. SLC-80-CUBE3+ B1 A</i>	<i>72</i>
<i>Fig.41. Vista frontal SAI SLC-80-CUBE3+ B1 con puertas abiertas.....</i>	<i>75</i>
<i>Fig.42. Vista frontal puertas abiertas armario de baterías</i>	<i>76</i>



Índice de Tablas

Tabla I	<i>Límites para el índice de nivel de voltaje.</i>	35
Tabla II	<i>Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)</i>	36
Tabla III	<i>Límites para la calidad de servicio técnico – índices globales .</i>	38
Tabla IV	<i>Equipos de laboratorio</i>	45
Tabla V	<i>Equipos de quirófano</i>	45
Tabla VI	<i>Equipos de fisioterapia</i>	46
Tabla VII	<i>Equipos de emergencia</i>	46
Tabla VIII	<i>Huecos de voltaje</i>	56
Tabla IX	<i>Matriz de decisión</i>	68
Tabla X	<i>Características generales Allen-Bradley 1608P-200A208V4S....</i>	70
Tabla XI	<i>Características técnicas SLC-80-CUBE3+ B1 A</i>	73
Tabla XII	<i>Comparativa de tecnologías</i>	77



RESUMEN

En el sector eléctrico, las instituciones de salud se clasifican como infraestructura crítica debido a su exigencia de calidad energética, ya que requieren un suministro eléctrico ininterrumpido para garantizar la seguridad tanto de los equipos médicos como de los usuarios. Se realizó una revisión de los principales parámetros electromagnéticos que afectan dicha calidad y se llevó a cabo un estudio en el Hospital “San Luis” de Otavalo, utilizando equipos especializados para evaluar el suministro eléctrico. El análisis se concentró en dos transformadores: uno de 500 kVA, encargado de la alimentación general del establecimiento, y otro de 75 kVA, destinado exclusivamente al equipo de rayos X. Siguiendo la Regulación No. ARCERNNR-002/20, se evaluaron parámetros como el nivel de voltaje, la distorsión armónica, el flicker y el desbalance de voltaje, concluyendo que estos indicadores se mantienen dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa. No obstante, se detectaron huecos de voltaje (sags) con caídas de hasta el 70 % del voltaje nominal, lo que representa un riesgo elevado para equipos médicos sensibles que requieren estabilidad eléctrica permanente. Ante esta situación, se evaluaron métodos como SAI (UPS), volantes de inercia, correctores dinámicos de voltaje (DVR), STATCOM y superconductores de almacenamiento (SMES), considerando factores técnicos como tiempo de respuesta, escalabilidad y costos. Tras el análisis, se seleccionó el Corrector Dinámico de Voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S por su capacidad de compensar caídas de voltaje en <2 ms, adaptarse a la red existente sin modificaciones estructurales mayores y operar en rangos de corriente (200 A) y voltaje (208 V) acordes a las necesidades del hospital. Contribuyendo a mejorar la seguridad y continuidad del servicio eléctrico en un entorno de alta exigencia.

Palabras clave: Calidad de energía, Transformadores, Huecos de voltaje, Equipos electro-médicos



ABSTRACT

In the electric power sector, healthcare institutions are classified as critical infrastructure due to their stringent energy quality requirements, as they require an uninterrupted power supply to ensure the safety of both medical equipment and users. A review of the main electromagnetic parameters affecting this quality was conducted, along with a study at the “San Luis” Hospital in Otavalo, using specialized equipment to assess the electrical supply. The analysis focused on two transformers: one rated at 500 kVA, responsible for the facility’s general power supply, and another rated at 75 kVA, exclusively dedicated to the X-ray equipment. In compliance with Regulation No. ARCERNNR-002/20, parameters such as voltage level, harmonic distortion, flicker, and voltage imbalance were evaluated, concluding that these indicators remain within the permissible limits established by the regulation. However, voltage sags were detected, with drops of up to 70% of the nominal voltage, posing a significant risk to sensitive medical equipment that requires continuous electrical stability. To address this issue, mitigation methods such as Uninterruptible Power Supplies (UPS), flywheels, Dynamic Voltage Restorers (DVR), STATCOMs, and Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) systems were evaluated, considering technical factors such as response time, scalability, and costs. Following the analysis, the Allen-Bradley 1608P-200A208V4S Dynamic Voltage Restorer was selected due to its ability to compensate voltage drops in less than 2 ms, integrate into the existing network without major structural modifications, and operate within current (200 A) and voltage (208 V) ranges suitable for the hospital’s needs. This solution enhances the safety and continuity of the electrical service in a high-demand environment.

Keywords: Power quality, Transformers, Voltage sags, Electro-medical equipment



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



CAPITULO I
INTRODUCCIÓN

Tema

Estudio de la incidencia de equipos electro-médicos en la calidad de energía eléctrica del hospital 'San Luis' de Otavalo.

El problema

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Problemática a investigar.

El uso intensivo de equipos médicos, como Rayos X, monitores cardíacos y ventiladores en el hospital 'San Luis', generan deformaciones en la onda, interrupciones y armónicos en la red eléctrica de la institución.

El estudio de la incidencia de equipos médicos en la calidad de energía eléctrica en el hospital 'San Luis' de Otavalo plantea un problema de gran relevancia en el ámbito de la atención médica y la gestión hospitalaria. El hospital 'San Luis' es una institución de salud de importancia en la región de Otavalo que presta servicios médicos críticos y especializados a la población local. La calidad de la energía eléctrica en un entorno hospitalario es esencial para el funcionamiento adecuado de equipos médicos, la seguridad de los pacientes, el personal médico, y la continuidad de los servicios de atención médica.

Esta situación plantea riesgos para la seguridad de los pacientes al comprometer el correcto desempeño de dispositivos médicos esenciales, generando así potenciales repercusiones graves. Entre estas, se incluyen disfunciones en los equipos que podrían ocasionar demoras en procedimientos médicos cruciales y, en situaciones extremas, conllevar riesgos para la vida de los pacientes



1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuál es la influencia del funcionamiento de los equipos médicos en la calidad de energía eléctrica del Hospital 'San Luis' de Otavalo?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar un estudio de la incidencia de los equipos electro-médicos en la calidad de energía del Hospital 'San Luis' de Otavalo, para la elaboración de una propuesta de mejora mediante la regulación No. ARCERNNR-002/20(Codificado).

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los parámetros electromagnéticos y la regulación actual para aplicar una evaluación de la calidad del suministro eléctrico.
- Analizar la calidad de energía que se utiliza en las instalaciones de los equipos electro médicos del hospital 'San Luis' de Otavalo.
- Realizar la propuesta de mejora.

1.3 Alcance y delimitación

El alcance de este estudio abarcará una evaluación exhaustiva de la calidad de la energía eléctrica en el Hospital 'San Luis' de Otavalo, Ecuador, para conocer y mejorar la confiabilidad de la calidad de energía en las instalaciones hospitalarias. Se llevará a cabo un análisis detallado de los parámetros electromagnéticos claves, como la tensión, la corriente, armónicos y otros factores relevantes.

Esta investigación se enfocará en examinar la regulación actual sobre la calidad del suministro eléctrico en entornos hospitalarios. Para garantizar que el hospital cumpla con las mejores prácticas y normas de seguridad eléctrica, se revisará la regulación No. ARCERNNR -002/20.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



Se llevarán a cabo mediciones en tiempo real utilizando un registrador de calidad eléctrica trifásico para evaluar el impacto de los equipos médicos en la calidad de la energía. Durante el funcionamiento de los equipos médicos críticos en el hospital, este dispositivo permitirá un seguimiento preciso de las deformaciones de la onda, la presencia de armónicos y las variaciones de voltaje.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio, se presentará una propuesta de mejora destinadas a mitigar los fenómenos electromagnéticos identificados, los cuales inciden negativamente en la calidad de energía del hospital contribuyendo así a mejorar la calidad de energía para el correcto funcionamiento de los equipos médicos en el Hospital 'San Luis' de Otavalo.

1.4 Justificación

Este estudio sobre la incidencia de equipos médicos en la calidad de energía eléctrica del Hospital 'San Luis' de Otavalo adquiere una significativa importancia en el contexto de la atención médica. La relevancia principal radica en la necesidad imperante de garantizar la calidad de energía eléctrica en el entorno hospitalario, fundamental para el funcionamiento óptimo de los equipos electro-médicos y para mantener altos estándares de seguridad.

La investigación aportará nueva información al identificar las interacciones específicas entre los equipos electro-médicos y la calidad de energía. Este conocimiento permitirá la elaboración de una propuesta precisa para mejorarla, generando así información valiosa para futuras decisiones y mejoras operativas.

El impacto de este estudio se refleja directamente en la calidad de la atención médica, ya que una mejora en la calidad de la energía contribuirá a un entorno más seguro y eficiente para el tratamiento de los pacientes. La seguridad del paciente se ve beneficiada al evitar interrupciones en el funcionamiento de los equipos electro-médicos, asegurando así un ambiente hospitalario más seguro.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



Los beneficiarios directos de este estudio son los pacientes del Hospital 'San Luis' de Otavalo, así como el personal médico y administrativo que depende del funcionamiento eficiente de los equipos médicos. La mejora de la calidad de la energía repercute en el bienestar general de la comunidad hospitalaria.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Un estudio realizado en Europa determina que la calidad de la energía eléctrica es fundamental en ingeniería energética, ya que las perturbaciones pueden causar cortes costosos, pérdidas de producción y daños a equipos. Factores clave incluyen armónicos, caídas de tensión, interrupciones y bajo factor de potencia. La gestión de la calidad de la energía es esencial en aplicaciones industriales y no industriales para garantizar operaciones confiables y eficientes [1]. la calidad de la energía eléctrica es un elemento central en la infraestructura moderna, con implicaciones que van más allá de la simple disponibilidad de energía. Desde la productividad industrial hasta la comodidad en el hogar, la atención a este aspecto es esencial para garantizar un desarrollo económico sostenible [2].

La calidad de la energía eléctrica se refiere a mantener la tensión del bus de distribución de energía casi sinusoidal en magnitud y frecuencia nominales, asegurando un suministro ininterrumpido de energía a los clientes desde una perspectiva de confiabilidad[3]. Los sistemas de transmisión de potencia también pueden influir en la calidad de la energía debido a su baja relación resistencia/reactancia, lo que resulta en una baja amortiguación del sistema. Sin embargo, las estaciones generadoras bien diseñadas suelen generar voltajes casi perfectamente sinusoidales, lo que no suele ser una fuente de problemas para el suministro de energía de calidad[4].

Otro estudio realizado en la India se centra en el examen del concepto de calidad de la energía, que se define como el mantenimiento de una onda de tensión sinusoidal a la frecuencia nominal sin distorsión. El objetivo principal es garantizar la transmisión de ondas de tensión ininterrumpidas, si bien este propósito puede verse comprometido por la presencia de cargas no lineales, las cuales inducen cambios en las formas de onda e



introducen distorsiones tales como caídas, parpadeos, fluctuaciones y disminuciones de tensión[5]. Las distorsiones, como caídas de tensión, parpadeos, fluctuaciones y disminuciones, pueden alterar la forma de onda de la tensión suministrada al circuito, generando no linealidades en el mismo y afectando la naturaleza de la corriente que lo recorre.[5]

Las cargas no lineales, que no mantienen una relación lineal entre las formas de onda de tensión y corriente, son una fuente común de problemas en el sistema de alimentación eléctrica. Estas cargas introducen armónicos y distorsiones que pueden afectar la calidad de la energía[6].

El uso generalizado de cargas no lineales en aplicaciones industriales, comerciales y domésticas ha generado inconvenientes en la red eléctrica. Estos problemas incluyen sobrecargas en equipos eléctricos y un envejecimiento prematuro de las máquinas eléctricas[7]. A medida que aumenta la presencia de cargas no lineales y se integran múltiples fuentes de energía en la red, la probabilidad de perturbaciones en la corriente, voltaje y frecuencia de la red se incrementa, lo que afecta los parámetros de operación normal del sistema[8].

La presencia de armónicos en los sistemas de alimentación puede generar una serie de problemas en los equipos, como daños, sobrecalentamiento y reducción de la velocidad de las máquinas. Esto también puede causar distorsiones y averías en los equipos y reducir la vida útil de los supercondensadores[9].

El siguiente estudio realizado en Quito aborda la crítica problemática de la contaminación armónica generada por una gran cantidad de cargas no lineales en la red eléctrica, subrayando la complejidad de este fenómeno. El control efectivo de los armónicos se erige como un aspecto de gran relevancia en este contexto. En la aplicación práctica, se presenta la compleja naturaleza de la señal, influenciada por interferencias de ruido que impactan directamente en el proceso de detección de armónicos. Por consiguiente, la



eliminación del ruido y la estabilización rápida de la detección de armónicos adquieren una significativa importancia en la evaluación de la calidad de la energía eléctrica suministrada, lo que constituye un desafío crucial en este ámbito[10].

Un estudio realizado en Bulgaria nos demuestra que es importante destacar que la idoneidad técnica del sistema eléctrico y la calidad de la energía son críticas en aplicaciones médicas, ya que una mala calidad de la energía podría llevar a interpretaciones ambiguas en diagnósticos y tratamientos médicos[11].

La infraestructura eléctrica en hospitales debe garantizar no solo la calidad de la electricidad, sino también la seguridad técnica de los costosos equipos médicos en caso de sobrecarga. Además, el aumento en el consumo de electricidad en instituciones médicas representa un desafío actual que debe abordarse de manera efectiva[11].

El análisis del flujo de carga en las redes de media y baja tensión emerge como una herramienta esencial para determinar los perfiles de tensión, los flujos de potencia activa y reactiva, así como las corrientes de cortocircuito en las diferentes ramificaciones del sistema. Esta evaluación permite lograr una distribución óptima de las potencias activas y reactivas, asegurando un suministro de energía continuo y previniendo posibles daños en los equipos médicos[12].

En última instancia, este enfoque analítico contribuye significativamente a la fiabilidad y eficiencia operativa de las instalaciones hospitalarias, minimizando los riesgos asociados con problemas de calidad de la energía y garantizando la prestación ininterrumpida de servicios cruciales para el bienestar de los pacientes[12].

El trabajo de investigación propone un acondicionador unificado de calidad de energía (UPQC) basado en una lógica difusa con un generador distribuido y un transformador conectado en forma de estrella para mejorar la calidad de la energía. El UPQC propuesto incluye un transformador conectado en Y, un filtro LC y un método de control de enlace DC implementado mediante un controlador basado en lógica difusa. Los resultados de la



simulación muestran que el UPQC híbrido con generación distribuida es más eficaz para reducir los efectos de caída de voltaje, el aumento de voltaje, los armónicos de corriente de carga, los armónicos de corriente de fase y la corriente neutra en comparación con el método UPQC tradicional[13].

El incremento de los costos eléctricos y la necesidad imperante de minimizar el desperdicio de energía han motivado a la industria a implementar estrategias como la corrección del factor de potencia y el control armónico. La corrección del factor de potencia implica la introducción de condensadores en paralelo, buscando mejorar la eficiencia al optimizar la distribución eléctrica y acercar el factor de potencia a 1, indicador de máxima eficiencia. Simultáneamente, el control armónico, a través de reactores lineales, atenúa las fluctuaciones indeseadas provocadas por armónicos, asegurando un suministro eléctrico más estable y confiable[14].

2.2 Calidad de energía

La calidad de la energía hace referencia a las propiedades específicas de la energía eléctrica, tales como su voltaje, frecuencia y forma de onda, que impactan en el funcionamiento de los dispositivos eléctricos. Este aspecto adquiere relevancia significativa en el ámbito eléctrico, especialmente debido al creciente empleo de convertidores electrónicos de potencia en diversos dispositivos. Estos convertidores pueden introducir armónicos y componentes reactivos en la corriente, generando características no lineales y potenciales problemas en la calidad de la energía. La creación de estándares se ha vuelto imperativa para abordar estas inquietudes y asegurar niveles óptimos de compatibilidad[15].

2.2.1 Importancia de la calidad de energía

La calidad de la energía eléctrica desempeña un papel fundamental en el rendimiento, la confiabilidad y la seguridad de los equipos eléctricos. Su influencia se extiende a la



eficiencia y eficacia del suministro de energía, asegurando el funcionamiento adecuado de los dispositivos eléctricos sin interrupciones[16].

La consecución de una energía eléctrica de alta calidad resulta esencial para satisfacer la creciente demanda de un suministro fiable y eficiente. Además, cobra relevancia en el contexto del desarrollo de tecnologías de redes inteligentes, las cuales tienen como objetivo mejorar la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de energía eléctrica[16].

2.3 Defectos de la calidad de energía eléctrica

Los defectos que inciden en la calidad de la energía se agrupan en diversas categorías, siendo esencial comprender y abordar cada uno de ellos para garantizar un suministro eléctrico óptimo. Entre los defectos más significativos se encuentran:

- (THD)Distorsión armónica
- Muecas
- Ruido
- Variaciones de tensión
- Transitorios
- Off Set
- Flicker
- Interrupciones

2.3.1 THD (Distorsión armónica)

La distorsión armónica se refiere a la presencia de frecuencias adicionales en una señal eléctrica que son múltiplos de la frecuencia fundamental. Es un problema común en los sistemas de energía y puede causar varios problemas, como una reducción de la calidad de la energía, un aumento de las pérdidas e interferencias con otros equipos. La distorsión armónica se mide normalmente con el parámetro de distorsión armónica total (THD), que cuantifica el porcentaje de contenido armónico de la señal. El comportamiento de la



distorsión armónica en un sistema eléctrico puede verse influido por factores como el tipo de inversores utilizados y las cargas conectadas[17].

