



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **DIRECCIÓN DE POSGRADO**

### **MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**

#### **MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**Título:**

---

**Análisis de eficiencia energética de los principales sistemas eléctricos del Hospital General de Latacunga**

---

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

**Autora:**

Chasiluisa Yanchatuña Sandra Marisol

**Tutor:**

Mgtr. Quinatoa Caiza Carlos Iván

**LATACUNGA –ECUADOR**

**2022**

## **AVAL DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis de eficiencia energética de los principales sistemas eléctricos del Hospital General de Latacunga” presentado por Sandra Marisol Chasiluisa Yanchatuña, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

## **CERTIFICO**

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

Latacunga, marzo, 25, 2022



.....  
Mgtr. Carlos Iván Quinatoa Caiza  
CC: 0503287864

## AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis de eficiencia energética de los principales sistemas eléctricos del hospital general de Latacunga”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, mayo, 20, 2022

.....  
MSC. LEÓN SEGOVIA MARCO ANIBAL  
CI:0502305402  
Presidente del tribunal

.....  
MSC. SUAREZ VINUEZA ROMMEL EUSEBIO  
CI: 1804165353  
Lector 2

.....  
MSC. VASQUEZ TENEDA FRANKLIN  
CI: 1710434497  
Lector 3

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a mi familia, que por sobre toda eventualidad han sido el mayor apoyo en mi vida, brindándome su lealtad y amor. Y agradezco también a Dios y a las circunstancias que me permitieron es desarrollo de este trabajo.*

*Sandra Marisol Chasiluisa Yanchatuña*

## **RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

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

Latacunga, mayo, 20, 2022



.....  
Ing. Chasiluisa Yanchatuña Sandra Marisol  
0502497720

## RENUNCIA DE DERECHOS

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

Latacunga, mayo, 20, 2022



.....  
Ing. Chasiluisa Yanchatuña Sandra Marisol  
0502497720

## **AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Análisis de eficiencia energética de los principales sistemas eléctricos del hospital general de Latacunga”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, mayo, 20, 2022



.....  
MSC. LEÓN SEGOVIA MARCO ANIBAL

CI:0502305402

Presidente del tribunal

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD  
MENCION SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Título: “Análisis de eficiencia energética de los principales sistemas eléctricos del hospital general de Latacunga”**

**Autor:** Chasiluisa Yanchatuña Sandra Marisol

**Tutor:** Mgr. Carlos Iván Quinatoa Caiza

**RESUMEN**

En el Ecuador no se ha priorizado el uso eficiente de energía eléctrica como objetivo para alcanzar un mejor desarrollo sostenible, de modo que empresas públicas y privadas no incorporan un plan de gestión de ahorro de energía, una de estas empresas públicas es el Hospital General de Latacunga.

El presente trabajo consiste en el análisis de la eficiencia de energía eléctrica de los principales transformadores de distribución de bajo voltaje del Hospital, por medio de la aplicación de una auditoría energética eléctrica; utilizando partes de las normas ISO 50001 para el planteamiento de un plan de gestión de energía eléctrica, ISO 50002 como guía del procedimiento de una auditoría eléctrica y ARCERNNR 002-20 que dicta los estándares eléctricos nacionales que debe cumplir el sistema eléctrico del hospital para considerar que maneja una buena calidad de energía. Con la finalidad de encontrar una alternativa de ahorro de energía eléctrica y económico.

Para el desarrollo de este trabajo se realiza una investigación de campo, utilizando un analizador de calidad FLUKE 435-SII para la medición de las variables del sistema eléctrico como son: tensiones, corrientes, frecuencia, potencias, armónicos. Al evaluar el comportamiento del sistema eléctrico comparándola con la norma del ARCONEL, se establece que el problema potencial es la presencia de armónicos de corriente en la red.

Como alternativa de solución se propone la implementación de un filtro activo trifásico multifuncional de cuatro hilos de 200 A para el transformador de distribución de la sección nueva y un filtro activo trifásico de 150 A para la sección antigua del hospital. Mismo que compensa las corrientes armónicas, corrientes de potencia reactiva y corrientes de desbalance de fases.

**PALABRAS CLAVE:** hospital, eficiencia, auditoría, calidad, armónicos, potencia.



**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI**  
**DIRECCION DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**  
**MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Topic:** "Main electrical systems energy efficiency analysis from Latacunga General Hospital".

**Author:** Chasiluisa Yanchatuña Sandra Marisol

**Tutor:** Mgtr. Carlos Iván Quinatoa Caiza

**ABSTRACT**

Into Ecuador has not been prioritized the efficient electrical energy use as aim to reach a better sustainable development, so that, public and private enterprises do not incorporate an energy saving management plan, one these public enterprises is the Latacunga General Hospital. The actual work consists the main low-voltage distribution transformers electrical energy efficiency analysis from Hospital, through an electrical energy audit application; by using parts of ISO 50001 standards for an electrical energy management plan proposal, ISO 50002 as an electrical audit procedure guide and ARCERNNR 002-20, which dictates the national electrical standards that must comply the electrical system from hospital, in order to consider, what manages an energy good quality. In order to find a electric and economic energy savings alternative. For the development this work is performed field research, using a FLUKE 435-SII quality analyzer for the electrical system variables measurement, such as: voltages, currents, frequency, powers, harmonics. When assessing the electrical system behavior compares it with the ARCONEL standard, it is set, what the potential problem is the current harmonics presence in the network. As an alternative solution is proposed a 200 A multifunctional three-phase active filter with four wires implementation for the new section distribution transformer and a 150 A three-phase active filter for old section from hospital. Same that compensates harmonic currents, reactive power currents and phase unbalance currents.

**KEYWORDS:** Hospital, efficiency, audit, quality, harmonics, power

Yo, Marco Paul Beltrán Semblantes con cédula de identidad número:0502666514 Magister en Lingüística Aplicada a la Enseñanza del idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT: 1020-2021-2354162; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "**Análisis de eficiencia energética de los principales sistemas eléctricos del hospital general de Latacunga**" de: Chasiluisa Yanchatuña Sandra Marisol, aspirante a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.



Mg. Marco Paul Beltrán Semblantes  
0502666514



**CENTRO  
DE IDIOMAS**

Latacunga, mayo, 2022

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEORICA- METODOLOGICA.....	6
1.1.1 Hospital general de Latacunga.....	8
1.2 Fundamentación Teórica.....	9
1.2.1 ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE .....	9
1.2.1.1 Fuentes de energía.....	9
1.2.1.2 Tipos de energía .....	9
1.2.2 Gestión energética.....	10
1.2.2.1 Modelo de gestión ISO 50001 .....	12
1.2.2.2 Auditoría energética .....	14
1.2.2.3 Etapas del proceso de auditoría energética .....	14
1.2.3 CALIDAD DE ENERGÍA.....	17
1.2.3.1 Regulaciones y normativas .....	17
1.2.3.2 Regulación ARCERNNR 002/20: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica.....	18
1.2.3.3 Calidad de potencia .....	23
1.2.3.4 Perturbaciones de los sistemas eléctricos.....	24
1.2.3.5 Armónicos .....	29
1.2.3.6 Potencia eléctrica en sistemas eléctricos trifásicos basada en IEEE STD.1459-2010.....	34
1.2.3.7 Analizador de calidad Fluke 435 S-II .....	37
1.3 Fundamentación metodológica .....	38
1.3.1 Tipo de investigación.....	38
1.3.2 Métodos de investigación .....	38
1.3.3 Técnicas de recolección de datos.....	39
1.3.3.1 Observación.....	39
1.3.3.2 Entrevista.....	39
1.3.3.3 Análisis documental .....	39
1.3.3.4 Medición .....	39
1.3.4 Procedimientos empleados para la obtención .....	40
1.3.5 Análisis de la información .....	40
1.4 Conclusiones Capítulo I.....	40
CAPÍTULO II. PROPUESTA .....	42