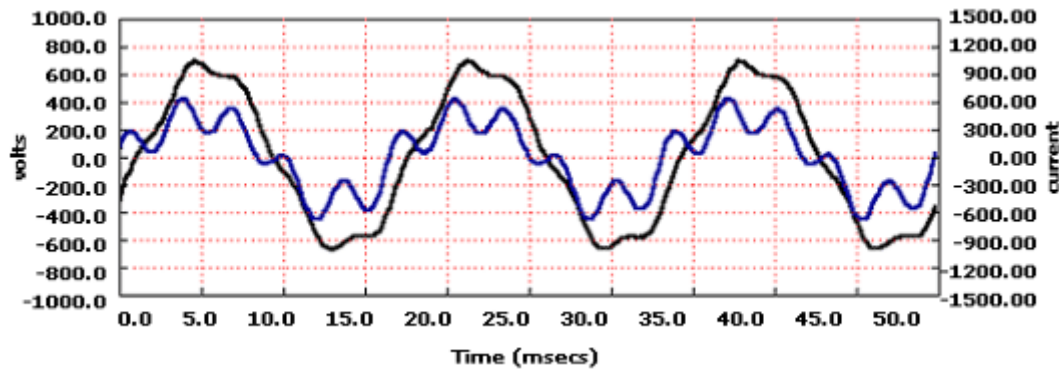


Fig.1. Deformación de las señales de voltaje y corriente por el efecto de cargas no lineales.[18]

2.3.2 Notching(Muescas)

Las muescas de tensión son perturbaciones en la tensión que pueden producirse en los sistemas de alimentación. Se caracterizan por una disminución de la magnitud de la tensión durante un breve período de tiempo. Las muescas de tensión pueden tener un impacto negativo en la calidad y confiabilidad de la fuente de alimentación. Se consideran una de las perturbaciones de la calidad de la energía (PQD) que pueden afectar el rendimiento de los equipos eléctricos. Las muescas de tensión se pueden detectar y analizar mediante varios métodos, incluido el uso de clasificadores SVM (máquina vectorial de soporte)[19].

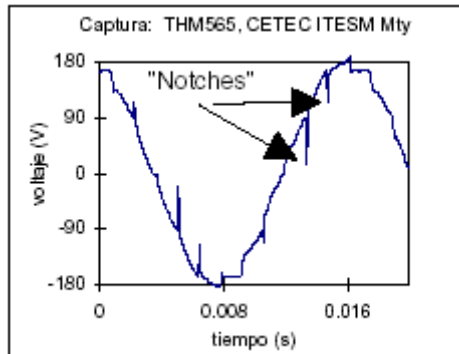


Fig.2. Muecas[20].

2.3.3 Noise (Ruido)

Ruido se refiere a señales eléctricas o perturbaciones no deseadas que pueden interferir con el funcionamiento adecuado de los dispositivos o sistemas eléctricos. Puede manifestarse como fluctuaciones aleatorias de voltaje o corriente, interferencias electromagnéticas (EMI) o interferencias de radiofrecuencia (RFI). El ruido eléctrico puede ser generado por diversas fuentes, incluidas las fuentes de alimentación, los componentes electrónicos, los campos electromagnéticos y fuentes externas, como las ondas de radio o los equipos eléctricos cercanos[21].

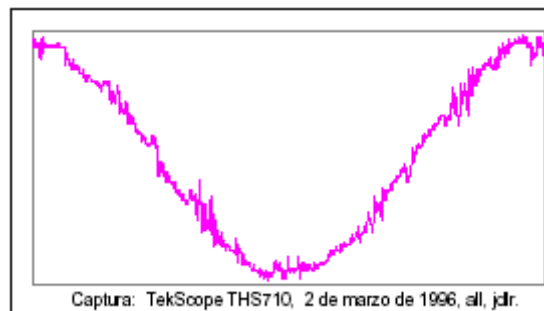


Fig.3. Onda sinusoidal con ruido[20]



2.3.4 Variaciones de voltaje

La variación de voltaje se refiere a los cambios en los niveles de voltaje en un sistema eléctrico. Incluye la caída, el aumento y la interrupción de la tensión, que se consideran alteraciones en la calidad de la energía. La caída de tensión se refiere a una disminución temporal de la tensión por debajo del nivel normal, mientras que el aumento de tensión es un aumento temporal de la tensión por encima del nivel normal. La interrupción del voltaje, por otro lado, es una pérdida total de voltaje durante un corto período de tiempo. Estas variaciones pueden tener efectos perjudiciales en los equipos eléctricos y provocar averías o daños[21].

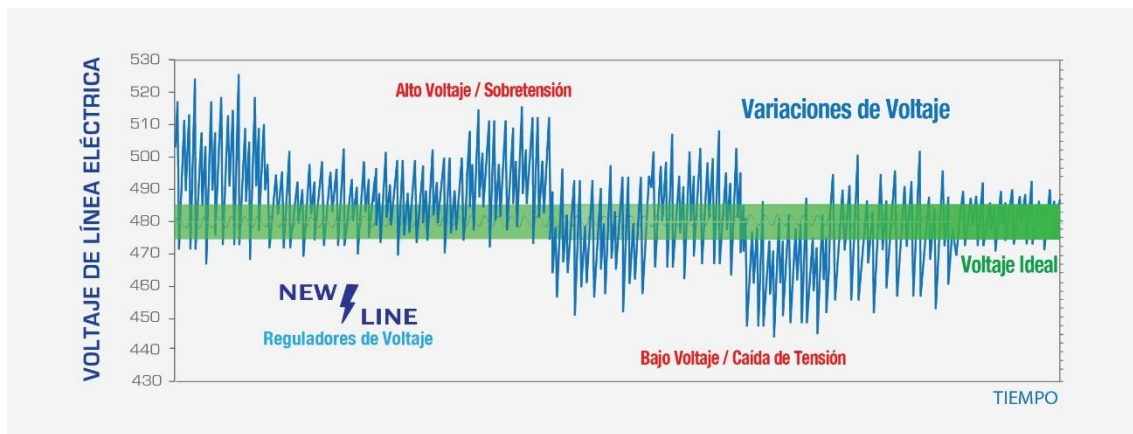


Fig.4. Variaciones de voltaje[22]

2.3.4.1 Overvoltage(Sobrevoltaje)

Las sobretensiones se definen como las variaciones eléctricas que ocurren cuando la tensión en un circuito excede su valor normal o nominal. Estas fluctuaciones pueden originarse por diversos motivos, tales como descargas atmosféricas, aumentos repentinos de voltaje o irregularidades en el sistema eléctrico. Es crucial reconocer que las sobretensiones plantean un riesgo significativo para dispositivos y equipos eléctricos, ya que tienen el potencial de ocasionar daños o provocar fallos en su funcionamiento[23].

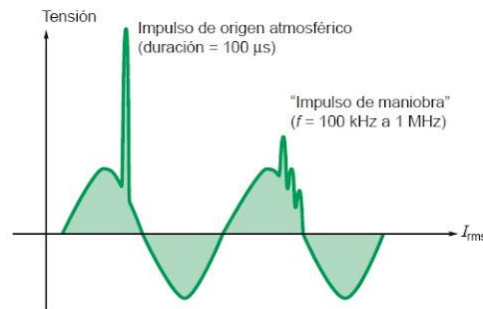


Fig.5. Ejemplo de sobrevoltaje.[24]

2.3.4.2 Undervoltage(Bajo voltaje)

El bajo voltaje se define como la condición en la que la tensión suministrada a un circuito o dispositivo disminuye por debajo de un nivel umbral específico. Esta situación puede originarse debido a diversas razones, tales como variaciones en la fuente de alimentación, fallos en el sistema eléctrico o una carga excesiva en el circuito. La subtensión tiene el potencial de ocasionar un rendimiento deficiente o daños en dispositivos electrónicos, y en ciertas aplicaciones, puede representar un riesgo para la seguridad[25].

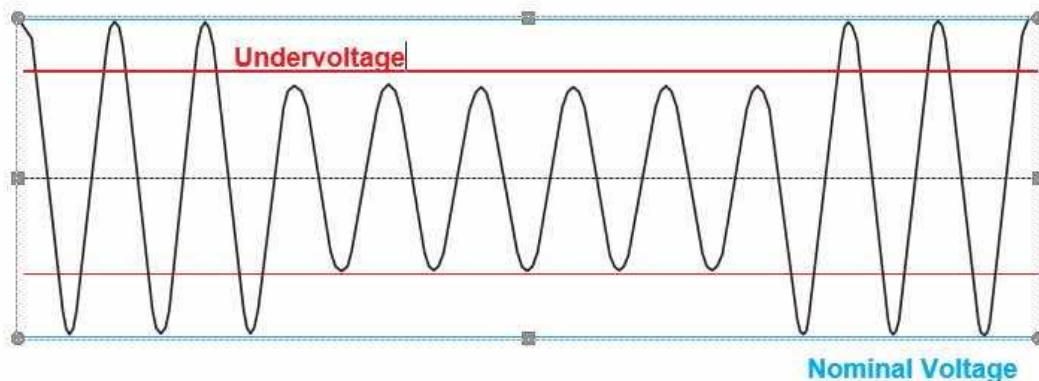


Fig.6. Ejemplo de bajo voltaje.[26]

2.3.5 Variaciones de voltaje de corta duración

Las fluctuaciones momentáneas en el voltaje, de corta duración, surgen debido a circunstancias como fallas, la activación de cargas significativas que demandan elevadas corrientes iniciales, o conexiones sueltas intermitentes en el cableado de alimentación. Dependiendo de la ubicación de la falla y las condiciones del sistema, estas variaciones pueden dar lugar a descensos temporales de voltaje, conocidos como "sags", o a incrementos de voltaje, denominados "swells"[27].

2.3.5.1 Sags

Los sags son eventos que se observan con frecuencia en los sistemas de alimentación. Se refieren a una disminución temporal de los niveles de tensión por debajo del valor normal durante un breve período de tiempo. Las caídas pueden ocurrir debido a varias razones, como fallas, el funcionamiento del equipo o eventos de conmutación[28].

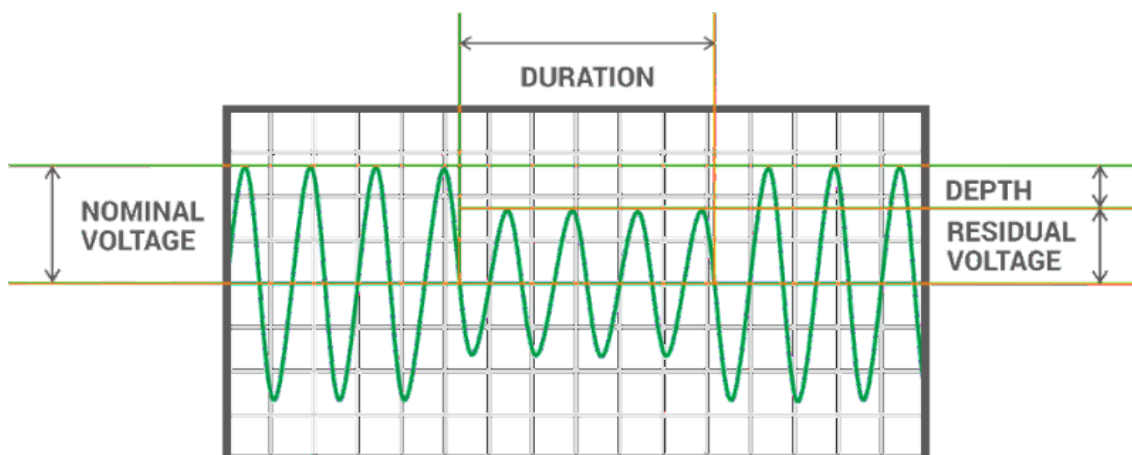


Fig.7. Sags.[29]

2.3.5.2 Swells

Las 'Swells' son eventos que se observan comúnmente en los sistemas de energía. Se refieren a un aumento temporal de los niveles de tensión por encima del valor normal durante un breve período de tiempo. Las subidas de tensión pueden producirse debido a diversas razones, como la conmutación de condensadores, la pérdida de carga o la caída de un rayo[28].

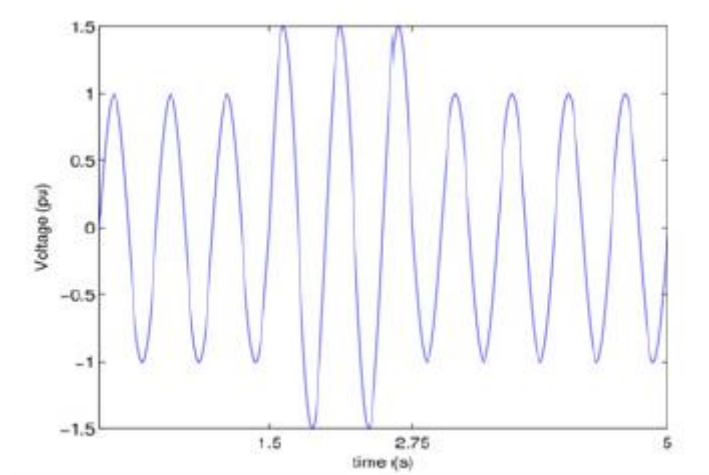


Fig.8. Swells[30]

2.3.6 Transitorios

Los transitorios eléctricos son descritos como interrupciones imprevisibles de alta energía y breve duración, que no pueden ser identificados ni eliminados por los dispositivos de protección instalados. Estos se clasifican en dos subcategorías: transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios[31].

2.3.6.1 Transitorios impulsivos

Se trata de eventos súbitos de amplitud elevada que provocan un aumento en la tensión y/o los niveles de corriente en dirección positiva o negativa. Los transitorios impulsivos son caracterizados por su rapidez, con tiempos de ascenso tan breves como 5 nanosegundos desde el estado estable hasta el valor máximo del impulso, y tienen una duración corta, inferior a un ciclo. La Figura 8 ilustra un ejemplo de un transitorio impulsivo[31].

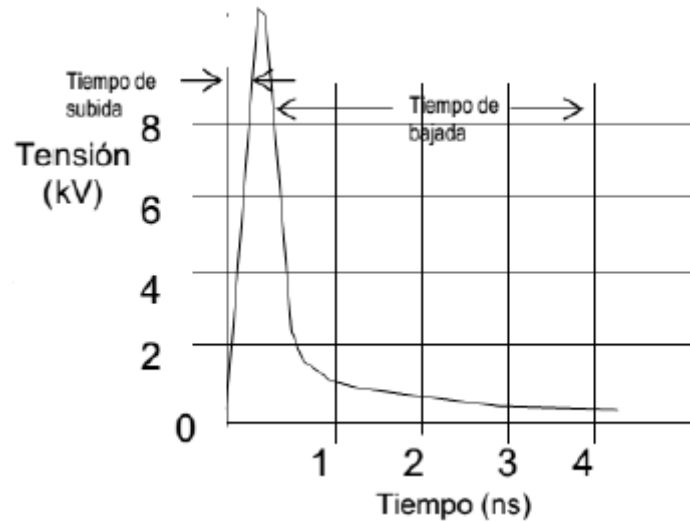


Fig.9. Transitorio impulsivo positivo.[31]

2.3.6.1 Transitorios Oscilatorios

Se trata de eventos súbitos que afectan la condición estable de la tensión o la corriente de una señal, manifestándose tanto en la parte positiva como negativa de la señal y oscilando a la frecuencia natural del sistema. Estos eventos generan un aumento seguido de una disminución rápida y alternada en el valor de la tensión.

Los transitorios oscilatorios suelen ocurrir al conmutar una carga inductiva o capacitiva, como es el caso de motores o bancos de capacitores. La Figura exhibe un ejemplo típico de un transitorio oscilatorio de baja frecuencia, el cual se relaciona con la energización de bancos de capacitores[31].

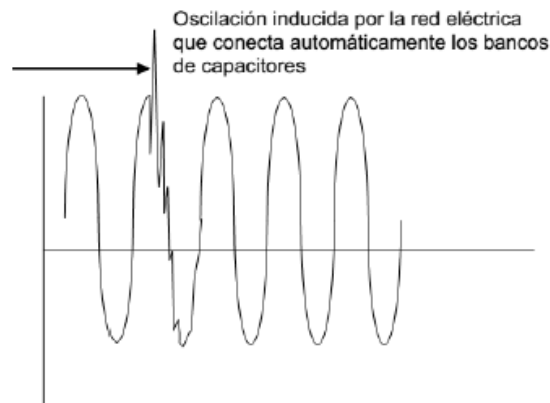


Fig.10. Transitorio oscilatorio.[31]

2.3.7 Off Set(Dc)

La presencia de tensión o corriente continua en un sistema de corriente alterna se conoce como "componente de continua" o "DC offset". Esta situación puede surgir debido a la presencia de rectificadores de media onda, los cuales generan pulsos de corriente continua en un sistema que debería ser de corriente alterna. Esta presencia de componente de continua puede ocasionar saturación parcial en los transformadores, resultando en daños a su aislamiento[32].

2.3.8 Flicker

El flicker se define como la apreciación visual de cambios en la luminosidad de una lámpara, ocasionados por fluctuaciones abruptas en la tensión de la red de alimentación eléctrica. Este fenómeno puede generar una sensación desagradable en aquellos que lo experimentan[33].

Este efecto tiene un origen fisiológico visual y es notado por los usuarios de lámparas conectadas a una fuente común de iluminación y a una carga perturbadora. Las variaciones rápidas en la intensidad luminosa, asociadas a cambios en la frecuencia de la



corriente eléctrica suministrada, pueden resultar incómodas para las personas expuestas al flicker[33].

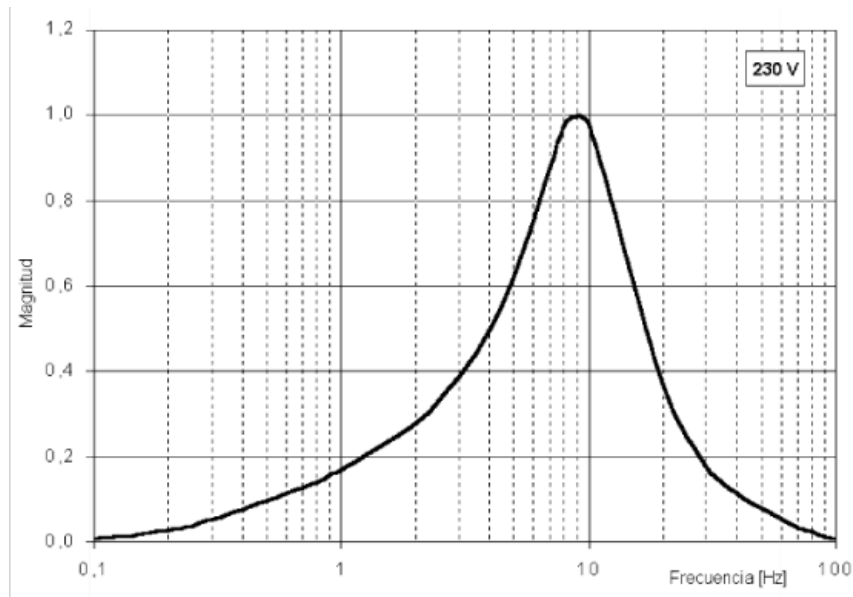


Fig.11. Respuesta del ojo a fluctuaciones de brillo luminoso[33].

2.3.9 Interrupciones

Una interrupción se caracteriza por un evento en el cual el voltaje en el punto de conexión del cliente disminuye a cero y no se restablece automáticamente a sus valores normales. Según las normativas de la IEC, se considera que una interrupción prolongada tiene un tiempo mínimo de duración de 3 minutos. Si la duración es inferior a estos 3 minutos, se clasifica como una interrupción breve[34].

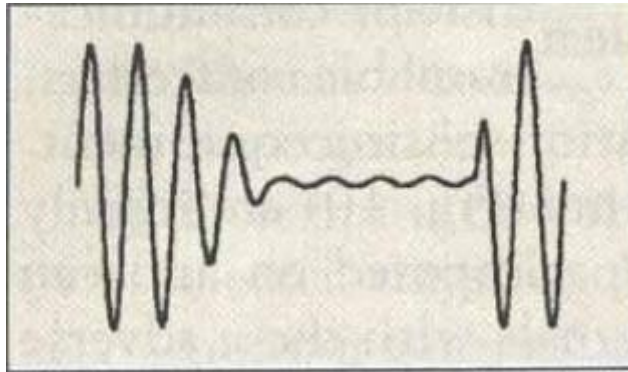


Fig.12. Pérdida total de voltaje durante un lapso temporal[34].

2.4 Regulación No. ARCERNNR-002/20 (codificada)

Esta regulación está en efecto y fue ratificada en el año 2020. Su propósito es establecer los estándares y parámetros para la calidad en la comercialización y distribución de energía eléctrica. Además, busca precisar los procedimientos relacionados con el registro, medición y evaluación que deben seguir las empresas distribuidoras, así como los consumidores regulados y no regulados conectados a la red[35].

2.4.1 Atributos de Calidad

La evaluación de la calidad de la prestación del servicio de energía eléctrica se efectuará considerando los siguientes índices e indicadores:

- Calidad de producto
- Calidad de servicio
- Calidad de servicio comercial

2.4.1.1 Calidad de producto

Característica de la calidad del servicio vinculada a la manera en que la distribuidora suministra las señales de voltaje, distinguiéndose, entre otros aspectos, por el nivel de voltaje, las variaciones abruptas de voltaje y la presencia de armónicos[35].

Se clasifica en los siguientes indicadores:

**a) Nivel de voltaje**

La calidad de nivel de voltaje en un punto del sistema de distribución se determinará con el siguiente índice de variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto dado[35].

Tabla I Límites para el índice de nivel de voltaje. [35]

Nivel de Voltaje	Rango admisible
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5.0 \%$
Medio Voltaje	$\pm 6.0 \%$
Bajo Voltaje	$\pm 8.0 \%$

b) Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)

Se evaluará mediante el índice de severidad por flicker de corta duración, cual mide la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de voltaje a corto plazo, con intervalos de medición de 10 minutos. El valor límite para el índice de severidad del flicker de corta duración P en el punto de medición respectivo no debe superar la unidad[35].

c) Distorsión armónica de voltaje

Los límites máximos del factor de distorsión armónica individual de voltaje y del factor de distorsión armónica total de voltaje son los siguientes:



Tabla II Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)[35]

Nivel de Voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

d) Desequilibrio de voltaje

El desequilibrio de voltaje en un punto de medición será de 2% para todos los niveles de voltaje.

2.4.1.2 Calidad de servicio técnico

Aspecto de la calidad del servicio vinculado con la consistencia en la provisión del servicio de energía eléctrica, identificándose por la frecuencia y duración de las interrupciones en el suministro[35].

a) Registro y clasificación de las interrupciones

Todas las interrupciones deberán ser registradas por la distribuidora de acuerdo con los siguientes atributos:

- Por su duración
 - ❖ Breves: de duración igual o menor a tres (3) minutos.
 - ❖ Largas: de duración mayor a tres (3) minutos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



- Por su origen
 - ❖ Internas: originadas en el sistema de distribución de la distribuidora y de responsabilidad de la empresa de distribución.
 - ❖ Externas: originadas por un generador, por el transmisor, por suspensiones generales del servicio, por otra distribuidora o por un consumidor.
- Por su causa
 - ❖ Programadas: Mantenimiento, ampliaciones, mejoras, maniobras, otras.
 - ❖ No programadas: Climáticas, ambientales, fallas en la red eléctrica, terceros, otras.

b) Indicadores

Los parámetros que se evalúan mediante cálculos son los siguientes:

- Frecuencia media de interrupción (*FMIK*), la cual indica la cantidad promedio de interrupciones de servicio experimentadas por cada kilovoltio-amperio (kVA) nominal instalado durante el período de observación, ya sea mensual o anual.
- Tiempo total de interrupción (*TTIK*), que refleja la duración media, medida en horas, durante la cual cada kilovoltio-amperio (kVA) nominal instalado permaneció inactivo, a lo largo del período de evaluación, ya sea mensual o anual.

c) Límites

Los límites para los valores máximos permitidos de los índices globales de calidad del servicio técnico, durante un periodo de doce (12) meses consecutivos del año calendario (de enero a diciembre), se establecerán como se indica en la tabla 3.



Tabla III Límites para la calidad de servicio técnico – índices globales [35]

Índice	Red	Alimentador	
		Alta densidad	Baja densidad
<i>FMIK</i>	6.0	7.0	9.5
<i>TTIK</i>	8.0	10.0	16.0

2.4.1.3 Calidad del servicio comercial

Este atributo de calidad del servicio está vinculado a la atención proporcionada por la distribuidora al consumidor final y se distingue, entre otros aspectos, por los tiempos dedicados a gestionar nuevos suministros, resolver reclamos, restablecer el suministro, garantizar una facturación precisa y percibir la satisfacción de los usuarios con el servicio de energía eléctrica[35].

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

El capítulo se centra en la presentación de los resultados obtenidos de los equipos electro médicos que se utilizan, así como en la evaluación de los parámetros eléctricos conforme a la regulación ARCERNNR 002/20 (Codificada).

3.1 Descripción del lugar de estudio

El Hospital San Luis de Otavalo, como segundo nivel de atención, fue inaugurado el 22 de mayo de 1953, tiene 71 años de vida institucional, está ubicado en la provincia de Imbabura en la ciudad de Otavalo en la Calle Antonio José de Sucre y Calle Estados Unidos. En la figura 12 se encuentra la ubicación geográfica del hospital.

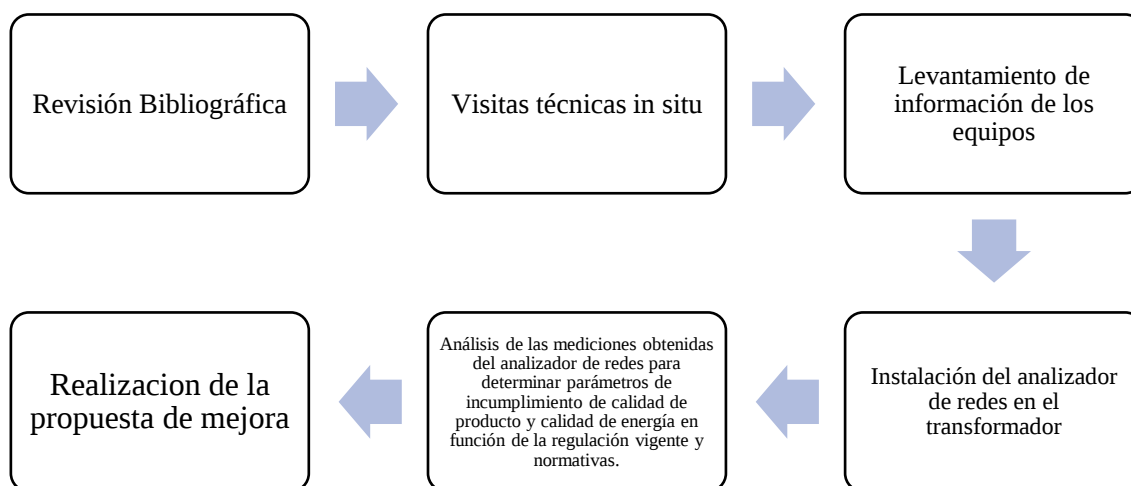


Fig.13. Ubicación geográfica Hospital San Luis de Otavalo.



Las áreas médicas del hospital son: Medicina Interna, Cirugía, Traumatología, Psiquiatría, Nutrición, Pediatría, Rehabilitación, Laboratorio Clínico, además de la atención en el parto humanitario con pertinencia cultural.

3.2. Metodología



3.2.1 Visitas técnicas In situ

Para la obtención de información, se realizaron visitas al hospital. Con la colaboración del personal técnico de mantenimiento eléctrico y la asistencia del técnico Mario Almeida, se llevó a cabo un recorrido detallado por el hospital y sus instalaciones.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



3.2.2 Levantamiento de Información técnica del hospital

La información obtenida del sistema eléctrico del Hospital San Luis de Otavalo constituye una base fundamental para el desarrollo del estudio de calidad de energía. Esta información no solo permite un análisis detallado de la infraestructura eléctrica, sino que también proporciona una visión clara y precisa de la magnitud y distribución de los equipos electro-médicos instalados en las diversas áreas del hospital.

El inventario de equipos en el Hospital San Luis de Otavalo revela una notable variedad en términos de antigüedad y tecnología. Algunos dispositivos han estado en servicio durante varias décadas, mientras que otros han sido adquiridos en los últimos años. Esta diversidad en los años de servicio de los equipos representa un desafío significativo para el mantenimiento y la gestión de la calidad de energía

3.2.2.1 Transformador

El hospital cuenta con dos transformadores que desempeñan roles cruciales en la gestión de su suministro eléctrico. Un transformador monofásico de 75 kVA está dedicado exclusivamente al equipo de rayos X, garantizando que este equipo reciba una alimentación eléctrica estable y confiable. El otro transformador, trifásico y con una capacidad de 500 kVA, se utiliza para la alimentación general del hospital, asegurando el funcionamiento de todas las demás instalaciones y equipos médicos. Esta distribución de la carga entre los dos transformadores es esencial para mantener la calidad de la energía y minimizar las interrupciones en el servicio.

3.2.2.1 Puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra del hospital es de tipo TN-S y está conformado por una malla de tierras, cuya resistencia se midió mediante un telurómetro, registrando un valor de 3,1 Ω (ohmios). Este parámetro cumple con los límites establecidos en normativas técnicas como la NEC 250.56 para instalaciones críticas, asegurando la disipación segura de corrientes de falla y protegiendo tanto a los usuarios como a los equipos médicos sensibles.



3.2.2.2 Diagnostico de las instalaciones

Se llevó a cabo un diagnóstico técnico en la instalación eléctrica del hospital, en el cual se verificó que los niveles de voltaje en los tableros de subdistribución se mantienen dentro de los rangos normativos. Las mediciones, realizadas con la pinza amperimétrica Truper Mut 202 arrojaron un promedio de 115,6 V en tensión fase-neutro y 216,5 V en tensión fase-fase, valores que se ajustan a los límites establecidos en la normativa. Estos resultados confirman que la infraestructura eléctrica cumple con los parámetros de voltaje nominal, garantizando un suministro estable para equipos médicos y cargas críticas.

3.2.2.3 Equipos electro médicos

El levantamiento realizado en el hospital se enfocó en la identificación exhaustiva de todos los equipos electro-médicos en uso. Este proceso incluyó la recopilación de datos sobre los tipos de equipos, sus especificaciones técnicas, y sus horarios de operación. El objetivo principal de este levantamiento fue determinar cómo estos equipos influyen en la calidad de la energía dentro de las instalaciones hospitalarias.

- **Rayos X Quantum Q Rad-system-Q64000**

La máquina de rayos X, con una potencia nominal de 40 kW, opera diariamente en un horario de 7:00 a.m. a 7:00 p.m., siendo las horas pico de operación entre las 7:00 a.m. y la 1:00 p.m. Durante este periodo, la demanda de energía es mayor, lo que podría generar un impacto significativo en la calidad del suministro eléctrico, especialmente en lo referente a fluctuaciones y estabilidad, dado el consumo elevado y continuo de este equipo.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



Fig.14. Equipo rayos X Quantum

❖ **Tablero eléctrico rayos X**

El tablero de los equipos de rayos X está compuesto por un contactor GMC 180, un disyuntor de caja moldeada MEC ABE203B de 150 A, un cable de calibre #4, y su respectivo cable de tierra. Este conjunto de componentes es esencial para garantizar la seguridad y correcto funcionamiento del equipo, permitiendo la protección contra sobrecargas y fallos eléctricos, además de asegurar una adecuada conexión a tierra para minimizar riesgos de descargas eléctricas.

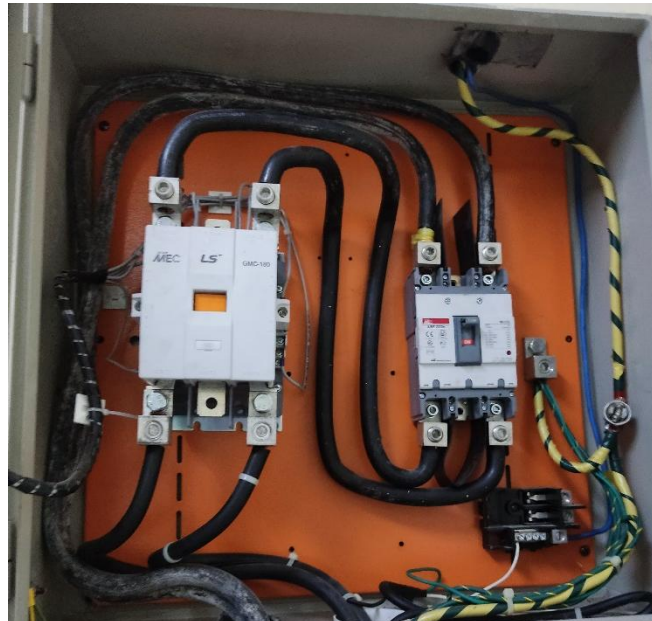


Fig.15. Tablero de Equipo rayos X Quantum

- **Laboratorio**

El equipo de laboratorio opera de manera continua las 24 horas del día. Los equipos, junto con sus nombres y modelos específicos, se detallan en la tabla IV, proporcionando una descripción completa del instrumental utilizado en las diferentes actividades de laboratorio.



Tabla IV Equipos de laboratorio

Nombre	Modelo
Analizador hormonas	Mindray CL-900
Analizador Automático Química Sanguínea	Dirui CS-600B
Gasómetro	Cornley Vitagas5
Analizador hematológico	Dirui Bf-6900
Analizador hematológico	Dirui Bf-6800
Analizador hematológico	Dirui bcc-3600
Incubadora	Diame
Centrifugadora	Diame 65

- **Quirófano**

Para los equipos de quirófano no existen horarios preestablecidos de uso, sin embargo, es posible realizar un promedio de las horas de utilización diaria. Los equipos y el tiempo estimado de uso diario se detallan en la tabla V.

Tabla V Equipos de quirófano

Nombre	Modelo	Uso
Lampara cielitica	Polaris 100 drager	5-6 horas
Electrobisturí	Valleylab Force fx	5-6 horas
Maquina anestesia	Penlon Prima SP2	2-3 horas
Mesa quirúrgica	Medilan Gmax 800	5-6 horas



- Fisioterapia**

Los equipos del área de fisioterapia cuentan con un horario de funcionamiento establecido de 8:00 a.m. a 4:00 p.m., siendo el periodo de mayor afluencia de 11:00 a.m. a 12:00 p.m. Los equipos utilizados en esta área se encuentran detallados en la tabla VI.

Tabla VI Equipos de fisioterapia		
Nombre	Modelo	Uso
Equipo de magnetoterapia	MagExpet	8am-4pm
Ultrasonido	Ultrareahb2	8am-4pm

- Emergencia**

En el área de emergencia no se dispone de un horario de uso definido para los equipos debido a la naturaleza impredecible de las actividades que allí se realizan. Dado que el uso de los equipos depende de la demanda inmediata de atención médica, no es posible establecer un patrón fijo de utilización. Los equipos presentes en esta área se detallan en la tabla VII.