2.1	Título del proyecto. ....	42
2.2	Objetivo del proyecto. ....	42
2.3	Descripción de la propuesta. ....	42
2.4	Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados .....	43
2.4.1	Descripción del entorno .....	43
2.4.2	Gestión energética según ISO 50001 .....	45
2.4.3	Auditoria energética.....	46
2.4.3.1	Planificación de auditoria energética .....	47
2.4.3.2	Plan de medición de datos.....	47
2.4.3.3	Reunión de inicio .....	48
2.4.3.4	Recopilación de datos .....	48
2.4.3.5	Trabajo de campo .....	55
2.4.3.6	Análisis.....	68
2.4.3.7	Planteamiento de soluciones .....	86
2.4.3.8	Informe final.....	99
2.5	Conclusiones Capítulo II.....	99
<b>CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA ...</b>		<b>100</b>
3.1	Análisis de los resultados:.....	100
3.2	Validación técnica -económica de los resultados: .....	100
3.3	Evaluación de expertos .....	103
3.4	Conclusiones del capítulo .....	103
Conclusiones generales .....		104
Recomendaciones.....		104
Referencias bibliográficas.....		105

## Índice de figuras

Figura 1. Propuestas optadas por el gobierno para mejorar la eficiencia energética .....	7
Figura 2. Tipos de energía .....	10
Figura 3. Elementos a estudiar para mejorar la eficiencia energética.....	11
Figura 4. Ciclo de mejora continua.....	12
Figura 5. Ciclo PHVA.....	13
Figura 6. Elementos clave revisados por ISO 50001 .....	14
Figura 7. Planificación de la auditoría energética.....	15
Figura 8. Atributos de la calidad según ACERNNR 002-20 .....	18
Figura 9. Forma de onda de tensión monofásica ideal. El valor pico es de 170 V, el valor rms es de 120 V y la frecuencia es de 60 Hz .....	23
Figura 10. Una forma de onda de tensión trifásica ideal a 60 Hz con una tensión de línea a línea de 480 V rms. Se muestran los voltajes de línea-neutro de cada fase. ....	24
Figura 11. Cargas productoras de armónicos .....	30
Figura 12. Fuentes armónicas .....	31
Figura 13. Efectos de los armónicos en los equipos .....	31
Figura 14. Variables eléctricas y modos de medición por FLUKE 435 SII.....	38
Figura 15. Croquis del Hospital General de Latacunga .....	44
Figura 16. Sección 1 .....	44
Figura 17. Sección 2 .....	45
Figura 18. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2019.....	51
Figura 19. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2020.....	52
Figura 20. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2021.....	52
Figura 21. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2022.....	53
Figura 22. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en 2019.....	53
Figura 23. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en 2020.....	54
Figura 24. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en 2021.....	54
Figura 25. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en los meses octubre 2021 a febrero 2022.....	55
Figura 26. Analizador de red FLUKE 435-SII .....	56
Figura 27. Placa de datos del transformador de 750KVA .....	56
Figura 28. Configuración de topología de medición.....	57
Figura 29. Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico.....	57
Figura 30. Conexión física del analizador de red en T1 .....	57
Figura 31. Diagrama fasorial de la conexión .....	58
Figura 32. Pantalla Power Log.....	59
Figura 33. Porcentaje de valores registrados que cumplen con ARCERNNR 002-20 con respecto al nivel de voltaje del T1 .....	69
Figura 34. Porcentaje de valores registrados que cumplen con ARCERNNR 002-20 con respecto al nivel de voltaje del T2 .....	70
Figura 35. Porcentaje de valores registrados que cumplen con ARCERNNR 002-20 con respecto al nivel de voltaje del T3 .....	70
Figura 36. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la perturbación rápida de voltaje del T1.....	72
Figura 37. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la perturbación rápida de voltaje del T2.....	72

Figura 38. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la perturbación rápida de voltaje del T3.....	73
Figura 39. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de voltaje del T1 .....	74
Figura 40. Espectro armónico de voltaje de T1 .....	75
Figura 41. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de voltaje del T2 .....	76
Figura 42. Espectro armónico de voltaje de T2 .....	76
Figura 43. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de voltaje del T3 .....	77
Figura 44. Espectro armónico de voltaje de T3 .....	78
Figura 45. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto al desequilibrio de voltaje del T1.....	79
Figura 46. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto al desequilibrio de voltaje del T2.....	80
Figura 47. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto al desequilibrio de voltaje del T3.....	80
Figura 48. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de corriente del T1 .....	82
Figura 49. Espectro armónico de corriente de T1 .....	83
Figura 50. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de corriente del T2.....	84
Figura 51. Espectro armónico de corriente de T2.....	84
Figura 52. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de corriente del T3.....	85
Figura 53. Espectro armónico de corriente de T3 .....	85
Figura 54. Puntos de medición para estudio de calidad de energía .....	91
Figura 55. Corriente de armónicos de T1 .....	94
Figura 56. Corriente de armónicos de T2 .....	94
Figura 57. Corriente de armónicos de T3 .....	95
Figura 58. Corriente de potencia reactiva del transformador 1.....	96
Figura 59. Corriente de potencia reactiva del transformador 2.....	96
Figura 60. Corriente de potencia reactiva del transformador 3.....	97

## Índice de tablas

Tabla 1. Sistemas de tareas en relación a los objetivos.....	3
Tabla 2. límites para el índice de nivel de voltaje.....	19
Tabla 3. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal).....	21
Tabla 4. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente .....	22
Tabla 5: Perturbaciones de potencia típicas .....	25
Tabla 6. Dispositivo de mitigación para corregir la calidad .....	28
Tabla 7. Efectos de los armónicos en los equipos.....	31
Tabla 8. Orden de los armónicos predominantes en el sector industrial.....	32
Tabla 9. Orden de los armónicos predominantes en el sector terciario.....	33
Tabla 10. Modelo de gestión energética sugerido al Hospital General de Latacunga .....	45
Tabla 11. Planificación de auditoría energética .....	47
Tabla 12. Plan de medición de datos.....	47
Tabla 13. Resumen de medición del transformador 1.....	59
Tabla 14. Tensión máxima y mínima registrada en T1 (L1, L2, L3).....	60
Tabla 15. Tensión máxima y mínima registrada en T1 (L12, L23, L31).....	60
Tabla 16. Corriente máxima y mínima registrada en T1 (L1, L2, L3, N).....	60
Tabla 17. Resumen de potencias registradas en T1 por día .....	62
Tabla 18. Resumen de medición del transformador 2.....	63
Tabla 19. Tensión máxima y mínima registrada en T2 (L1, L2, L3, N).....	63
Tabla 20. Tensión máxima y mínima registrada en T2 (L12, L23, L31).....	63
Tabla 21. Corriente máxima y mínima registrada en T2 (L1, L2, L3, N).....	64
Tabla 22. Resumen de potencia registrada en T2 por día .....	65
Tabla 23. Resumen de medición del transformador 3.....	66
Tabla 24. Tensión máxima y mínima registrada en T3 (L1, L2, L3, N).....	66
Tabla 25. Tensión máxima y mínima registrada en T3 (L12, L23, L31).....	67
Tabla 26. Corriente máxima y mínima registrada en T3 (L1, L2, L3).....	67
Tabla 27. Resumen de potencia registrada en T3 .....	67
Tabla 28. Cumplimiento de la norma con respecto al nivel de voltaje de los tres transformadores.....	68
Tabla 29. Cumplimiento de la norma con respecto a la perturbación rápida de voltaje de los tres transformadores .....	71
Tabla 30. Cumplimiento de la norma con respecto a la distorsión armónica de voltaje de los tres transformadores .....	74
Tabla 31. Cumplimiento de la norma con respecto al desbalance de voltaje de los tres transformadores.....	78
Tabla 32. Cumplimiento de la norma con respecto a la distorsión armónica de corriente de los tres transformadores .....	81
Tabla 33. Planteamiento de soluciones para perturbación rápida de voltaje .....	86
Tabla 34. Planteamiento de soluciones para la presencia de corriente en el neutro.....	87
Tabla 35. Planteamiento de soluciones para la presencia de armónicos de corriente .....	88
Tabla 36. Planteamiento de soluciones para presencia de potencia reactiva .....	90
Tabla 37. Selección de equipos tentativos más eficientes.....	91
Tabla 38. Corrientes armónicas máximas de los tres transformadores .....	93
Tabla 39. Corrientes de potencia reactiva máximas de los tres transformadores.....	95
Tabla 40. Corrientes máximas de desequilibrio de fases de los tres transformadores .....	98
Tabla 41. Corriente de selección del filtro activo de los transformadores 1 y 2.....	98