Tabla VII Equipos de emergencia

Nombre	Modelo
Monitor	Philips Dsx700
Monitor	RESMED VPAP
Electrocardiógrafo	SE-12 EDAN
Cama eléctrica	HOPE-FULL
Monitor	Philips Dsx700
Monitor	RESMED VPAP
Electrocardiógrafo	SE-12 EDAN
Cama eléctrica	HOPE-FULL
Ecógrafo	Mindray DC-7



3.3 Mediciones y análisis de calidad de energía transformador 500kva y 75kva

Con la instalación del analizador de redes Fluke 435 Series II se obtuvieron los datos de las mediciones. Estas mediciones permitieron recolectar información detallada sobre diversos parámetros eléctricos, tales como voltaje, corriente, armónicos y fluctuaciones de voltaje, entre otros aspectos críticos para la evaluación de la calidad del suministro eléctrico. Posteriormente, se realizó un análisis integral de estos parámetros con el fin de identificar posibles desviaciones o anomalías en la calidad del producto eléctrico, las cuales podrían impactar el funcionamiento óptimo de los equipos electro-médicos conectados al sistema. esenciales para la atención médica

3.3.1 Materiales

Para la obtención de los parámetros electromagnéticos de la red eléctrica del hospital, se utilizó un analizador de redes Fluke 435 Series II, junto con su software Power Log 430 para asegurar un correcto análisis de los datos recolectados. Además, se empleó una pinza amperimétrica Truper Mut 202 para medir los valores de voltaje en distintos puntos del sistema eléctrico, lo que permitió complementar las mediciones y obtener una visión más detallada del comportamiento del suministro eléctrico en las instalaciones del hospital.

3.3.1.1 Fluke 435 Series II

En la figura 16 se observa el analizador Fluke 435 Series II, el cual fue instalado en el transformador de 500 kVA del hospital "San Luis" de Otavalo. Este dispositivo de alta gama permite medir simultáneamente múltiples parámetros eléctricos y presenta los resultados en formatos que facilitan la evaluación rápida del estado general de la calidad de la energía eléctrica. Además, genera un resumen en tiempo real que proporciona una visión general de una amplia gama de problemas relacionados con la calidad eléctrica, ayudando a identificar y resolver posibles anomalías de manera eficiente[36].



Fig.16. Analizadores de calidad eléctrica y energía Fluke 435 Series II [36].

3.3.1.2 Power Log 430

Power Log 430 es un software desarrollado para trabajar en conjunto con el analizador de calidad de energía Fluke 430. Este software permite transferir los datos registrados desde el analizador a una computadora, donde se pueden visualizar, analizar y generar informes detallados sobre la calidad de la energía. Además, facilita la creación de gráficos y tablas que ayudan a interpretar mejor los datos, lo que resulta útil para identificar y solucionar problemas eléctricos[36].

3.3.1.3 Pinza amperimétrica Truper Mut 202

La pinza amperimétrica Truper Mut 202 que se puede observar en la figura 17 nos permite medir corrientes alternas y continuas sin necesidad de interrumpir el circuito, lo que facilita la obtención de datos de manera segura y eficiente. Además, su diseño ergonómico y portátil lo hace ideal para su uso en campo, mientras que sus capacidades para medir voltaje, resistencia y continuidad la convierten en una herramienta versátil para el análisis integral de sistemas eléctricos[37].



Fig.17. Pinza amperimétrica MUT 202[37].

3.3.2 Perfil de voltaje

Como se puede observar en las figuras 18 y 19, los voltajes medidos están por debajo de los valores nominales de los transformadores (127V y 120V, respectivamente). Sin embargo, estos valores no incumplen con la regulación ARCERNR 002/20 (Codificada), ya que no se encuentran por debajo del margen permitido del 8%. Esto indica que, aunque los voltajes son inferiores a los nominales, se mantienen dentro de los límites aceptables establecidos por la normativa, asegurando así que la calidad del suministro eléctrico sigue cumpliendo con los estándares requeridos.

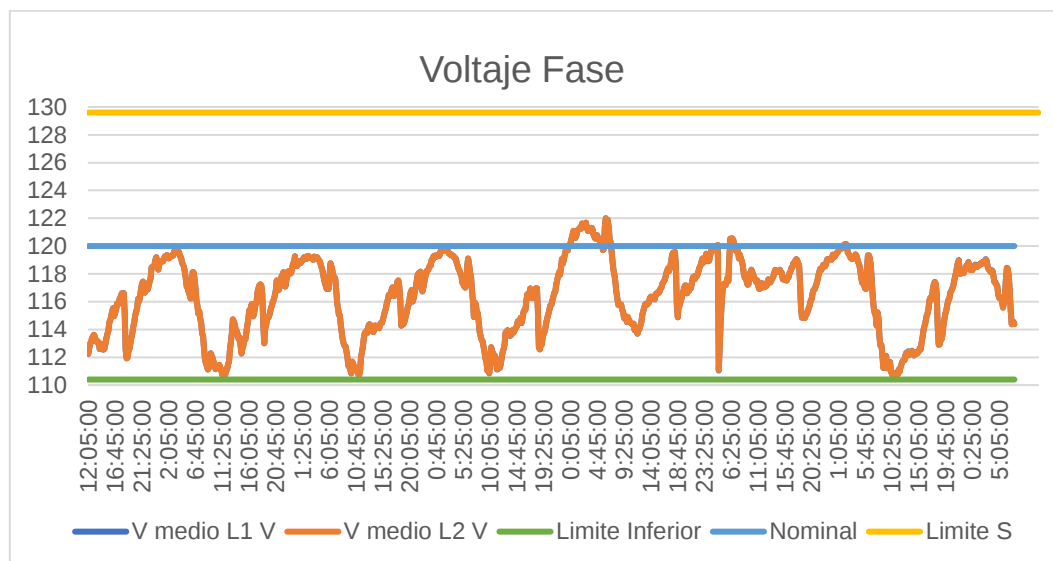


Fig.18. Voltaje Fase transformador 75kVA

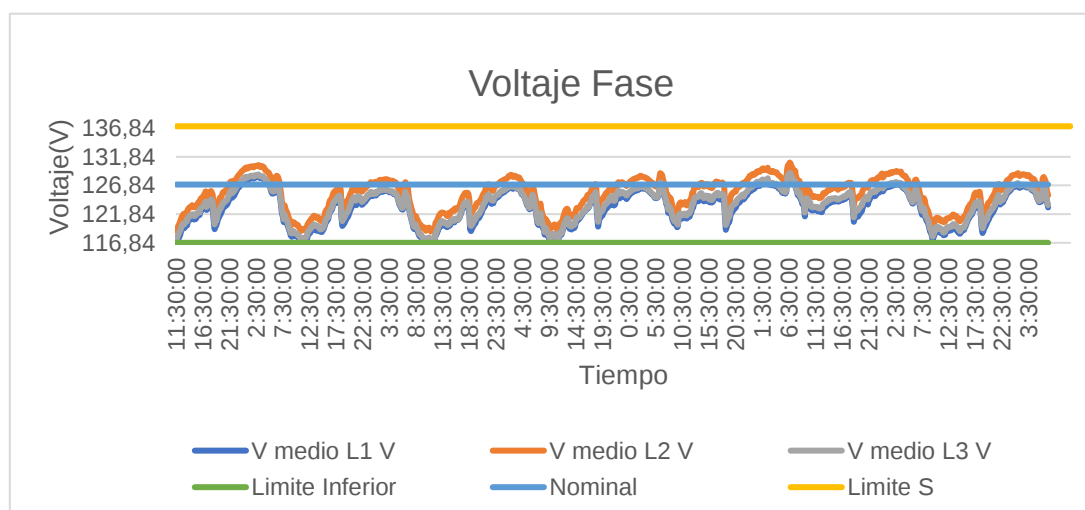


Fig.19. Voltaje Fase transformador 500kVA

3.3.3 Flicker

En la figura 20 se observa que hubo tres ocasiones en las que el flicker superó el límite establecido en la regulación ARCERNNR 002/20 (Codificada) en el transformador de 500 kVA. De manera similar, en la figura 21, se muestra que el flicker en el transformador de 75 kVA excedió el límite un total de ocho veces. Sin embargo, en ambos casos, estos valores no implican un incumplimiento de la regulación, ya que no se rebasaron los márgenes permisibles establecidos por la normativa. Esto indica que, aunque hubo fluctuaciones en el flicker, estas se mantuvieron dentro de los parámetros aceptables.

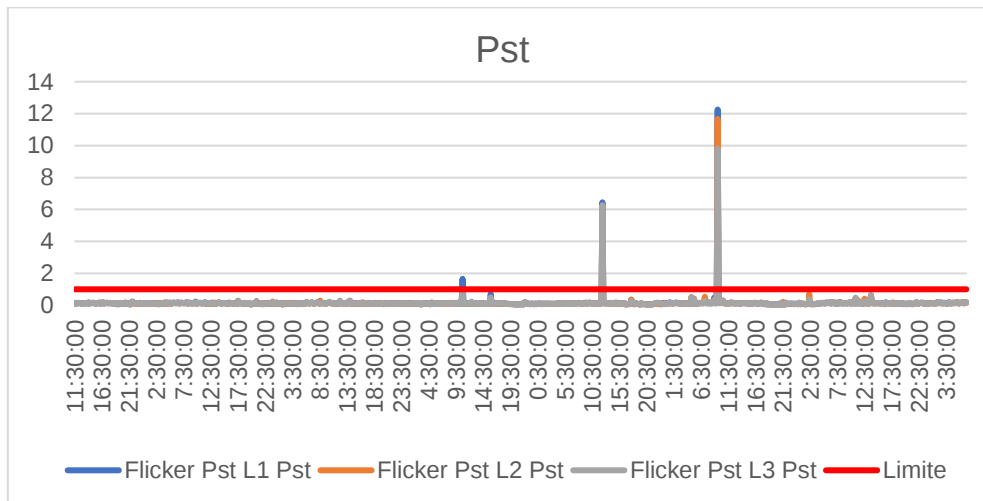


Fig.20. Flicker transformador 500kVA

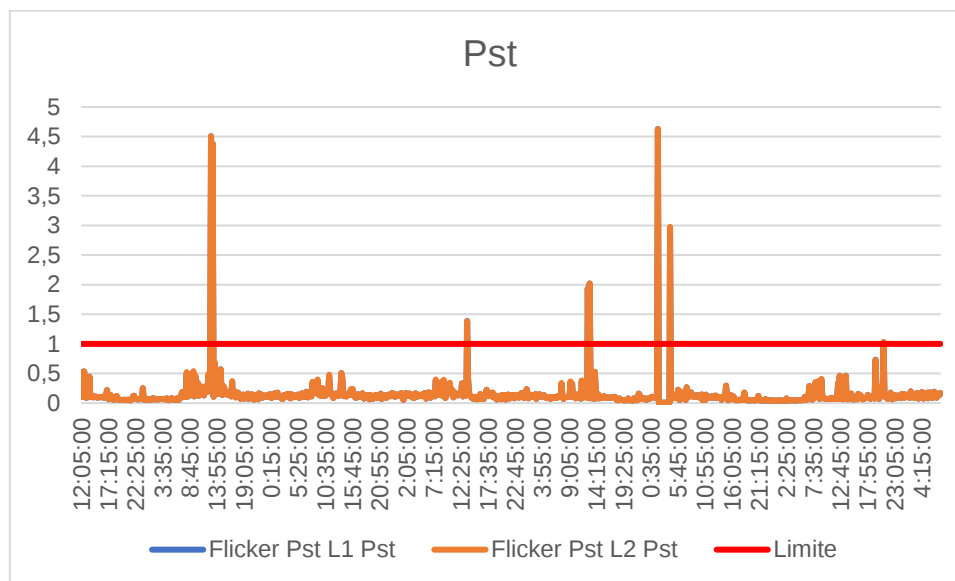


Fig.21. Flicker transformador 75kVA

3.3.4 THD Distorsión armónica total

En las figuras 22 y 23 se presenta la distorsión armónica total de voltaje (THD) de los transformadores de 500 kVA y 75 kVA, respectivamente. En ambos casos, se puede observar que los valores registrados están muy por debajo del límite del 8% estipulado por la regulación ARCERNR 002/20 (Codificada). Por lo tanto, se concluye que no existe una distorsión armónica significativa en el sistema, lo que indica un buen nivel de calidad de energía en cuanto a este parámetro.

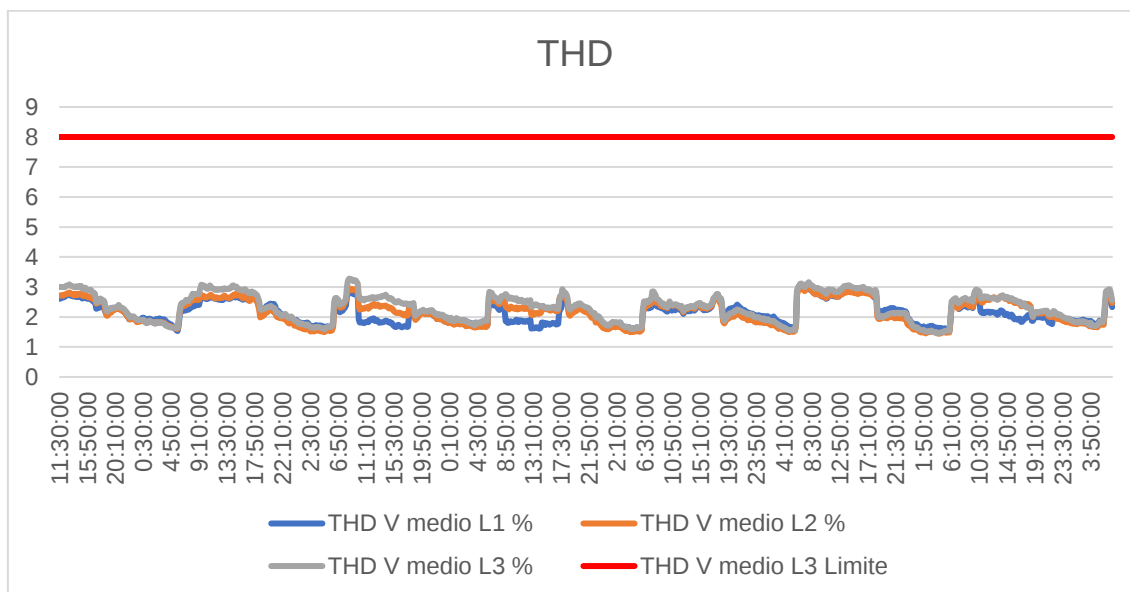


Fig.22. THD transformador 500kVA

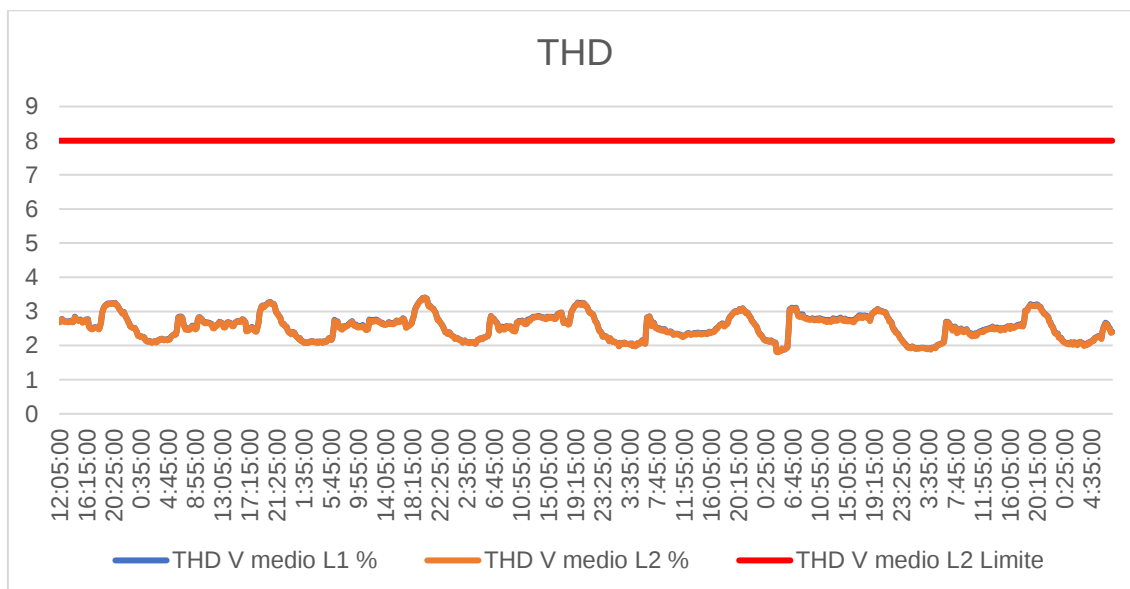


Fig.23. THD transformador 75kVA

3.3.3.1 Distorsión armónica individual

De igual manera, la distorsión armónica individual de tercer orden en ambos transformadores está por debajo del límite del 5% estipulado en la regulación, como se observa en las figuras 24 y 25. Sin embargo, es evidente que los armónicos asociados al equipo de rayos X presentan valores más elevados debido al impacto que este equipo tiene en el sistema eléctrico, lo que genera mayores niveles de distorsión en comparación con otros equipos. Esto destaca la influencia de la máquina de rayos X en la calidad de la energía, especialmente en lo relacionado con los armónicos.

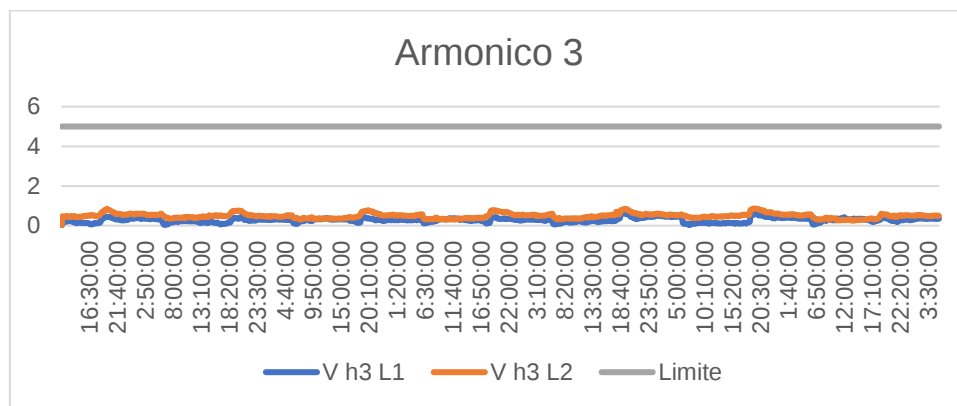


Fig.24. Armónico 3 transformador 500kVA

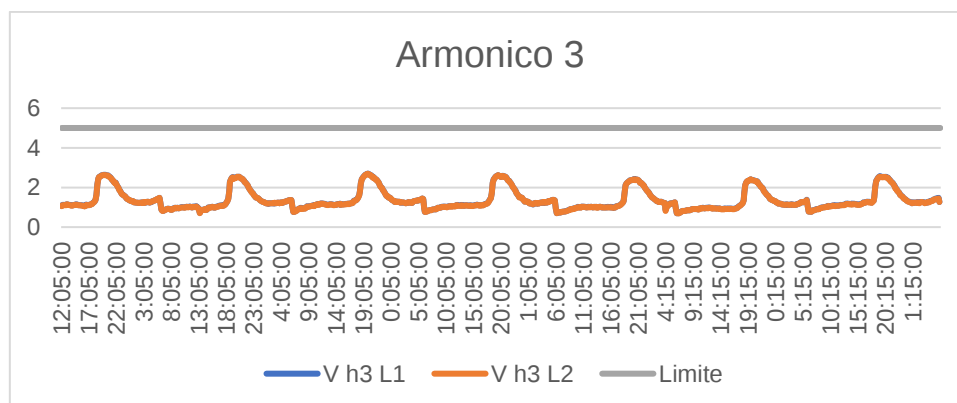


Fig.25. Armónico 3 transformador 75kVA

3.3.5 Desequilibrio de voltaje

En la figura 26 se puede observar el desequilibrio de voltaje del transformador de 500 kVA, el cual no excede el límite del 2%, conforme a lo estipulado en la regulación ARCERNR 002/20. Por lo tanto, no se detecta ningún incumplimiento de la normativa en relación con el desequilibrio de voltaje.

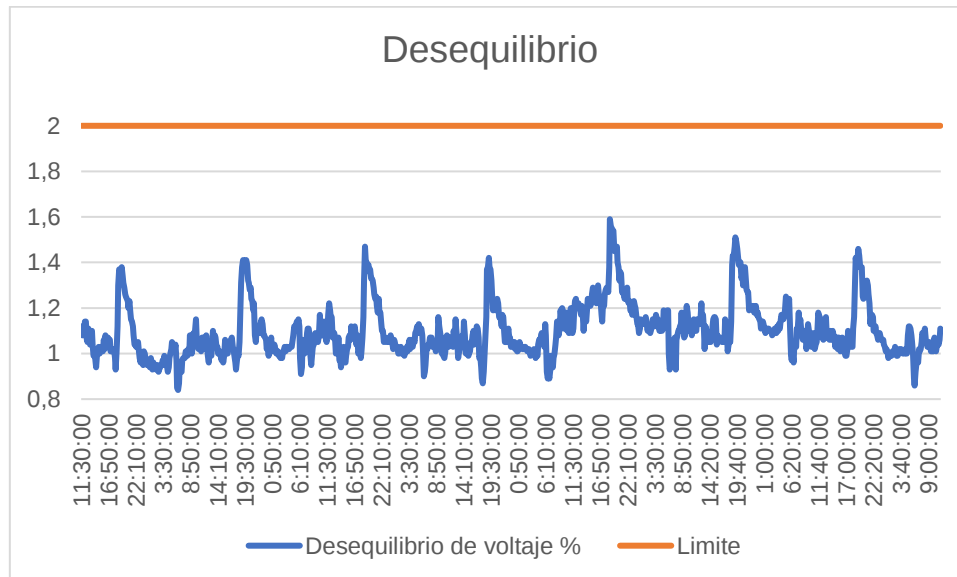


Fig.26. Desequilibrio de voltaje transformador 500kVA

3.3.6 Eventos de voltaje

Como se puede observar en la figura 27, las flechas verdes en el gráfico indican eventos de caída de voltaje (sags) registrados durante el periodo de medición. Estos sags representan interrupciones o reducciones significativas de el voltaje por debajo de los valores nominales. Se detectaron varios eventos de este tipo con diferentes duraciones, la mayoría con un voltaje residual del 5% o superior.

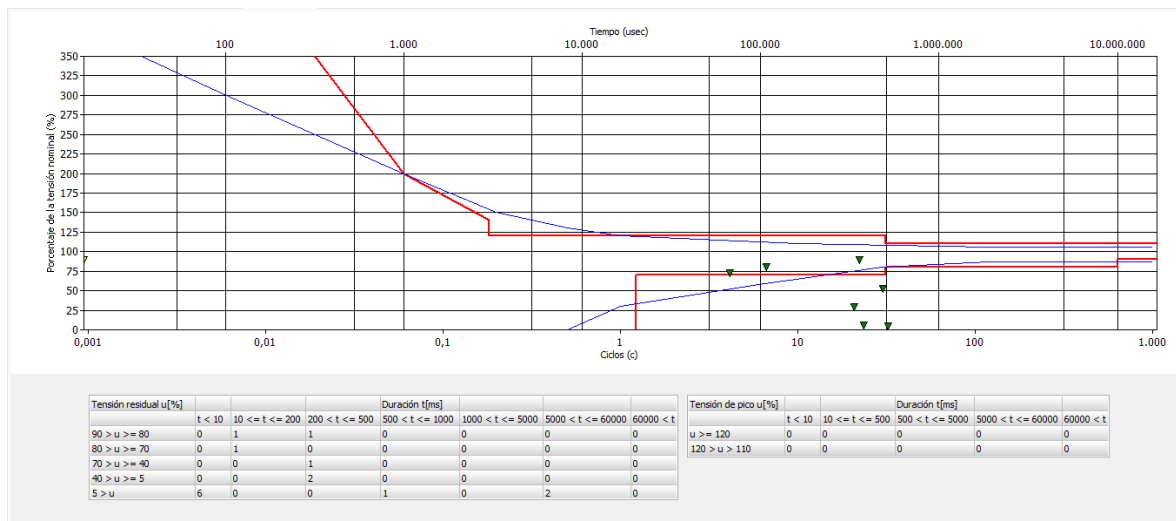


Fig.27. Huecos y picos transformador de 500kVA

3.3.5.1 Huecos

Durante el periodo de medición, se registraron un total de 7 eventos de huecos de voltaje como se muestra en la tabla VIII. De estos, se consideraron para su análisis aquellos que presentaron una caída de voltaje superior al 15% del voltaje.

Tabla VIII Huecos de voltaje

Evento	Fecha	Hora	Duración(ms)	Voltaje Medio
1	12/7/2024	10:38	49	101,09
2	13/7/2024	12:11	469	67,23
3	13/7/2024	12:12	233	108,13
4	14/7/2024	9:23	553	54,175
5	14/7/2024	9:24	397	92,28
6	14/7/2024	9:28	325	33,19
7	15/7/2024	13:37	470	113,29



- **Evento 1**

El evento que se puede observar en la figura 28 registrado el 12/07/2024 a las 10:38:12 muestra un hueco de voltaje con una duración de 49 ms y una caída de voltaje a 92.42 V, lo cual representa una disminución aproximada del 27% respecto al voltaje nominal de 127 V. Esta caída significativa puede afectar seriamente a los equipos hospitalarios sensibles, los cuales suelen requerir una estabilidad de voltaje dentro de un margen del 10%

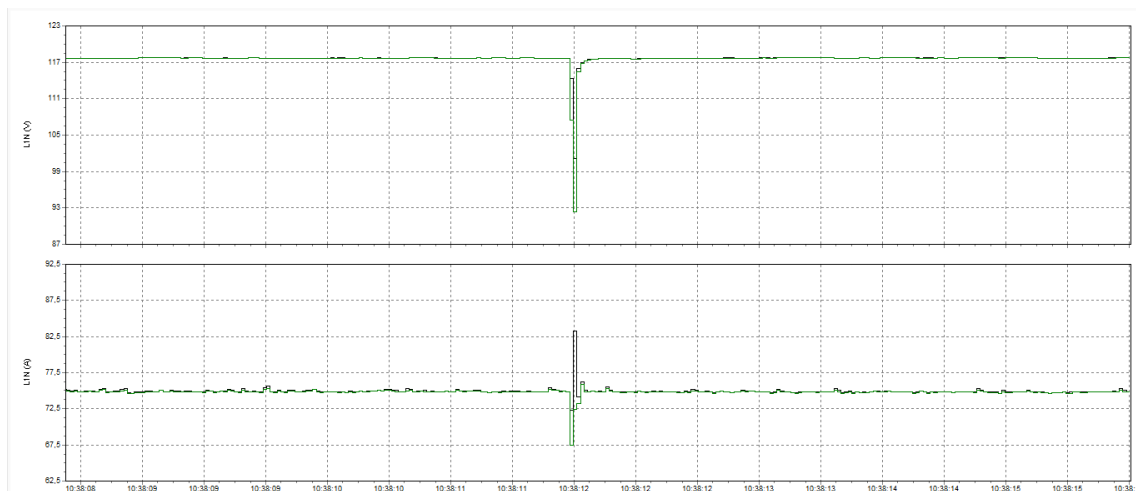


Fig.28. Evento de voltaje 1

- **Evento 2**

El segundo evento que se observa en la figura 29, ocurrido el 13/07/2024 a las 10:11:41, tuvo una duración de 469 ms y registró un mínimo de voltaje de 67.23 V, lo que representa una caída de aproximadamente el 47% respecto al voltaje nominal de 127 V. Esta duración, más larga que la del primer evento, y la profundidad de la caída representan un riesgo aún mayor para los equipos hospitalarios, ya que una interrupción de 469 ms puede ser suficiente para apagar o reiniciar dispositivos críticos.

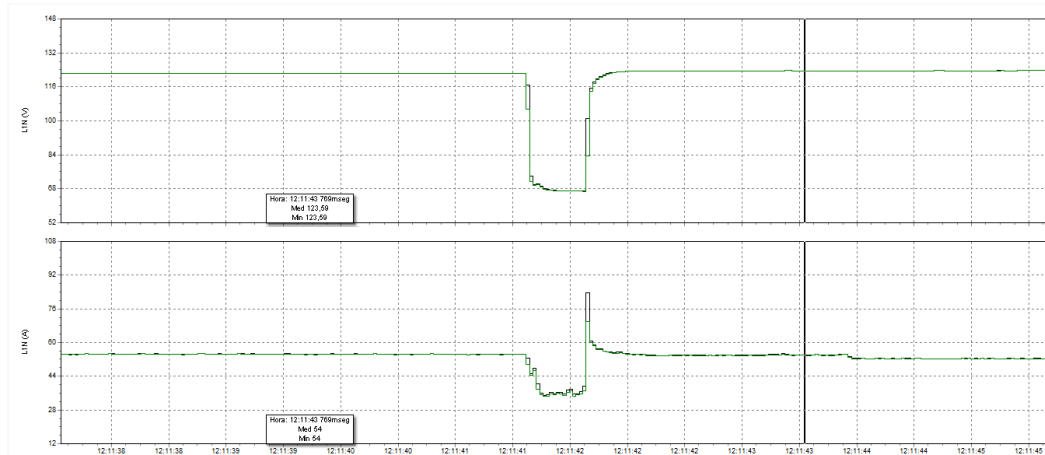


Fig.29. Evento de voltaje 2

- **Evento 4**

En la figura 30 se puede observar el evento 4 que ocurrió el 14/07/2024 a las 9:23:03, con una duración de 553 ms y un voltaje medio de 54.175 V. Esta caída representa aproximadamente un 57% por debajo del voltaje nominal de 127 V, lo que es muy significativo y puede provocar fallos inmediatos en equipos sensibles. La duración de más de medio segundo aumenta el riesgo de reinicios y fallos operativos en dispositivos críticos.

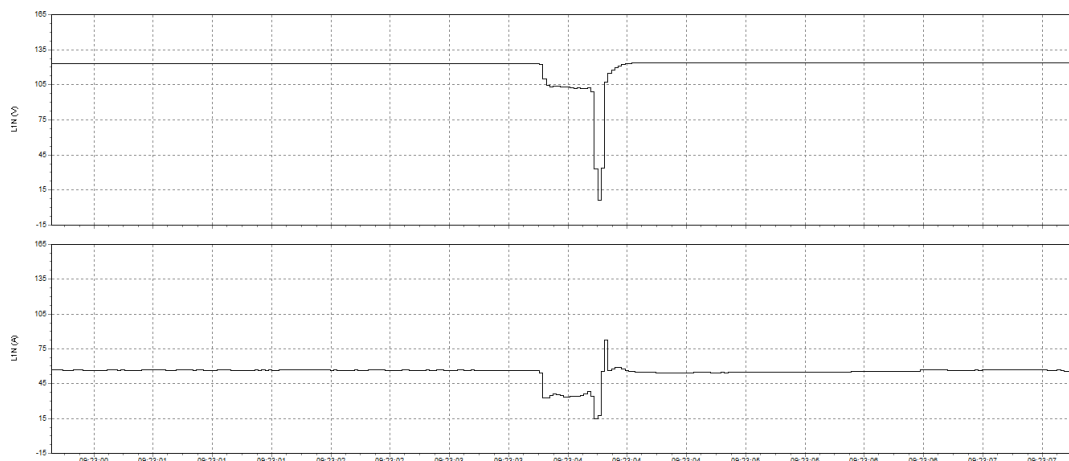


Fig.30. Evento de voltaje 4



- **Evento 5**

En la figura 31 se detalla el evento 5 registrado el mismo día, a las 9:24:16, con una duración de 397 ms y un voltaje mínimo de 92.28 V. Aunque este evento es más breve, la caída a 92.28 V un 27% por debajo del nominal.

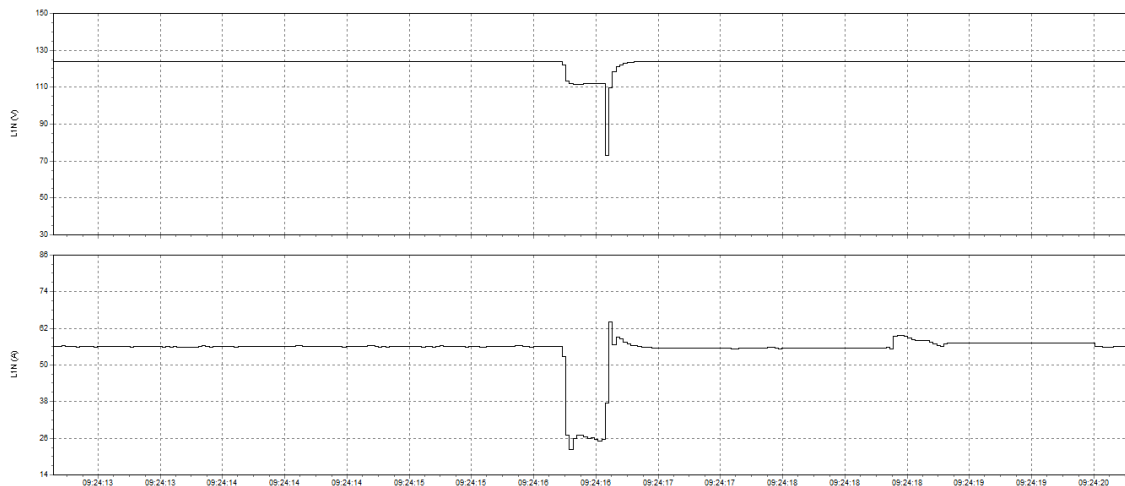


Fig.31. Evento de voltaje 5

- **Evento 6**

Ocurrió el 14/07/2024 a las 9:28:10, con una duración de 325 ms y un voltaje de 33.19 V, lo que representa una caída extrema de aproximadamente un 74% por debajo del nominal. Esta caída es crítica ya que podría provocar apagados o daños en equipos, ya que el voltaje es insuficiente para mantener la mayoría de los dispositivos operativos. La duración de 325 ms también refuerza el riesgo de daño permanente en componentes electrónicos.