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1.....	19
Ecuación 2.....	19
Ecuación 3.....	20
Ecuación 4.....	20
Ecuación 5.....	20
Ecuación 6.....	21
Ecuación 7.....	22
Ecuación 8.....	22
Ecuación 9.....	22
Ecuación 10.....	34
Ecuación 11.....	34
Ecuación 12.....	35
Ecuación 13.....	35
Ecuación 14.....	35
Ecuación 15.....	36
Ecuación 16.....	36
Ecuación 17.....	36
Ecuación 18.....	37
Ecuación 19.....	37
Ecuación 20.....	37
Ecuación 21.....	37
Ecuación 22.....	37
Ecuación 23.....	92
Ecuación 24.....	92
Ecuación 25.....	92
Ecuación 26.....	93
Ecuación 27.....	102

## INTRODUCCIÓN

El uso eficiente y racional de la energía se ha convertido en el tema de desarrollo estratégico en varias industrias, lo que puede mejorar la competitividad, reducir el consumo de energía, reducir las emisiones de carbono, etc [1].

Los hospitales son complejos administrativos y constructivos que necesitan enfrentar nuevos desafíos médicos, nuevas tecnologías, son plantas complejas listas para usar y brindar una gran variedad de servicios. Al mismo tiempo, probablemente no haya otra área del servicio público que haya sido vista de manera tan crítica por la población y que requiera mejorar con tanta urgencia además de la eficiencia [2].

El presente proyecto busca mejorar la eficiencia energética del hospital general de Latacunga sin dejar de brindar las atenciones y comodidades que los pacientes y el personal que laboran necesitan, a través de una auditoría energética para plantear estrategias viables que permitan una adecuada gestión de los recursos de energía.

**Antecedentes:** Este proyecto se ejecutará dentro de la línea de investigación correspondiente a la maestría en Electricidad: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, y sub línea de investigación: Conversión y uso racional de la energía eléctrica, debido que las temáticas a tratar son: Eficiencia energética y auditoría energética.

En marzo de 2019 se aprobó la Ley Orgánica de Eficiencia Energética. Como uno de sus principios, establece la racionalización del consumo energético en todas las instalaciones públicas y privadas, permitiendo a terceros realizar auditorías energéticas para mejorar progresivamente la gestión energética [3].

En el año 2018 el Ministerio de Salud Pública inaugura el proyecto: “Construcción y Repotenciación del Hospital General de Latacunga” [4], que cubre el incremento de demanda de atención hospitalaria de la ciudad y de la provincia. Entidad que cuenta con altos estándares en cuanto a infraestructura y equipamiento, cumpliendo con los principios de la Ley Orgánica de Eficiencia Energética. Sin embargo, no existen antecedentes de repotenciación ni estudios de eficiencia de la institución.



Debido a la demanda del servicio salud, la sección antigua del hospital continúa operativa, utilizando el equipamiento y la carga instalada anteriormente, por su vida útil, se desconoce la eficiencia energética actual.

En el año 2002, estudiantes de la “Escuela Politécnica del Ejército” ahora la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE realizaron una auditoria energética al Hospital antiguo como parte de su proyecto de grado en la carrera de Ingeniería Electromecánica, siendo una de las soluciones el cambio de luminarias y otros implementos [5].

**Planteamiento del problema:** Ecuador no cuenta con reglamentos firmes que presionen a los grandes usuarios de la energía eléctrica a implantar programas de eficiencia de energía eléctrica. Las industrias que deciden adoptar este tipo de iniciativas lo hacen por obtener beneficios económicos propios, muchos de los grandes consumidores de electricidad no están interesados en temas de protección ambiental y no están dispuestos a invertir en auditorias energéticas para mejorar sus instalaciones, el incentivo que mueve a estos usuarios es económico.

En la ciudad de Latacunga se realizó una obra de Repotenciación del Hospital, para cubrir necesidades de demanda, esta obra fue construida a continuación del antiguo edificio. Las nuevas instalaciones constan de sistemas más sofisticados que promueven el uso racional de los recursos eléctricos, mientras que las instalaciones antiguas constan aun del equipamiento anterior, no se ha realizado repotenciaciones significativas que resuelvan los problemas de índole energético.

El hospital cuenta con tres transformadores de distribución, dos ellos de las mismas dimensiones destinados a los edificios de atención hospitalaria, las instalaciones cuentan con equipos de carga no lineal que podrían estar afectando la calidad de energía del establecimiento, por lo tanto, no se mantiene un control de gestión de energía eléctrica adecuada, tampoco se ha establecido un plan estratégico de gestión energética y mejoras. Obteniendo como resultado altos costos por servicios eléctricos y costos innecesarios en mantenimientos correctivos.

**Formulación del problema:** ¿El Hospital General de Latacunga cuenta con un plan de gestión de energía para mejorar la eficiencia eléctrica y reduciendo costos por servicios eléctricos, mantenimientos correctivos, satisfaciendo los servicios de

salud continuos y sin interrupciones, contribuyendo al impacto ambiental a nivel mundial?

**Objetivo General:** Analizar la eficiencia de energía eléctrica de los principales transformadores de distribución de bajo voltaje del Hospital General de Latacunga por medio de una auditoria energética para formular un plan estratégico de reducción el consumo eléctrico.

**Objetivos Específicos:**

1. Investigar el estado del arte sobre gestión de energía eléctrica basado en la norma ISO 50001 y desarrollo de auditorías energéticas en edificios hospitalarios.
2. Determinar los principales problemas eléctricos de los transformadores y posibles soluciones por medio de la auditoria de energía eléctrica.
3. Analizar la viabilidad de implementar medidas para mejorar la eficiencia eléctrica y un plan estratégico de gestión de energía eléctrica.

**Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:** estas son actividades que se realizarán para dar cumplimiento a cada objetivo específico planteado.