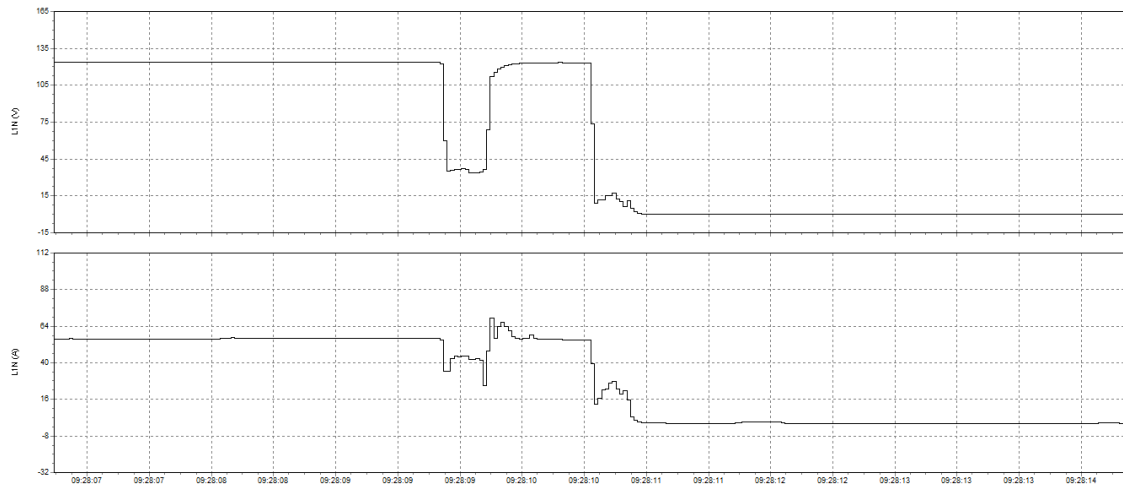


Fig.32. Evento de voltaje 6

3.3.5.2 Causas sags

Los huecos de voltaje (sags) detectados en el Hospital “San Luis” pueden atribuirse a diversas causas técnicas, entre las que se destacan el arranque abrupto de cargas inductivas pesadas (por ejemplo, calefactores eléctricos), que generan demandas súbitas de corriente y caídas transitorias de voltaje; fallas temporales en la red de distribución, como cortocircuitos monofásicos o fluctuaciones por condiciones climáticas adversas; conmutaciones bruscas en equipos de alta potencia sin sistemas de suavizado; deficiencias en la infraestructura eléctrica (cables subdimensionados, conexiones flojas o degradación de componentes); y sobrecargas en zonas de la red con capacidad limitada para gestionar picos de demanda. Es importante resaltar que, al no encontrarse un patrón en los horarios de los huecos registrados, es posible que los sags se deban más a motivos exteriores de la red del hospital, lo que sugiere una incidencia más vinculada a factores externos que al funcionamiento interno del equipamiento.

3.3.7 Cargabilidad

La Figura 33 muestra la cargabilidad del transformador de 500 kVA, evidenciando un sobredimensionamiento significativo al operar con una carga máxima registrada de 52,95



kVA. Este valor representa únicamente el 10,59% de su capacidad nominal, lo que sugiere una subutilización del equipo en las condiciones actuales del sistema.

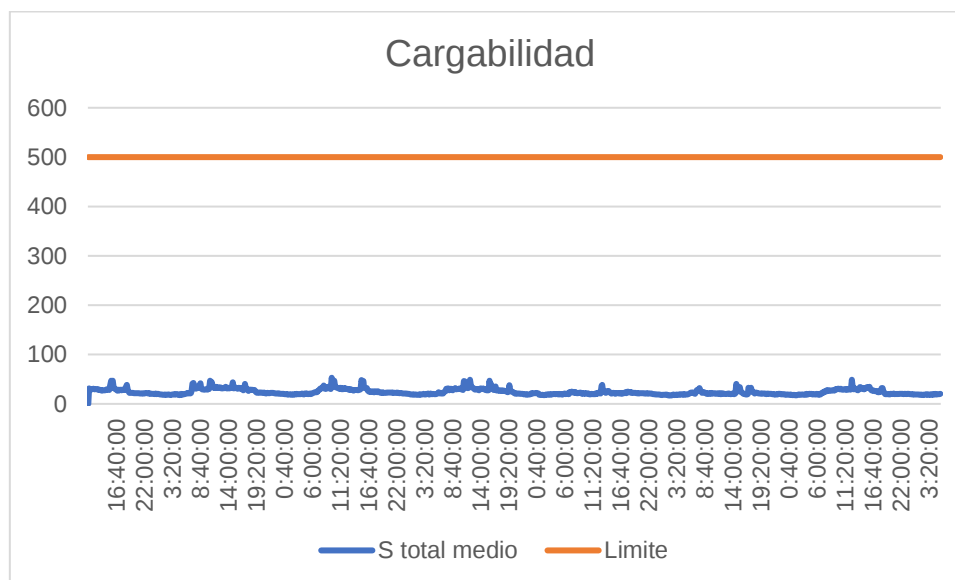


Fig.33. Cargabilidad transformador de 500kVA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



CAPITULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentarán los métodos diseñados para mitigar las caídas de voltaje y se propondrán las soluciones más adecuadas para eliminarlas en la red eléctrica que alimenta los equipos electro-médicos del Hospital San Luis de Otavalo.

4.1 Métodos para la mitigación de huecos de voltaje

Existen diversos métodos para mitigar los huecos de voltaje en sistemas eléctricos, cada uno con características específicas que los hacen más o menos adecuados según el entorno. Se detallarán las principales estrategias disponibles, evaluando sus ventajas, desventajas y aplicabilidad.

4.1.1 Volante de Inercia

La integración de un volante de inercia con un grupo motor-generator ofrece protección a los procesos críticos frente a caídas de voltaje. En este sistema, el motor-generator utiliza la energía de la red eléctrica para impulsar el rotor del volante de inercia. La energía cinética acumulada en el rotor se convierte en corriente continua mediante el generador, para luego ser entregada con una frecuencia y voltaje constantes gracias a un inversor y un sistema de control.

4.1.2 SAI Estático con Almacenamiento Mínimo de Energía

Estos dispositivos están diseñados para suministrar energía durante un corto período de tiempo, mientras persiste la perturbación. También se les conoce como acondicionadores. Durante una interrupción, la energía se proporciona mediante una batería y un convertidor de corriente continua a corriente alterna (CC/CA). Cuando el objetivo es proteger únicamente contra caídas de voltaje (sags), el almacenamiento de energía puede gestionarse de manera eficiente utilizando únicamente un condensador.

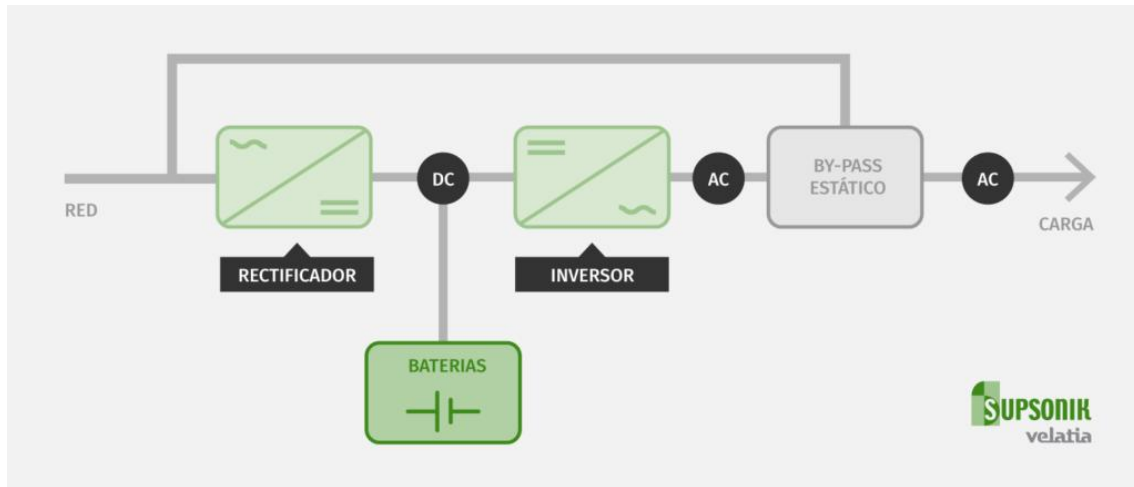


Fig.34. SAI estático [38]

4.1.3 Restaurador Dinámico de voltaje (DVR)

Por medio de un transformador conectado en serie, el DVR (Dynamic Voltage Restorer) se encarga de compensar el voltaje faltante, permitiendo que la carga permanezca conectada a la red. Este equipo de compensación detecta y corrige las deficiencias en la onda de voltaje.

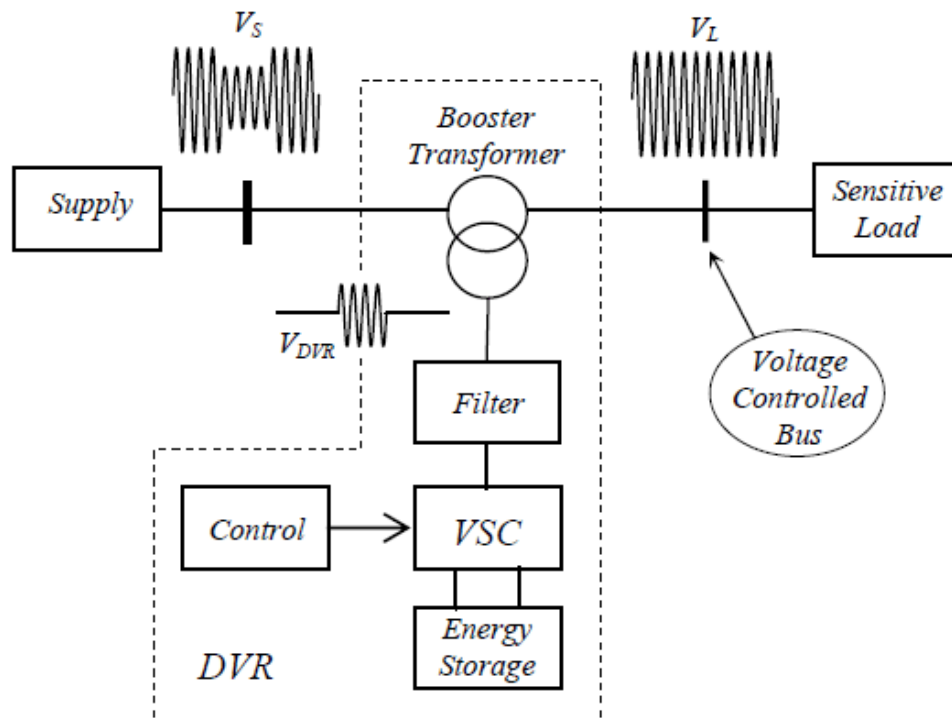


Fig.35. Restaurador Dinámico de voltaje (DVR)[39]

4.1.3.1 Red eléctrica (DVR-1)

Estos dispositivos están conectados de forma continua a la red y no cuentan con un sistema de almacenamiento de energía. En este caso, la energía para corregir el voltaje se extrae directamente de la red de alimentación mediante un aumento en la corriente.

4.1.3.2 Unidad adicional de almacenamiento de energía (DVR-2)

Estos sistemas se emplean principalmente para grandes cargas y, a diferencia del DVR-1, cuentan con unidades de almacenamiento de energía. La capacidad para restaurar el voltaje depende directamente de las características de la carga. Aunque los capacitores poseen una baja densidad de almacenamiento energético, tienen la ventaja de recargarse de manera eficiente y continua. [4]

4.1.3 Statcom

El Statcom (Compensador Estático de Var) se utiliza para mitigar caídas de voltaje (sags) mediante la inyección de potencia reactiva. Para optimizar su desempeño, a menudo se integran unidades de almacenamiento de energía, como un sistema de almacenamiento magnético superconductor. Este dispositivo opera a través de un inyector de corriente conectado en paralelo con la carga.

4.1.4 Superconductor de almacenamiento de energía (SMES)

El almacenamiento de energía en una bobina con propiedades superconductoras permite controlar el voltaje durante la ocurrencia de caídas (sags). Esto se logra mediante descargas a través de la bobina de conmutación y el equipamiento asociado. Para garantizar el estado de superconductividad de la bobina, es esencial disponer de sistemas de refrigeración adecuados que mantengan las condiciones necesarias para su funcionamiento.

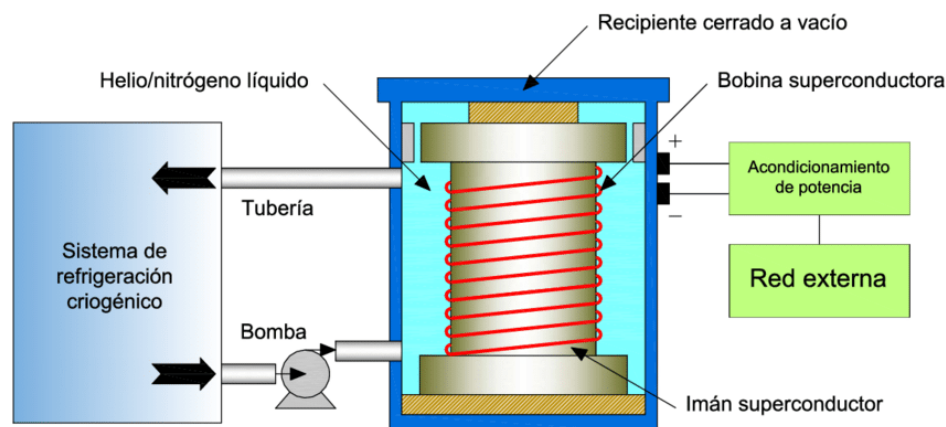


Fig.36. Esquema sistema de almacenamiento SMES[40]

4.1.5 Compressed Air Energy Storage (CAES)

El almacenamiento de energía se realiza utilizando aire a presión, que se presuriza mediante un compresor. Posteriormente, el aire comprimido se libera desde el depósito a través de una turbina, generando energía. En ciertos casos, se puede emplear gas natural o combustible como fuentes adicionales de energía. Este método de mitigación de caídas

de voltaje (sags) es común en entornos como minas de roca dura o salares cavernosos, donde es posible disponer de depósitos de aire extensos. Para sistemas más pequeños, el aire puede almacenarse en tanques presurizados.

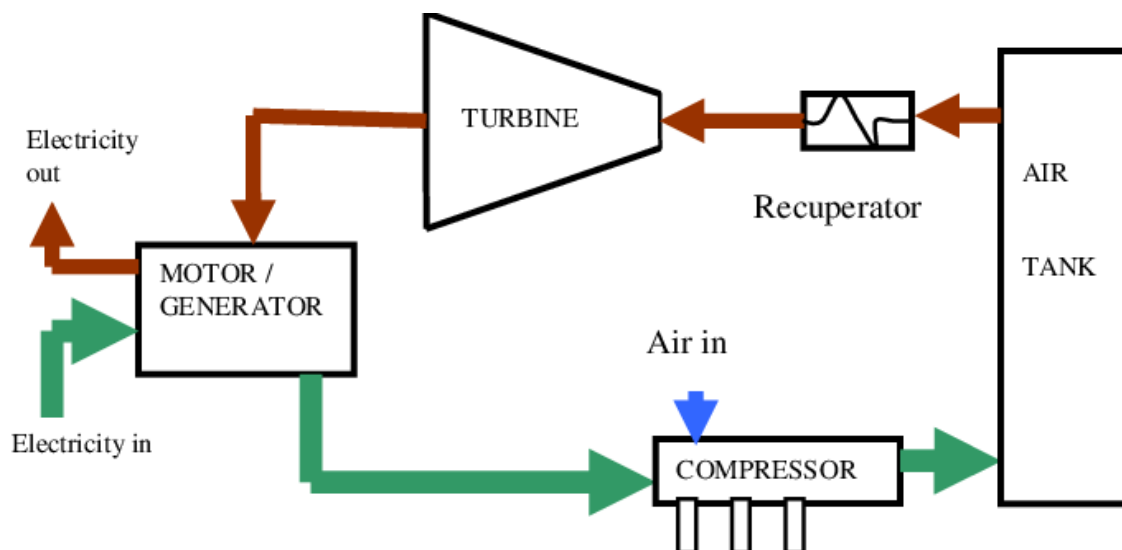


Fig.37. Diagrama sistema de almacenamiento CAES[41]

4.1.6 Corrector Dinámico (DySC)

Este sistema permite realizar correcciones de voltaje de hasta el 50% del voltaje nominal durante un período de 3 a 12 ciclos. Al detectar problemas de voltaje bajo, inyecta un voltaje en serie para corregir la anomalía. Está diseñado principalmente para la industria de los semiconductores y está disponible en capacidades normalizadas que van desde 1.5 kVA hasta 2000 kVA.

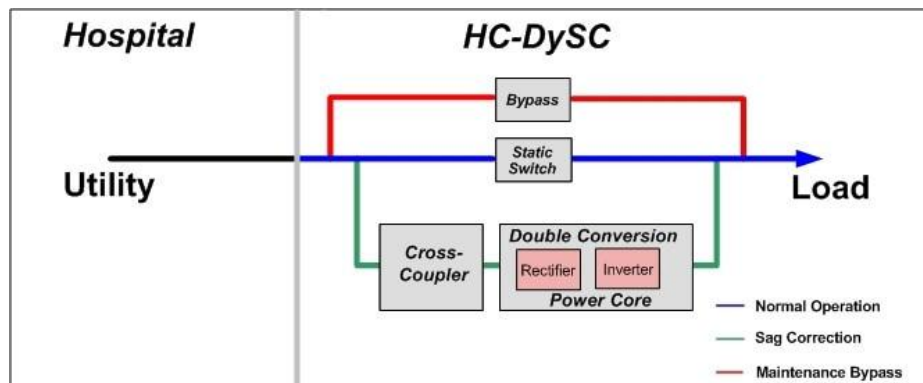


Fig.38. Diagrama corrector dinámico [42]

4.2 Selección de métodos

Para seleccionar el método más adecuado para la mitigación de sags, se empleará una matriz de decisión multicriterio. Esta herramienta permitirá comparar las diferentes opciones considerando los siguientes criterios clave priorizando la importancia para el hospital:

Costo inicial 30% (C): Precio de implementación del método.

Eficiencia 25 % (E): Capacidad para mitigar sags.

Tiempo de reacción 20% (TR): Velocidad de respuesta ante sags.

Mantenimiento 15% (M): Frecuencia y costo asociado.

Espacio requerido 5% (ER): Factores físicos para la instalación.

Impacto en la calidad de energía 5%(ICE): Posibles armónicos u otros problemas.

Asignando una calificación del 1 al 5 según el nivel de cumplimiento de cada criterio y multiplicándola por el peso asignado a dicho criterio, se determinaron los métodos más efectivos para la mitigación de sags. Los resultados de este análisis se presentan en la tabla IX.

Tabla IX Matriz de decisión

Método	Costo inicial C 30%	Eficiencia E 25%	Tiempo de reacción Tr 20%	Mantenimiento M 15%	Espacio requerido ER 5%	ICE 5%	Puntuación Total
Volante de inercia	3 (0.9)	4 (1)	4 (0.8)	2 (0.45)	3 (0.2)	4 (0.2)	3.55
SAI Estático con Almacenamiento Mínimo de Energía	4 (1.2)	4 (1)	5 (1)	4 (0.45)	5 (0.25)	4 (0.2)	4.1
Restaurador Dinámico de Tensión (DVR)	3 (0.9)	4 (1)	4 (0.8)	4 (0.60)	4 (0.2)	4 (0.2)	3.7
Statcom	4 (1.2)	4 (1)	4 (0.8)	3 (0.45)	4 (0.2)	4 (0.2)	3.85
Superconductor de almacenamiento de energía (SMES)	3 (0.9)	5 (1.25)	5 (1)	2 (0.30)	3 (0.15)	5 (0.25)	3.85
Compressed Air Energy Storage (CAES)	3 (0.9)	4 (1)	4 (0.8)	3 (0.45)	4 (0.2)	4 (0.2)	3.55
Corrector Dinámico (DySC)	4 (1.2)	4 (1)	4 (0.8)	5 (0.75)	5 (0.2)	3 (0.2)	4.15

Para mitigar los huecos de voltaje en el Hospital “San Luis” de Otavalo, se han identificado como las opciones más adecuadas el Corrector Dinámico (DYSC) y el SAI Estático con Almacenamiento Mínimo de Energía.



4.3 Corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S

El corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P, funciona detectando caídas de voltaje en milisegundos y compensando el voltaje perdido mediante un inversor integrado que entrega la energía necesaria para mantener un suministro estable. Este proceso asegura que los dispositivos conectados sigan funcionando dentro de los límites seguros.



Fig.39. Corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S

Se ha seleccionado este modelo debido a que sus características técnicas cumplen con los requisitos esenciales para satisfacer las necesidades de la red eléctrica del hospital. Los detalles que respaldan esta decisión se encuentran en la tabla X.



Tabla X Características generales Allen-Bradley 1608P-200A208V4S.[43]

Corriente nominal	200 A
Voltaje de línea	208V
Configuración de cableado	Trifásico, 4 hilos
Tiempo de corrección de caídas de voltaje	5 s (87% - 50% de voltaje restante); 50 ms (caídas a 0 V)
Rango de voltaje de entrada	±10%
Frecuencia	50/60 Hz (detección automática)
Respuesta de corrección	Detección: 0.7 ms; Reacción del inversor: 1.2 ms (total < 2 ms)
Rendimiento	>99% a 208 V
Voltaje de salida	Igual al voltaje RMS antes de la caída
Regulación de voltaje	+/- 5% típico
Factor de cresta	1.45
Factor de potencia de la carga	-0.5 a +0.9

4.3.1 Instalación corrector dinámico de voltaje

Para la instalación del equipo se utilizará un conductor calibre 3/0 AWG para soportar el amperaje necesario y seguir el diagrama mostrado en la figura 40. Este diagrama incluye los siguientes componentes clave:

- **Breaker CB:** Actúa como el breaker principal.
- **Breaker CBI:** Controla el flujo de corriente hacia el Corrector Dinámico de Voltaje.
- **Breaker CBO:** Regula el flujo de corriente desde el Corrector Dinámico hacia la carga.
- **Breaker CBB:** Permite un bypass entre la fuente de energía y la carga, evitando el Corrector Dinámico durante operaciones de mantenimiento o en caso de fallas.

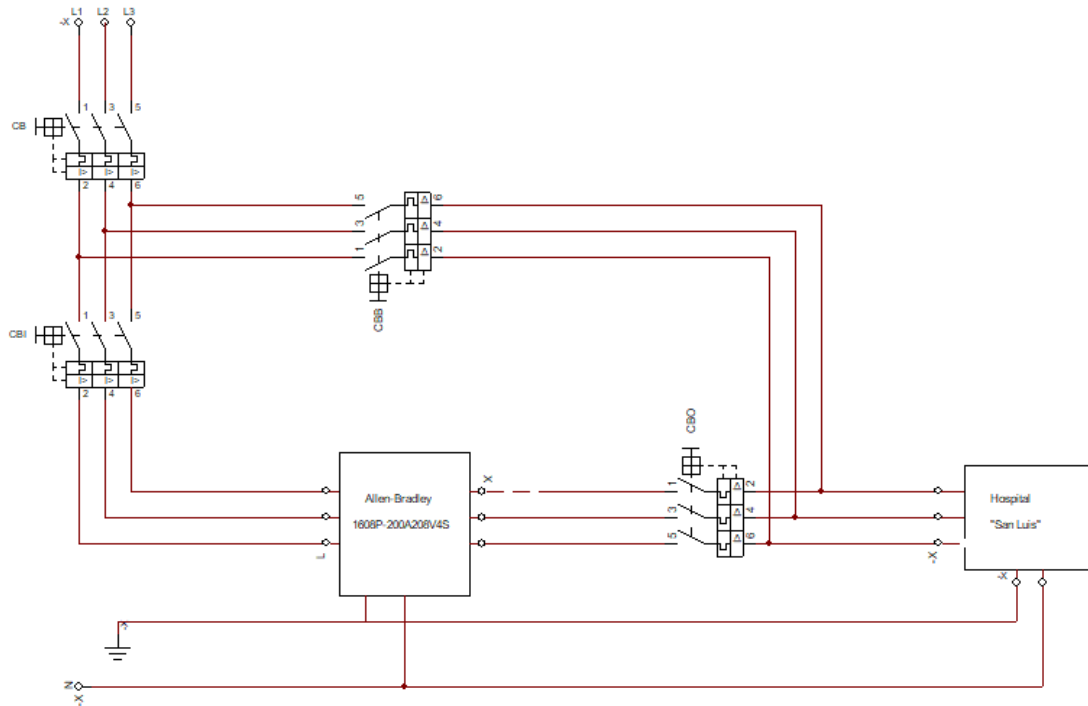


Fig.40. Diagrama de conexiones Corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S

4.4 SAI SLC-80-CUBE3+ B1 A

El Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) **SLC-80-CUBE3+ B1** se posiciona como una de las mejores opciones para su uso en el ámbito hospitalario. Este equipo destaca por su fácil instalación, su capacidad para expandirse según las necesidades futuras y la protección eficaz que ofrece frente a las caídas de voltaje presentes en la red eléctrica.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**



Fig.41. SLC-80-CUBE3+ B1 A

Este equipo cuenta con una capacidad de 80 kVA, suficiente para cubrir la carga del hospital, baterías de Plomo ácido, selladas, libres de mantenimiento con una regulación de carga Batt-Watch. Sus dimensiones de $850 \times 1305 \times 1905$ mm garantizan que no ocupará un espacio significativo. Las características técnicas principales se detallan en la tabla XI.

Tabla XI Características técnicas SLC-80-CUBE3+ B1 A[44]

ENTRADA	Tensión nominal	Monofásica 115 / 120 / 127 / 133 V(1) / Trifásica 3 × 200 / 3 × 208 / 3 × 220 / 3 × 230 (3F + N)
	Margen de tensión	+15% / -20% (configurable)
	Frecuencia nominal	50 / 60 Hz
	Distorsión Armónica Total (THDi) 1	100% carga: <1,5% / 50% carga: <2,5% / 10% carga: <6,0%
	Factor de potencia	1 a partir de 10% de carga
	Topología rectificador T	Trifásico IGBT onda completa, arranque suave y PFC, sin transformador
SALIDA	Factor de potencia	0.9
	Tensión nominal	Monofásica 115 / 120 / 127 / 133 V(1) / Trifásica 3 × 200 / 3 × 208 / 3 × 220 / 3 × 230 (3F + N)
	Precisión dinámica	±2% dinámico
	Precisión estática	±1% estático
	Precisión tiempo de respuesta	20 ms para saltos de carga 0%÷100% y caída de tensión hasta -5%
	Distorsión armónica total (THDv)	<0,5% carga lineal / <1,5% (EN-62040-3) carga no lineal
	Frecuencia Sincronizada	50/60 Hz ±5 Hz (seleccionable)
	Frecuencia Con red ausente	50/60 Hz ±0,05%
	Velocidad de sincronismo	De 1 Hz/s a 10 Hz/s (programable)
	Rendimiento total modo On-line 5	5÷30 kVA: 90%÷92% / 40÷100 kVA: 92%÷93%
	Rendimiento Smart Eco-mode	Hasta 98,4%
	Sobrecarga admisible	125% durante 10 min / 150% durante 60 s / >150% durante 20ms
	Factor de cresta	>3:1
BYPASS MANUAL	Tipo	Sin interrupción
BYPASS ESTATICO	Tipo y criterio activación	De estado sólido
	Tiempo de transferencia modo Smart Eco-mode (ms)	4 ms (típico)
	Tiempo de transferencia modo On-line	Nulo
	Transferencia a bypass	Inmediato, para sobrecargas superiores a 150%
	Re transferencia	Automático, después de desaparición de alarma



4.4.1 Instalación SAI

Para la conexión del SAI, se deben conectar los cables de alimentación **R-S-T-N** a los bornes de entrada **(X1)**, **(X2)**, **(X3)** y **(X4)**, respetando el orden de las fases y el neutro indicado en el etiquetado. Al tratarse de un equipo con protección contra choques eléctricos de clase I, se debe conectar un conductor de tierra al borne **(X5)**. En cuanto al bypass, los cables **R-S-T-N** se conectan a los bornes **(X14)**, **(X15)**, **(X16)** y **(X17)**, mientras que las cargas deben conectarse a los bornes de salida **U-V-W-N**: **(X6)**, **(X7)**, **(X8)** y **(X9)**. Para vincular el SAI con el armario de baterías, se utiliza la manguera de cables suministrada, conectando un extremo a los bornes del SAI **(X11)**, **(X23)**, **(X12)** y **(X10)**, y el otro extremo a los bornes del módulo de baterías **(X47)**, **(X49)**, **(X48)** y **(X10)**, respetando la polaridad indicada[45].

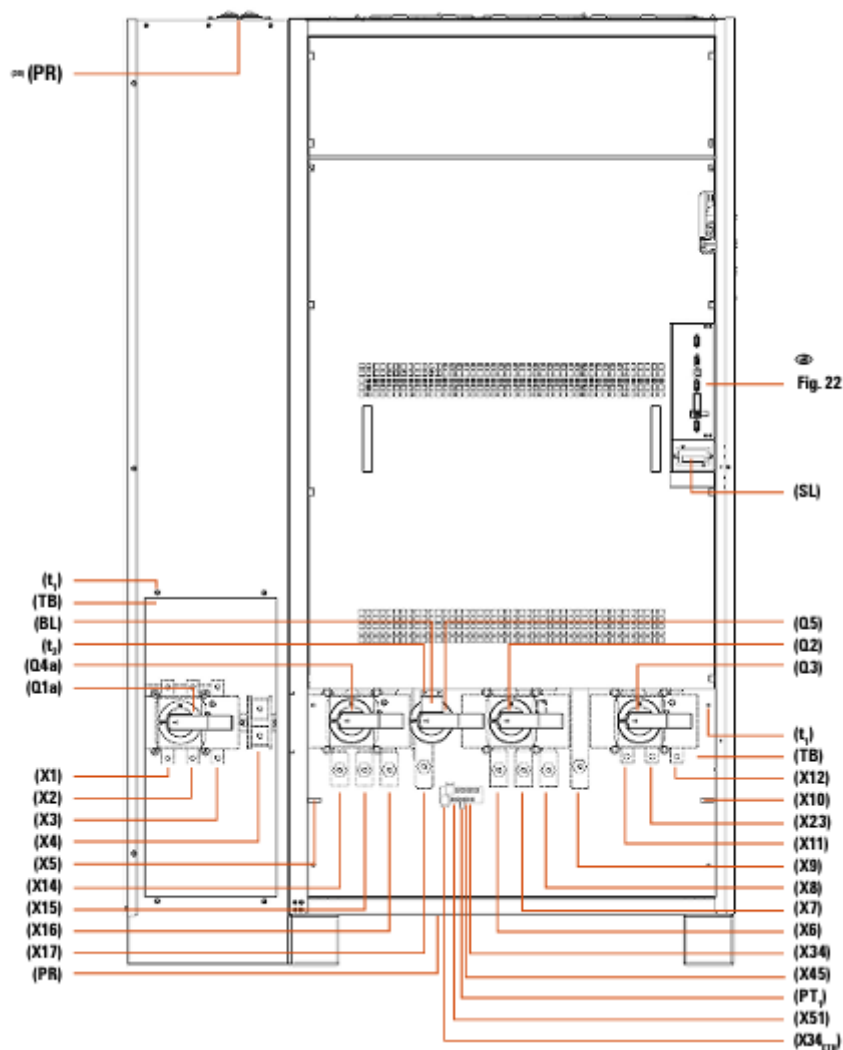


Fig.42. Vista frontal SAI SLC-80-CUBE3+ B1 con puertas abiertas[45].

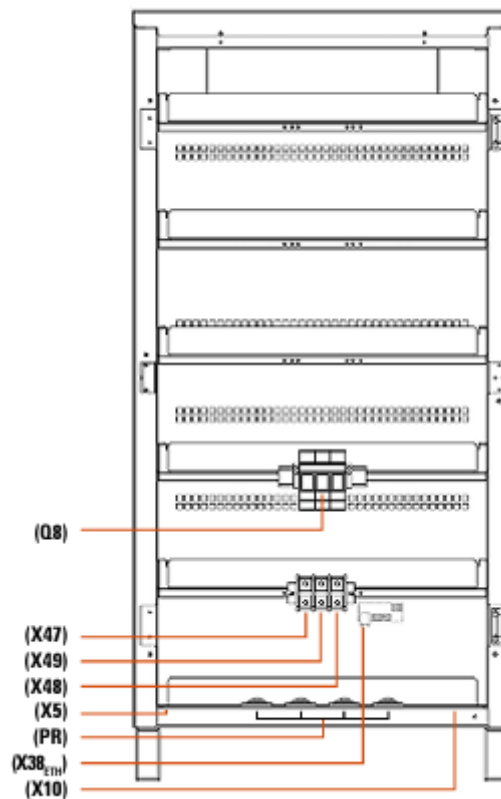


Fig.43. Vista frontal puertas abiertas armario de baterías[45].

4.5 Comparativa de tecnologías

Dos de las tecnologías más utilizadas en estos escenarios son los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI) y los Correctores Dinámicos de Voltaje (CDV). Por un lado, el SAI SLC-80-CUBE3+ B1 A destaca por su capacidad de respaldo energético ante cortes prolongados, asegurando una alimentación continua gracias a sus baterías internas. Por otro lado, el Corrector Dinámico de Voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S se especializa en corregir caídas momentáneas de voltaje en milisegundos, protegiendo equipos electrónicos sensibles frente a perturbaciones breves en la red.



Esta comparación analizará las características, ventajas y aplicaciones de ambos dispositivos, considerando sus especificaciones técnicas y cómo cada uno se adapta a diferentes necesidades en sistemas eléctricos críticos.

Tabla XII Comparativa de tecnologías

Aspecto	SAI SLC-80-CUBE3+ B1 A	Corrector Dinámico de Voltaje 1608P-200A208V4S
Función principal	Proporciona respaldo energético en cortes de suministro prolongados.	Corrige caídas momentáneas de voltaje (sags) en milisegundos.
Tecnología	On-line doble conversión (VFI), con baterías internas.	Electrónica de potencia con inversor integrado.
Rango de protección	Cortes prolongados, variaciones de frecuencia y fluctuaciones de voltaje.	Caídas de voltaje entre 50% y 87% del valor nominal (5 segundos de duración).
Capacidad de carga	80 kVA / 72 kW (potencia nominal).	200 A, 208 V (trifásico, 4 hilos).
Rendimiento energético	Hasta 95% en modo On-line y 98,4% en modo ECO.	>99% durante operación normal.
Tiempo de respuesta	Milisegundos, depende de la transición entre red y baterías.	<2 ms para corregir caídas de voltaje.
Autonomía	Dependiente de las baterías internas (normalmente de minutos a horas, según la carga).	No tiene baterías, se basa en su inversor interno
Tipo de protección	Respaldo completo (continuidad de suministro eléctrico).	Corrección de voltaje para evitar reinicios de equipos.
Instalación	Requiere un espacio mayor por las baterías y necesita sistemas de ventilación adecuada.	Compacto, fácil integración en sistemas existentes, requiere menos espacio.
Mantenimiento	Sustitución periódica de baterías (vida útil limitada).	Mantenimiento mínimo, no utiliza baterías.
Costo inicial	Más alto debido al uso de baterías y tecnología avanzada.	Más accesible que un SAI con baterías.
Costo operativo	Mayor debido al mantenimiento de baterías y la eficiencia en modo On-line.	Bajo, por su alta eficiencia y ausencia de baterías.
Respaldo ante cortes	Puede mantener el suministro eléctrico por un periodo dependiendo de la capacidad.	No ofrece respaldo en caso de corte total de energía.