Tabla 1. Sistemas de tareas en relación a los objetivos

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	Obtención de bibliografía referencia al desarrollo de programas de gestión energética, auditorias energéticas en hospitales, las perturbaciones de la calidad de energía y que efectos negativos tiene sobre eficiencia eléctrica.	Estado del arte	Investigar los conceptos relevantes del proyecto, procedimientos, resultados que permitan desarrollar la metodología de investigación.

2	<p>Investigación datos históricos de consumo por servicios eléctricos.</p> <p>Indagación de informes sobre auditorias anteriores.</p> <p>Desarrollar una propuesta de gestión de energía eléctrica basado en la norma ISO 50001.</p> <p>Planificar y ejecutar la auditoria eléctrica usando las recomendaciones de la norma ISO 50002.</p> <p>Análisis de calidad de energía eléctrica de los transformadores de distribución.</p> <p>Identificar los problemas de índole eléctrico que más afectan a las instalaciones.</p>	<p>Histórico de consumo, informes relacionados al sistema eléctrico.</p> <p>Propuesta de gestión de energía eléctrica usando recomendaciones de ISO 50001 adaptado al funcionamiento del hospital.</p> <p>Elaboración de una planificación y ejecución de una auditoría eléctrica conforme a las recomendaciones de la norma ISO 50002.</p> <p>Problemas puntuales de energía eléctrica que afecten las instalaciones y la eficiencia.</p>	<p>Indagar en los datos del Hospital, informes de mantenimiento, planillas, etc.</p> <p>Analizar los parámetros que debe cumplir una instalación para cumplir con la norma ISO 50001 y en base a ellos determinar que parámetros pueden ser implementados.</p> <p>Realizar un análisis de calidad de energía en los transformadores principales del edificio de atención hospitalaria usando un analizador de red y comparar los resultados con la norma ARCERNNR 002-20.</p>
3	<p>Estudio de la viabilidad de implementar las medidas simples que no requieran de financiación, medidas de bajo coste y/o acciones de reparación o reemplazo.</p>	<p>Plan de gestión de energía eléctrica.</p>	<p>Analizar la viabilidad económica, técnica y humana para implementar un plan de gestión de energía eléctrica.</p>

**Fuente:** Sandra Chasiluisa

**Justificación:** La Ley Orgánica de Eficiencia Energética declaró que el uso eficiente de la energía es de interés Nacional para el desarrollo [3]. Las auditorías energéticas son indispensables para optimizar el uso de energía, recursos económicos y ambientales, especialmente en los edificios hospitalarios que son instalaciones de consumo eléctrico elevado y permanente las 24 horas los 365 días del año [6].

Debido a la demanda de atención médica, las instalaciones del Hospital General de Latacunga están enfocadas en la satisfacción del paciente en términos de salud, por lo que no se ha priorizado estudios, mejoras e innovaciones en el área técnica eléctrica, tampoco existen normativas y procedimientos internos sobre el manejo adecuado de energía, en consecuencia, no existe un plan de gestión de energía eléctrica.

Un plan de gestión proporciona a la institución la oportunidad de administrar de manera eficaz el personal, los equipos y las actividades relacionadas con el consumo de electricidad.

Con un análisis adecuado y enfocado es posible establecer un plan de gestión energética. Con la finalidad de reducir de costos en cuanto a consumo de energía eléctrica, mejorar la confiabilidad de suministro de energía y conservar el medio ambiente. A través de una auditoria energética e implementando medidas de ahorro de energía eléctrica.

**Hipótesis:** El análisis de la eficiencia de energía eléctrica de los principales transformadores de distribución de bajo voltaje del Hospital General de Latacunga por medio de una auditoria energética permite desarrollar un plan de reducción el consumo eléctrico.

## **CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEORICA- METODOLOGICA**

### **1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.**

El cambio climático y la contaminación son un problema de interés mundial, para el cual los gobiernos han implementado estrategias, con el fin de reducir emisiones de CO<sub>2</sub>. Una de estas políticas es promover los programas de eficiencia energética, fundamental en el esfuerzo de mitigación del cambio climático global, representando el 75% de la reducción de emisiones al 2030. Estas políticas han tenido poca acogida en los países de Latinoamérica [7].

Factores como el aumento de los precios de la energía, la necesidad de reducir las emisiones de gases, el cumplimiento de nuevas normativas o la apuesta por las energías renovables hacen de la eficiencia energética un reto clave [8].

Aquí es donde entran en juego las auditorías energéticas, estudios que proporcionan un análisis completo y detallado del rendimiento energético de cualquier edificio. Se registran datos sobre electrodomésticos que consumen energía, se generan encuestas de geolocalización, controles de facturas de energía y tablas de balance de energía. Con estos datos y resultados, se pueden identificar áreas potenciales de ahorro de energía y una serie de medidas de ahorro de energía recomendadas, darán como resultado un mayor ahorro y una reducción de las emisiones contaminantes.

Entre las normativas, planes y estrategias relacionadas con el ahorro energético y las auditorías energéticas que existen en España se encuentran el Real Decreto 56/2016, la norma ISO 50001, la UNE-EN 16247, entre otros.

En España se desarrolla una auditoría energética de un hospital de gran tamaño situado en la provincia de Madrid titulado “Auditoria energética de un Hospital”, usando las recomendaciones de la norma ISO50001. La investigación se realiza en seis etapas: recopilación de información inicial, toma de datos y medición, evaluación del estado del hospital y balance energético, propuesta de medidas de ahorro y evaluación económica, plan de negocio y realización de memorias. Concluyendo que el mayor

peso energético es la electricidad con un 54% y el gasóleo con 45%, la propuesta de solución es el reemplazo de calderas de gasóleo por calderas de gas natural [8].

En países en desarrollo como Ecuador, la eficiencia energética manteniendo tiene como objetivo reducir la necesidad de inversión en suministro de energía y aprovechar mejor la capacidad de suministro existente. MEER, Dirección Nacional de Eficiencia Energética del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, tiene como misión promover el uso eficiente y sostenible de todas las formas de energía a través de la formulación e implementación de políticas, planes y proyectos [9].

Algunas de las medidas optadas por el gobierno para mejorar la eficiencia energética en el sector se pueden observar en la Figura 1, los más relevantes son el reemplazo de focos incandescentes y luminarias de mercurio por luminarias tipo led y promoción del uso de cocinas de inducción:

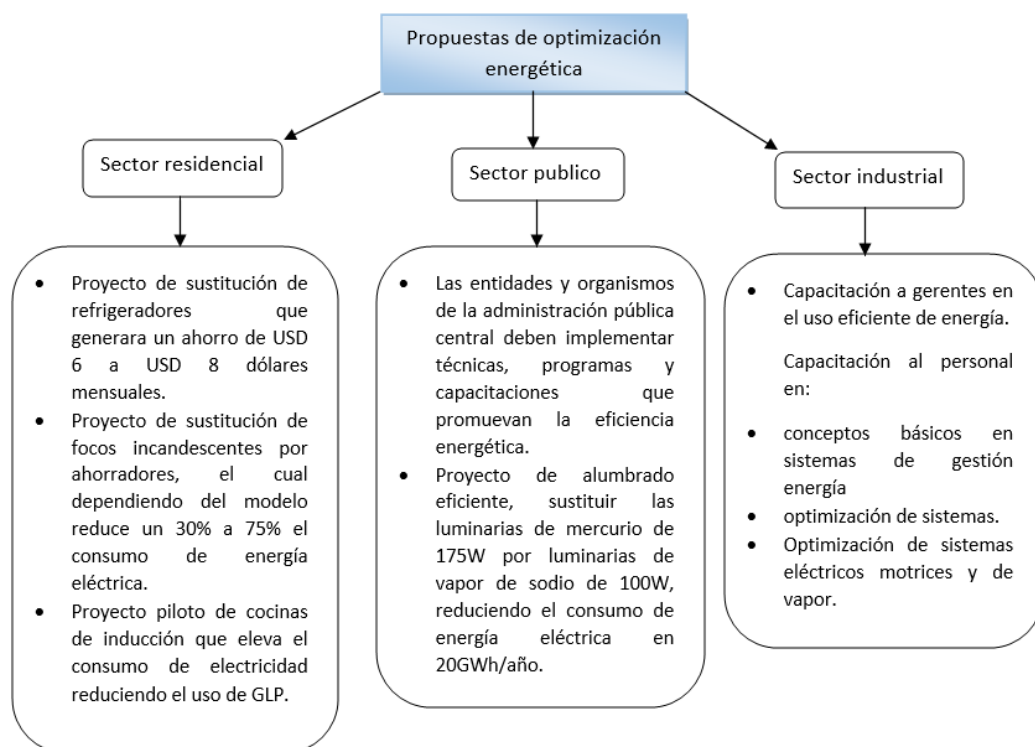


Figura 1. Propuestas optadas por el gobierno para mejorar la eficiencia energética

Fuente: [9]

Con respecto a eficiencia energética, se desarrollan proyectos en las universidades del Ecuador, uno de ellos es “Estudio y análisis de eficiencia energética del sistema

eléctrico del Hospital IESS-Ibarra”, el estudio empieza por determinar las demandas de consumo eléctrico, posteriormente se realiza un levantamiento de los sistemas eléctricos y un balance energético, dando como resultado el mayor consumidor de electricidad a la iluminación con 57,14%. La propuesta de mejora consiste en el reemplazo de luminarias por tecnología led, que reduce el consumo eléctrico de la iluminación a 28,37% [10].

El modelo de gestión de energía más versátil y de mejor adaptabilidad a cualquier tipo de organización es ISO 50001, este sigue el camino de la mejora continua, con normas complementarias como ISO 50002 para auditorías energéticas. Estas normas no son de implementación rigurosa, una organización puede elegir que apartados integrar a su sistema de gestión en base a las actividades que desempeñe y el nivel de complejidad que seleccione [11].

La necesidad de implementar un plan de gestión de energía eléctrica en instituciones como un hospital, es de suma importancia para el desarrollo socioeconómico del país, sin embargo, al no poseer políticas que promuevan estas iniciativas, no se tiene un modelo de gestión de energía eléctrica a nivel nacional. Para empezar, se requiere del análisis del sistema eléctrico a nivel general, mediante las normas ISO 50001 e ISO 50002 desarrollar una planificación usando los recursos disponibles al momento.

### **1.1.1 Hospital general de Latacunga**

El 8 de octubre de 1863 (Hospital de la Caridad), donación Hnas. Ana y Mercedes Páez Vela durante la Presidencia del Dr. Gabriel García Moreno. 11 de julio de 1864, (Hospital Público de la caridad) a través de la Junta Municipal Médica. El presupuesto aproximado fue de tres reales diarios por enfermo [12].

El 11 de marzo de 1866 se inaugura el (Hospital San Vicente de Paúl). En 1885 Hermanas de la Caridad se hacen cargo del Hospital. 1892 esta labor benéfica la asumió la Junta de Asistencia Pública Provincial. Al fallecer Hnas. Páez, el Hospital regentado por las hermanas de la caridad San Vicente de Paúl toma el nombre de sus protectoras. 1946 inicia la construcción del nuevo edificio bajo asesoría técnica del Servicio Cooperativo Interamericano y toma el nombre de Hospital General de Latacunga.

El 11 de noviembre de 1959 se inaugura la infraestructura actual con cuatro servicios básicos. Desde el 14 de abril de 1973 hasta la actualidad la Institución depende del Ministerio de Salud Pública del Ecuador.

El año 2018 el Ministerio de Salud Pública inaugura el proyecto: “Construcción y Repotenciación del Hospital General de Latacunga”, que cubre el incremento de demanda de atención hospitalaria de la ciudad y de la provincia [4].

## **1.2 Fundamentación Teórica.**

### **1.2.1 ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

La energía es una magnitud física que asociamos con la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo mecánico, emitir luz, generar calor, etc. [13]. La energía es un elemento clave en el desarrollo económico y social, el aumento del consumo de energía y la tendencia a satisfacer el mayor número de necesidades hace urgente la integración de políticas medioambientales y desarrollo sostenible [14].

#### **1.2.1.1 Fuentes de energía**

Las fuentes de energía pueden clasificarse, atendiendo a su disponibilidad, en renovables y no renovables [15].

Las energías renovables son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la Luna. Son energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y las marinas.

Las energías no renovables son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada. No se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan. La demanda mundial de energía en la actualidad se satisface fundamentalmente con este tipo de fuentes energéticas: el carbón, el petróleo, el gas natural y el uranio

#### **1.2.1.2 Tipos de energía**

El uso de la energía en edificios está enfocado en brindar confort a sus ocupantes, donde el mayor consumo se encuentra destinado al uso de equipos eléctricos y



electrónicos, a iluminación y calefacción, esta puede manifestarse de diversas formas, una de ellas se muestra en la Figura 2:

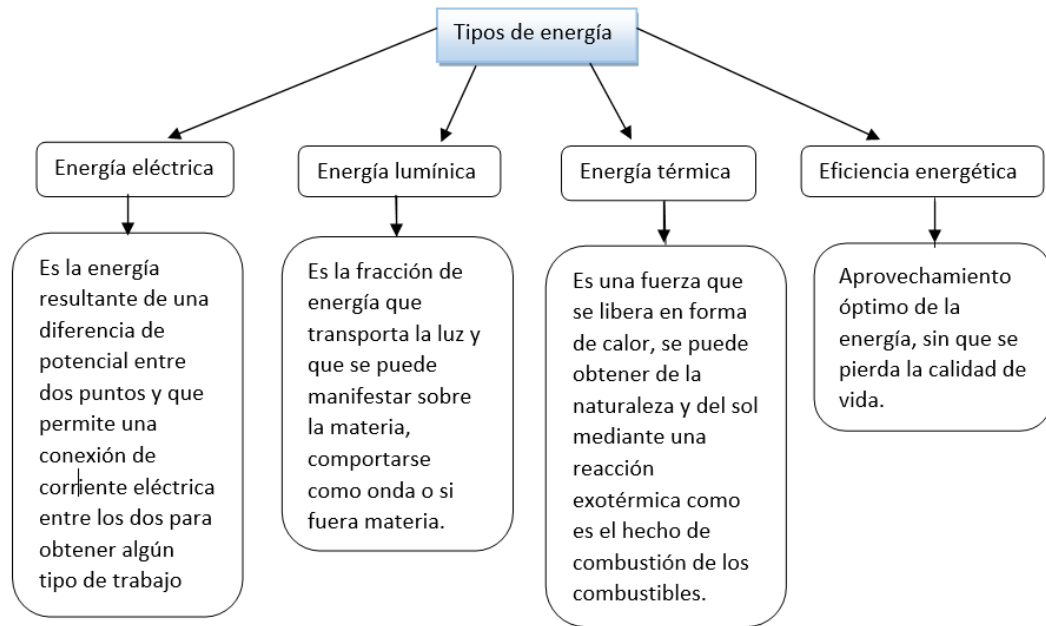


Figura 2. Tipos de energía

Fuente: [13]

### 1.2.2 Gestión energética

Es el uso efectivo de la energía permite maximizar utilidades, aumentar la competitividad, reducir costos y efectos al medio ambiente [16].