4.5.6 Ventajas y limitaciones

El Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) ofrece ventajas como respaldo durante cortes de energía, transición sin interrupciones gracias a su tecnología de doble conversión, y es ideal para aplicaciones donde el suministro continuo es crítico. Sin embargo, presenta limitaciones, como un mayor costo inicial y de mantenimiento, y menor eficiencia en comparación con el Corrector Dinámico de Voltaje (CDV), que se distingue por su alta eficiencia, bajo costo operativo y rápida respuesta para corregir caídas de voltaje, requiriendo menos mantenimiento. No obstante, el CDV tiene limitaciones, ya que no protege contra cortes de energía prolongados y solo corrige caídas de voltaje, sin ofrecer respaldo.

4.6 Propuesta de mejora

Tras el análisis de calidad de energía mediante el analizador de redes trifásico, se verificó que la red eléctrica del hospital cumple con los parámetros de la Regulación ARCERNR-002/20 en niveles de voltaje, armónicos, flicker y desbalance de voltaje. Sin embargo, se detectaron eventos repetitivos de caídas de voltaje (sags) con magnitudes de hasta el 70% del voltaje nominal y duraciones de 3-5 ciclos. Estos sags, aunque breves, afectan a equipos críticos como:

- Respiradores mecánicos (sensibles a variaciones >15%).
- Monitores cardíacos (riesgo de reinicio en sags >20%).
- Equipos de quirófano (interrupciones podrían comprometer procedimientos).

4.6.1 Estudio de factibilidad

Se propone la adquisición del Corrector Dinámico de Voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S como solución definitiva para erradicar este problema en la red eléctrica debía a los siguientes factores.



4.6.1.1 Viabilidad técnica

El corrector dinámico de voltaje Allen-Bradley 1608P-200A208V4S opera con un rango de 200 A y 208 V trifásico, siendo adecuado para la carga crítica del hospital, cuya demanda máxima se ha calculado en 52,97 kVA. Su tiempo de respuesta es inferior a 1 ms, lo que le permite mitigar caídas de voltaje (sags) de hasta 70% de profundidad, un desempeño superior al de las perturbaciones detectadas en la red. Además, emplea una tecnología de compensación en serie, inyectando voltaje en tiempo real sin interrumpir la alimentación, asegurando así la estabilidad del suministro eléctrico en equipos sensibles.

4.6.1.2 Viabilidad operativa

Dadas las dimensiones del equipo (1983 mm de altura $\times$ 1076 mm de ancho $\times$ 878 mm de profundidad), su instalación resulta técnicamente viable en el cuarto de máquinas adyacente al área de transformación. Este espacio cumple con los requisitos de seguridad, accesibilidad y ventilación necesarios para albergar el equipo. La ubicación propuesta no solo optimiza la distribución espacial, sino que también facilita la integración del corrector con los sistemas existentes, evitando interferencias operativas o modificaciones estructurales mayores.

El protocolo de mantenimiento del equipo se limita a inspecciones semestrales enfocadas en verificar la integridad de las conexiones eléctricas y actualizar el firmware a su última versión disponible. A diferencia de sistemas de respaldo convencionales (ej. UPS basados en baterías), este dispositivo no requiere costos recurrentes asociados al reemplazo de baterías, lo que simplifica su gestión operativa y reduce gastos a largo plazo.



4.6.1.3 Viabilidad económica

La instalación del DVR Allen-Bradley 1608P-200A208V4S, con un costo inicial de USD 65,000, requiere un análisis detallado de costos y beneficios para justificar su implementación en el Hospital San Luis de Otavalo; sin embargo, a pesar de la elevada inversión, su viabilidad económica se respalda en la protección que ofrece a equipos esenciales para la operación del hospital, como dispositivos de diagnóstico, monitoreo y tratamiento, cuyo valor estimado asciende a USD 203,500.

- **Ahorros por prevención de fallos en equipos críticos**

Los huecos de voltaje (sags) representan un riesgo significativo para los equipos médicos críticos, pudiendo ocasionar daños parciales (pérdida de funcionalidad temporal o degradación de componentes) o fallos catastróficos (inoperabilidad total). Un análisis de riesgo basado en probabilidad-impacto revela dos escenarios clave:

- ❖ Escenario conservador: Probabilidad del 10% de ocurrencia anual, con un costo equivalente al 30% del valor del equipo (ej. reparación de módulos electrónicos o sustitución de sensores).
- ❖ Escenario crítico: Probabilidad del 5% de ocurrencia anual, con un costo del 100% del valor del equipo (pérdida total que exige reemplazo integral).

En el escenario conservador se espera una pérdida anual de:

- ❖ $203,500 \text{ USD} \times 0.10 \times 0.30 = 6,105 \text{ USD/año}$

En el escenario critico se espera una pérdida anual de:

- ❖ $203,500 \text{ USD} \times 0.05 \times 1 = 10,175 \text{ USD/año}$



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**



- **Beneficio anual con el DVR**

El dvr mitiga el 95% de los sags, reduciendo las pérdidas esperadas en el escenario conservador con 5800 USD/año y en el escenario crítico con 9,666USD/año.

- **Eficiencia energética y costos operativos**

El DVR opera con una eficiencia del 99%, evitando pérdidas por conversión de energía o almacenamiento en baterías (comunes en SAIs). Esto se traduce en un ahorro aproximado de USD 1,000 anuales en comparación con un SAI de similar capacidad, cuyos costos incluyen mantenimiento de baterías (USD 1,200/año) y menor eficiencia (95%).

- **Retorno de inversión (ROI):**

Considerando una inversión total de USD 68,500 (equipo + instalación + capacitación) y ahorros anuales de USD 6,800 en el escenario conservador (USD 5,800 por reparaciones evitadas + USD 1,000 por eficiencia), y 10,666 en el escenario crítico (USD 9,666 por reemplazo de equipos + USD 1,000 por eficiencia) el ROI se calcularía en:

$$ROI \text{ conservador} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros anuales}} = \frac{68500}{6800} = 10 \text{ años}$$

$$ROI \text{ critico} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros anuales}} = \frac{68500}{10666} = 6.4 \text{ años}$$

Esto garantiza recuperar la inversión en menos de 10 años, con una vida útil estimada del equipo de 15 años.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



- **Costos evitados por riesgos clínicos**

La protección continua de equipos críticos previene eventos catastróficos (ej.: interrupción de cirugías o fallos en ventiladores), cuyos costos indirectos (demandas legales, daño a los pacientes) son difíciles de cuantificar, pero potencialmente devastadores. Esto refuerza la rentabilidad de la solución a largo plazo.

**Conclusiones**

- La Regulación ARCERNNR-002/20 establece parámetros de calidad de energía, pero omite límites para huecos de voltaje (sags), a diferencia de la norma IEC 61000-4-30, que define su profundidad (10%-90% de caída) y duración ($\frac{1}{2}$ ciclo a 1 minuto). Esta brecha normativa expone a entornos críticos, como hospitales, a riesgos operativos ante sags severos no regulados localmente, pero inadmisibles según estándares globales
- La evaluación de la calidad de energía en hospitales es esencial debido a la sensibilidad de equipos médicos como resonadores o ventiladores, cuyo funcionamiento y precisión pueden alterarse por variaciones de voltaje, armónicos, flicker o desbalances. Los ingenieros de mantenimiento deben realizar análisis periódicos para detectar anomalías tempranas, implementar correcciones y garantizar un suministro estable, asegurando la seguridad de los pacientes y la continuidad operativa en entornos críticos.
- La mitigación de huecos de voltaje (sags) requiere elegir métodos técnicos acordes a la gravedad de las perturbaciones y las necesidades de la carga. Los correctores dinámicos de voltaje (DVR) destacan por inyectar voltaje compensatorio en milisegundos, ideal para proteger equipos críticos en hospitales. Por otro lado, los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) ofrecen respaldo energético mediante baterías, útil en casos de interrupciones prolongadas.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**



Recomendaciones

Se recomienda ejecutar un análisis técnico integral en el transformador de 500 kVA, dado su sobredimensionamiento evidenciado por una carga máxima del 10,59% de su capacidad nominal. Este estudio incluirá pruebas como análisis de carga real, termografías infrarrojas para detectar puntos críticos de calentamiento, y evaluación de pérdidas en vacío y bajo carga, con el fin de cuantificar su ineficiencia operativa como pérdidas en el núcleo elevadas. Los resultados permitirán definir medidas correctivas, tales como la sustitución por un transformador de menor capacidad, su reubicación en circuitos con demanda acorde a su potencia, o la implementación de sistemas de compensación reactiva para optimizar su uso.

**Referencias bibliográficas.**

- [1] G. Popa, "Electric Power Quality through Analysis and Experiment," (in en), *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7947, 2022/10/26/ 2022, doi: 10.3390/en15217947.
- [2] R. Mehta and K. Parekh, "Real life case studies on diagnosis and solutions of electrical network quality related problems," in *2015 IEEE IAS Joint Industrial and Commercial Power Systems / Petroleum and Chemical Industry Conference (ICSPCIC)*, 19-21 Nov. 2015 2015, pp. 243-250, doi: 10.1109/CICPS.2015.7974081.
- [3] A. Ghosh and G. Ledwich, "Characterization of Electric Power Quality," in *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, A. Ghosh and G. Ledwich Eds. Boston, MA: Springer US, 2002, pp. 27-54.
- [4] G. Mugambi and L. Cai, "Influence of power oscillation damping assets reactive power capacity on damping low-frequency power system oscillations," in *21st Wind & Solar Integration Workshop (WIW 2022)*, 2022 2022, Hybrid Conference, The Hague, Netherlands: Institution of Engineering and Technology, pp. 359-364, doi: 10.1049/icp.2022.2776. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/icp.2022.2776>
- [5] S. Deshmukh, R. Dhasade, M. Gaikwad, A. Rahangdale, and M. S., "ELECTRIC POWER QUALITY MEASUREMENT," *INTERNATIONAL JOURNAL OF RECENT TRENDS IN ENGINEERING & RESEARCH*, vol. 05, no. 04, pp. 124-130, 2019/04/30/ 2019, doi: 10.23883/IJRTER.2019.5048.OWGAN.
- [6] D. Lakshmi, G. Ezhilarasi, S. Kavitha, S. Pushpa, and B. Chinthamani, "Investigation of Distribution Static Compensator Formitigation of Nonlinear Loads," in *2022 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*, 2022/04/21/ 2022, Chennai, India: IEEE, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICSSS54381.2022.9782277. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9782277/>
- [7] I. Universidad de las Américas Puebla - Escuela de, M. A. Mora-Barajas, and P. Bañuelos-Sánchez, "Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 11, no. 2, pp. 189-198, 2010/04/01/ 2010, doi: 10.22201/fi.25940732e.2010.11n2.016.
- [8] J. L. Ccalla Arellano, "Estudio de las distorsiones armónicas producidas por variadores de frecuencia, que afectan la calidad de energía eléctrica del pabellón H de la Universidad Continental," (in spa), *Universidad Continental*, 2017 2017.



- [9] M. Callacando, W. Pavón, and L. Ortiz, "Multilevel inverter D-STATCOM for reducing total harmonic distortion in a non-linear loads electrical distribution system," *Revista Técnica "energía"*, vol. 19, no. 1, pp. 85-91, 2022/07/26/ 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.520.
- [10] L. Amaya Vásquez and E. Inga-Ortega, "Localización de Distorsiones Armónicas en Sistemas Eléctricos usando Sensado Comprimido," *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, vol. 24, no. 1, 2021/12/29/ 2021, doi: 10.25100/iyc.v24i1.11037.
- [11] V. Chobanov, "Electrical Infrastructure in Hospitals risks and opportunity for quality healthcare," in *2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2021/06/11/ 2021, Ankara, Turkey: IEEE, pp. 1-5, doi: 10.1109/HORA52670.2021.9461382. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9461382/>
- [12] P. A. Scarpino and F. Grasso, "Analisis of complex hospital electrical systems," in *2017 AEIT International Annual Conference*, 2017/09// 2017, Cagliari: IEEE, pp. 1-4, doi: 10.23919/AEIT.2017.8240571. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8240571/>
- [13] K. Sai Kumar, S. Chatterjee, P. S. Kumar, R. K. Gatla, and A. N. Kumar, "Mitigation of Power Quality Problems Using Fuzzy Logic-Based Unified Power Quality Conditioner (UPQC)," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 56, no. 2, pp. 195-200, 2023/04/30/ 2023, doi: 10.18280/jesa.560203.
- [14] A. Singh, "Power Factor Correction and Harmonic Control in Industries," *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, vol. 06, no. 12, 2022/12/15/ 2022, doi: 10.55041/IJSREM17223.
- [15] S. Jain, "Power Quality," in *Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvements*: Elsevier, 2018, pp. 1-29.
- [16] S. R. K. Joga, S. S. M. N. Suriseti, S. Karri, S. Jalaluddin, K. Madhu, and J. Shiva, "Detection and Classification of Changes in Voltage Magnitude During Various Power Quality Disturbances," in *2023 4th International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 2023/05/26/ 2023, Belgaum, India: IEEE, pp. 1-6, doi: 10.1109/INCET57972.2023.10170211. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10170211/>
- [17] J. Corral, "Análisis del comportamiento de la distorsión armónica de corriente en inversores interconectados a la red eléctrica, mediante el uso de metodología de diseño experimental," vol. 6, pp. 1-13, 2023 2023.
- [18] D. Saucedo, "Factores que afectan la calidad de la energía y su solución," Instituto Politecnico Nacional, México, 2008.



- [19] G. Institute of Electrical Power Systems and High Voltage Engineering Technische Universitiit Dresden, R. Qi, O. Zyabkina, D. Agudelo Martinez, and J. Meyer, "Automatic Detection of Voltage Notches using Support Vector Machine," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 19, pp. 528-533, 2021/09// 2021, doi: 10.24084/repqj19.337.
- [20] Emmanuel, "POWER QUALITY," in *EFHC.MX*, ed, 2010.
- [21] P. Gonzalez, G. Buigues, and A. J. Mazon, "Noise in Electric Motors: A Comprehensive Review," (in en), *Energies*, vol. 16, no. 14, p. 5311, 2023/07/11/ 2023, doi: 10.3390/en16145311.
- [22] "Variaciones de voltaje eléctricas."
- [23] V. Crevenat, "Device for protection from overvoltages," ed, 2020.
- [24] "¿Qué es una sobretensión? Tipos de sobretensiones (I)," in *¿Qué es una sobretensión? Tipos de sobretensiones (I) ~ JEMAELECTRO BLOG*, ed, 2016.
- [25] J. Pan, R. Xu, C. Guo, and J. Zhang, "Design of a High Precision Undervoltage Protection Circuit Based on High Voltage BCD Technology," in *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET)*, 2020/05// 2020, Chengdu, China: IEEE, pp. 137-141, doi: 10.1109/ICET49382.2020.9119559. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9119559/>
- [26] "Undervoltage - Power Quality Problems - Sags or Dips," in *HPS New Zealand*, ed, 2018.
- [27] "¿Qué son las variaciones de voltaje?," (in es).
- [28] A. F. Bastos, K.-W. Lao, G. Todeschini, and S. Santoso, "Accurate Identification of Point-on-Wave Inception and Recovery Instants of Voltage Sags and Swells," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 551-560, 2019/04// 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2876682.
- [29] N. Acquatella, "Caídas de tensión (SAGs): el más importante de todos los problemas de calidad de energía," in *Técnica Fase, S.A.*, ed, 2018.
- [30] J. Uzinski, "Angular Parameterization of Orthonormal Wavelet Filter Banks in Power Quality: A Method for Detecting Disturbances in the Voltage Waveforms," *Robotics & Automation Engineering Journal*, vol. 3, 05/29 2019, doi: 10.19080/RAEJ.2018.03.555605.
- [31] V. Mercado, J. Bernardo, and L. Pacheco, "Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra," *2017*, vol. 38.
- [32] R. Rodriguez, "Análisis de la calidad de energía en el sistema eléctrico, utilizando equipo de medición de parámetros de sistemas fotovoltaicos," Universidad de



Cuenca, 2012. [Online]. Available:
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/683>

- [33] R. E. Pinto, *Calidad de la energía eléctrica*. Jorge Sarmiento Editor - Universitas (in es), 2020, p. 209.
- [34] J. Mora, "Interrupción del servicio de energía eléctrica," ed, 2003.
- [35] (2020). *REGULACIÓN Nro. ARCERNNR 002/20 (Codificada)*.
- [36] "Analizadores de calidad eléctrica y energía 434 / 435 de Fluke," (in es-ec).
- [37] "Ficha Técnica Multímetro para mantenimiento industrial con gancho."
- [38] Ormazabal, "Ormazabal," in *Ormazabal*, ed, 2023.
- [39] S. P and B. B, "Voltage Sag Compensation in Fourteen Bus System during Line Interruption Using Interline Dynamic Voltage Restorer," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 7, no. 3, p. 655, 2017/09/01/ 2017, doi: 10.11591/ijeecs.v7.i3.pp655-667.
- [40] R. Aguado Molina, J. L. Casteleiro Roca, E. Jove Pérez, F. Zayas Gato, H. Quintián Pardo, and J. L. Calvo Rolle, *Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica*. Servicio de Publicaciones, 2021.
- [41] S. Sharma, V. Yadav, and R.R.Joshi, *An Overview on Energy Storage Options for Renewable Energy Systems*. 2010.
- [42] "Corrector dinámico de huecos de tensión," (in es-PA).
- [43] A. Rockwell, "HC-DySC Dynamic Voltage Sag Corrector: User Manual," 2015.
- [44] www.montaweb.com, "SLC-80-CUBE3+ B1 A - Sistema de Alimentación Ininterrumpida trifásico de 80 kVA con cargador extra - Salicru," <https://www.salicru.com/>.
- [45] Salicru, "Manual de Usuario: SLC CUBE 3+," 2020.