En el manual de administración energética, menciona que el uso eficiente de la energía eléctrica en el área comercial, industrial e institucional, permite minimizar los costos operativos y aumentar las ganancias para seguir siendo competitivos. La mayoría de la energía eléctrica se utiliza para hacer funcionar sistemas impulsados por motores eléctricos [17].

En general, los sistemas constan de varios componentes, la fuente de alimentación eléctrica, el motor eléctrico, el control del motor, y un sistema de transmisión mecánica. Existen varias formas de mejorar la eficiencia de los sistemas. La forma rentable es comprobar cada componente del sistema para tener la oportunidad de reducir el gasto eléctrico. Una persona calificada debe supervisar el sistema eléctrico ya que la mala distribución de energía dentro de una instalación es una causa común de pérdidas de energía.

En el manual de administración energética, enlista veinte elementos a estudiar para mejorar la eficiencia del sistema de transmisión, revise en la Figura 3. El proyecto utilizara las prácticas 1, 3 y 4 para la evaluación del sistema en forma general.

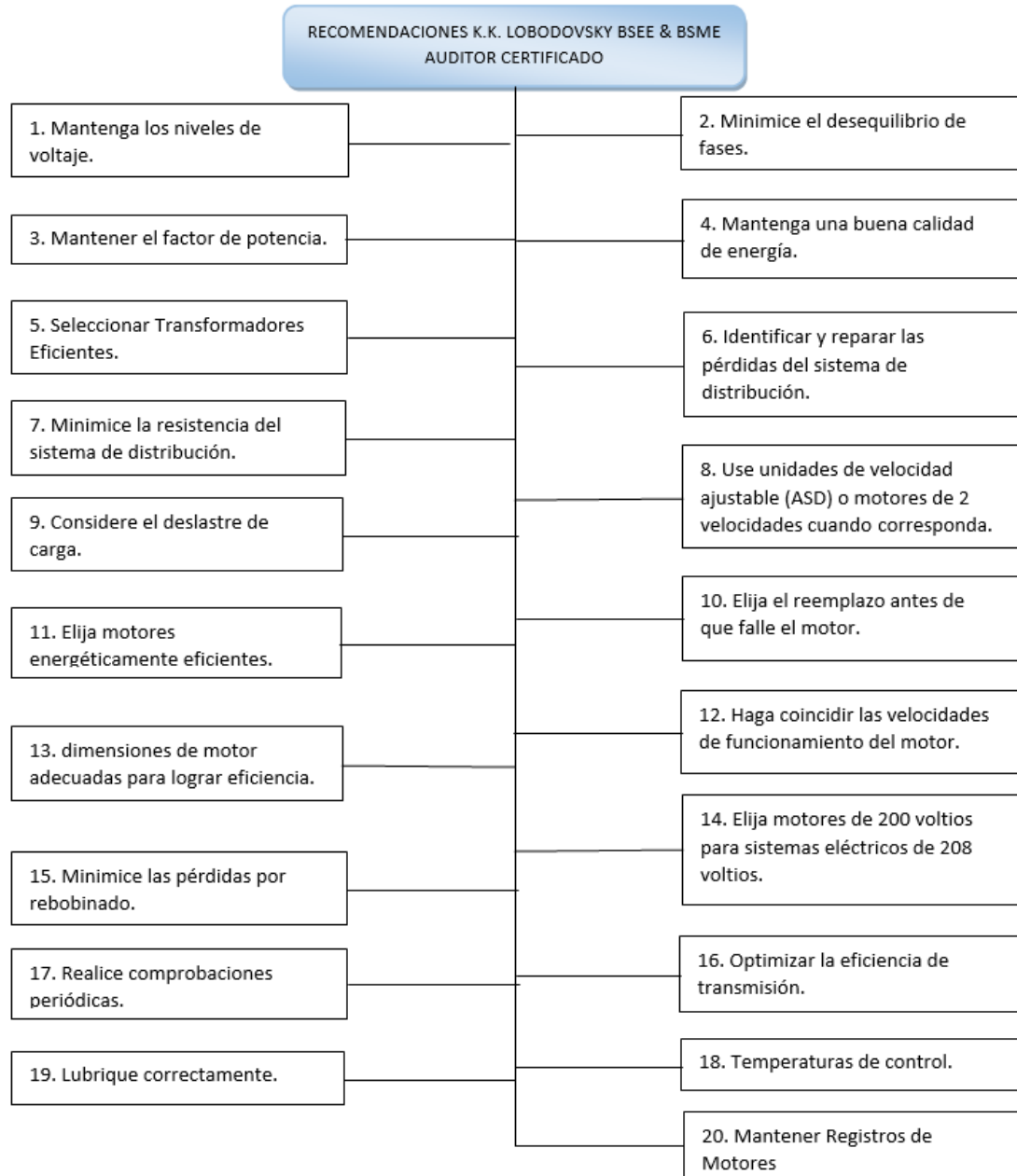


Figura 3. Elementos a estudiar para mejorar la eficiencia energética

Fuente: [17]

Algunos de estos pasos requieren la participación única de un ingeniero o técnico eléctrico como las practicas 6, 7, 8 y 15. Otras requieren de un mayor presupuesto como las prácticas 10, 11 y 16.

### 1.2.2.1 Modelo de gestión ISO 50001

La norma internacional ISO 50001 establece los requisitos para la implantación de un sistema de gestión de la energía.

Esta norma Internacional tiene como objetivo mejorar continuamente (Figura 4) en el rendimiento energético por parte de las organizaciones, promoviendo el uso racional y eficiente de la energía para reducir los costes asociados y emisiones de gases de efecto invernadero, así como otros impactos ambientales relacionados [18].

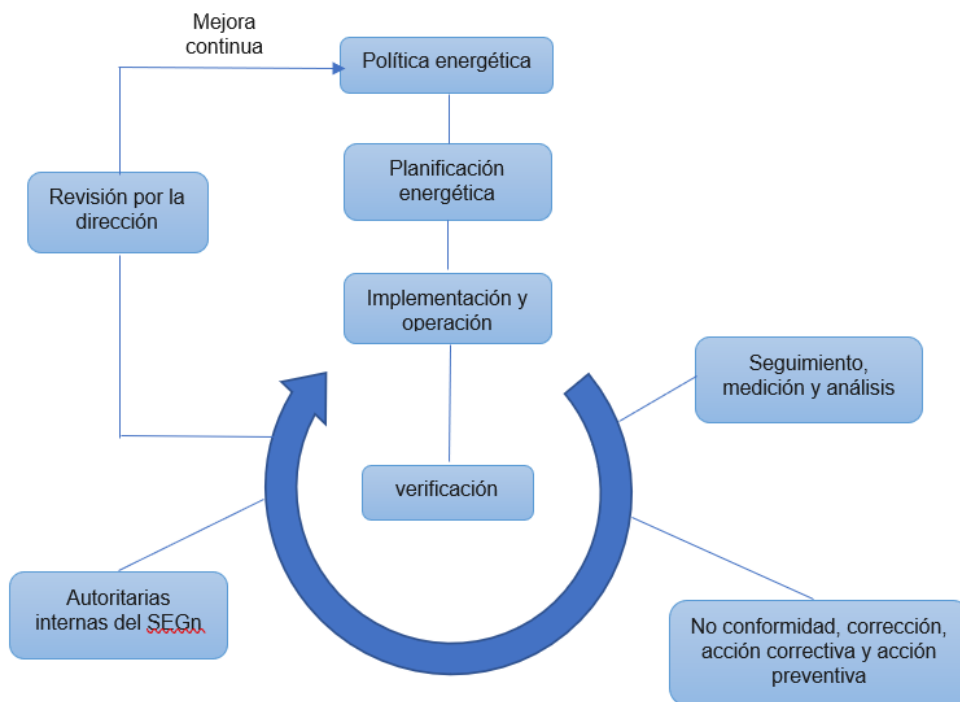


Figura 4. Ciclo de mejora continua

Fuente: [11]

El ciclo de mejora continua se resume en cuatro prácticas (Planificar – Hacer – Verificar – Actuar) e incorpora la gestión energética a las prácticas habituales de la organización [11], puede describirse brevemente en la Figura 5. Desde el planteamiento de objetivos, la puesta en marcha, la verificación durante y después del proceso; y la toma de acciones para mejorar la eficiencia de energía. El ciclo de mejora continua debe cumplir con cada uno de estos cuatro apartados para desarrollar un adecuado modelo de gestión.

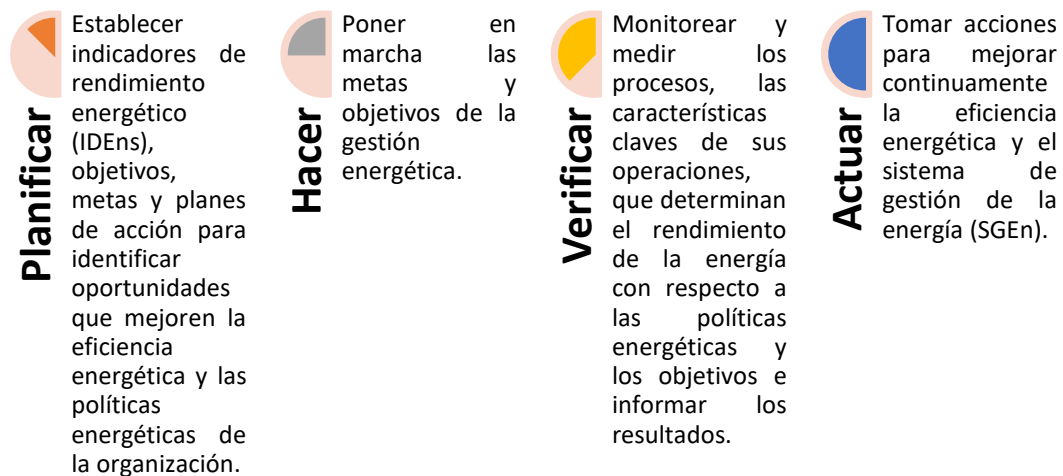


Figura 5. Ciclo PHVA

Fuente: [11]

Los elementos relevantes de lo que se habla en la norma se describen a continuación en la Figura 6, que funciones cumplen cada uno de ellos, siguiendo este procedimiento se cumple el ciclo PHVA [19].

Estos son: entregar tareas y responsabilidades a la dirección, establecer políticas energéticas y su grado de cumplimiento, realizar una planificación de cómo y que actividades se van a desarrollar para mejorar la eficiencia eléctrica en la organización, verificar continuamente que se cumpla con la planificación o realizar los cambios respectivos a la misma, tomar acciones correspondientes para cumplir el ciclo de mejora continua y finalmente desempeñar la revisión de este proceso cada cierto periodo de tiempo.

Realizando este proceso de forma cíclica, se obtiene un modelo básico de gestión de energía eléctrica usando las recomendaciones de la norma ISO 50001. Y es adaptable a la estructura organizacional del personal en el Hospital General de Latacunga.

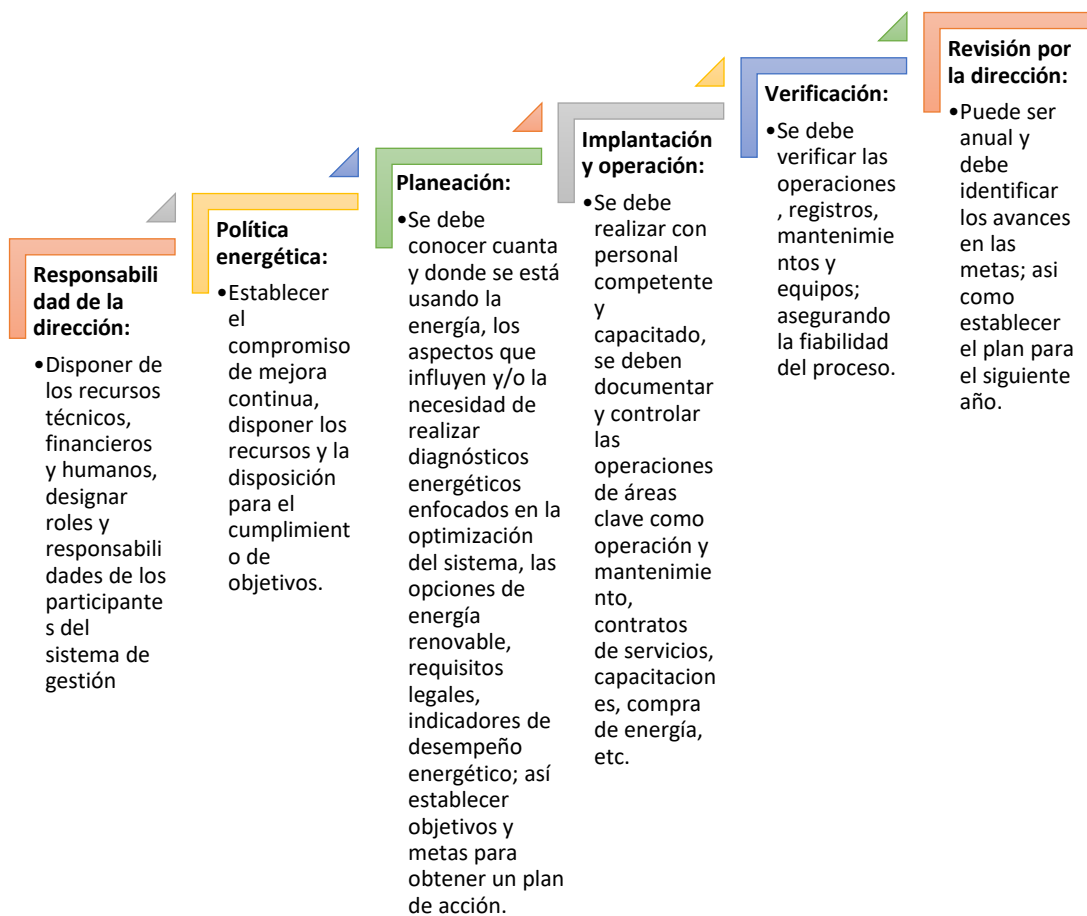


Figura 6. Elementos clave revisados por ISO 50001

Fuente: [19]

### 1.2.2.2 Auditoría energética

La auditoría energética es una de las primeras tareas a realizar en la implementación de un programa de control de costos de energía. Una auditoría energética consiste en un examen detallado de cómo una instalación utiliza la energía, cuánto paga por esa energía y, finalmente, propuestas recomendadas para cambios en las prácticas operativas o equipos que consumen energía y que serán rentables [16]- [17].

La auditoría energética a veces se denomina encuesta energética o análisis energético, por lo que no está obstaculizado por una auditoría de contraloría u otra institución.

### 1.2.2.3 Etapas del proceso de auditoría energética

La norma ISO 50002 complementa la ISO 50001, proporcionando una guía sobre cómo se debe realizar una auditoría energética, siendo uno de los pasos más

importantes para la gestión energética, en la Figura 7 se muestra un diagrama simplificado de cómo realizar la planificación de una auditoría.

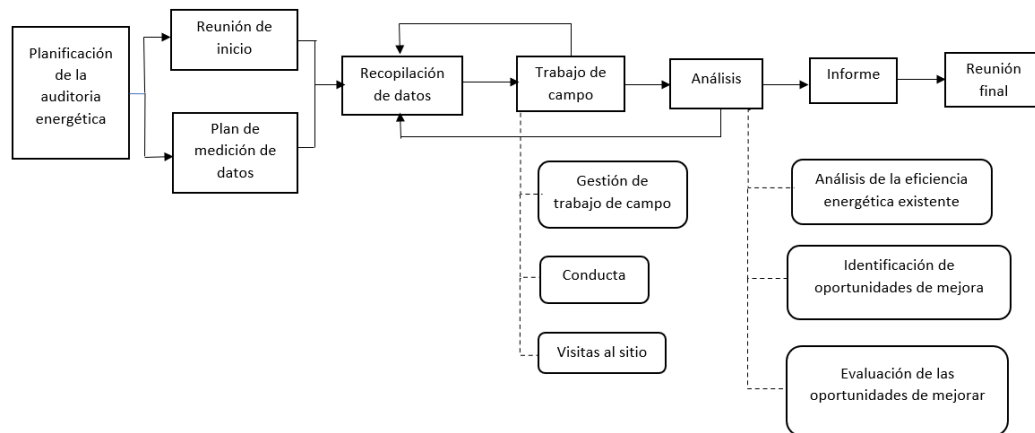


Figura 7. Planificación de la auditoría energética

Fuente: [20]

En base a la norma ISO 50002 que proporciona la orientación en el proceso de una auditoría energética, se describen las siguientes etapas [20]:

#### a. Planificación de la auditoría energética

Se debe definir, el objetivo de la auditoría, límite, objetivos, necesidades, expectativas, nivel de detalle requerido, período de tiempo para completar la auditoría; criterios para evaluar oportunidades de mejorar; compromisos de tiempo y otros recursos de la organización; los datos relevantes se pondrán a disposición antes de que comience la auditoría energética; entregables esperados y formato requerido del informe.

#### b. Plan de medición de datos

Se debe obtener la lista de los puntos de medición existentes y sus procesos asociados; equipos de medición adecuados, planificar la duración de la medición (única o registrada electrónicamente), frecuencia de adquisición para cada medición; evaluar el comportamiento de consumo energético de la empresa a lo largo del año; definir responsables para la toma de datos.

### **c. Reunión de inicio**

El objetivo de la reunión es informar a todas las partes sobre las metas de la auditoría, el alcance, el límite, nivel de detalle y acordar logística (inducciones de seguridad del sitio, acceso, normativa, etc.)

### **d. Recopilación de datos**

Se debe recopilar la lista de sistemas, procesos y equipos que consumen energía; características de los objetos auditados; datos actuales e históricos; planes futuros que afectan el uso de la energía; documentos de diseño, operación y mantenimiento; auditorías energéticas o estudios previos; tarifa actual o de referencia para el análisis económico; otros datos económicos relevantes.

### **e. Trabajo de Campo**

Gestión del trabajo de campo: el auditor deberá inspeccionar los objetos auditados; evaluar su uso de energía de acuerdo con el alcance, el límite y el objetivo de la auditoría; asimilar el impacto de las rutinas operativas y comportamiento del usuario en el rendimiento energético.

Conducta: el auditor deberá asegurar que; las mediciones y observaciones se realicen en circunstancias de operación normal; los datos históricos proporcionados sean del funcionamiento normal; la información de cualquier dificultad inesperada encontrada durante el trabajo sea notificada sin demora a la organización.

Visitas al sitio: el auditor debe solicitar a la entidad que una o más personas como guía durante las visitas al sitio según sea necesario; estas deberán tener las competencias y la autoridad para solicitar o ejecutar operaciones directas sobre procesos y equipos; identificar personal para instalar registradores de datos y equipos de monitoreo de energía durante las visitas al sitio; dar al auditor acceso a documentos relevantes.

### **f. Análisis**

General: el auditor deberá evaluar la confiabilidad de los datos, identificar las fallas o anomalías e interpretar si la información obtenida permite o no que el proceso de auditoría continúe; obtener el patrón histórico de rendimiento energético; utilizar

métodos de cálculo transparentes y técnicamente apropiados; someter los resultados del análisis a normativas de calidad o cualquier limitación regulatoria.

Identificación de oportunidades de mejora: el auditor debe identificar las oportunidades de mejora del rendimiento energético en base al análisis de datos y su experiencia; evaluar la tecnología de los objetos auditados en comparación con los más eficientes del mercado; proponer nuevas soluciones técnicas avanzadas y mejores prácticas de eficiencia.

Evaluación de oportunidades de mejora: el auditor evaluará el impacto de cada oportunidad en el rendimiento energético existente basándose en el ahorro de energía, ahorro financiero, inversiones necesarias, criterios económicos, otras ganancias no energéticas (como la productividad o el mantenimiento).

### **1.2.3 CALIDAD DE ENERGÍA**

La calidad de la energía, vagamente definida, es el estudio de los sistemas electrónicos de alimentación y puesta a tierra para mantener la integridad de la energía suministrada al sistema [21].

Dicho de otro modo, es la ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario. Manteniendo la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico [22].

#### **1.2.3.1 Regulaciones y normativas**

Las normas y regulaciones sirven para ejercer control sobre los indicadores energéticos, de manera que un conjunto de personas, organizaciones y regiones manejen los mismos parámetros, facilitando el uso y comercialización de energía [23].

##### **a. Regulaciones internacionales**

Existen normativas internacionales como la estándar IEEE 519 que define una calidad de energía aceptable, titulada "Prácticas y requisitos recomendados de IEEE para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica", la norma cubre los límites de las diversas perturbaciones de sistemas de distribución de energía [21].



Estándar IEEE 1159 relacionado con la medición de "eventos" de calidad de energía, titulado "Prácticas recomendadas de IEEE para el monitoreo de la calidad de la energía eléctrica", y como sugiere su título, esta norma cubre los métodos recomendados para medir los eventos de calidad de la energía.

Otras normas como estándar ANSI C84 que establece rangos de voltaje óptimos para 120V, son estas las más utilizadas en el análisis de calidad siempre y cuando no exista una normativa interna.

### 1.2.3.2 Regulación ARCERNNR 002/20: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica

Establece los indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica; define los procedimientos de medición, registro y evaluación a ser cumplidos por las empresas eléctricas de distribución y consumidores, según corresponda [24].

La regulación **ARCERNNR 002/20** contemplada en el anexo I, considera los siguientes aspectos mostrados en la Figura 8. Se presentan cuatro de los cuales se analizarán dos, presentes en un sistema eléctrico que son la calidad del producto y la calidad respecto al consumidor; el primero le corresponde asegurar a la empresa distribuidora y el segundo le corresponde gestionar al consumidor.

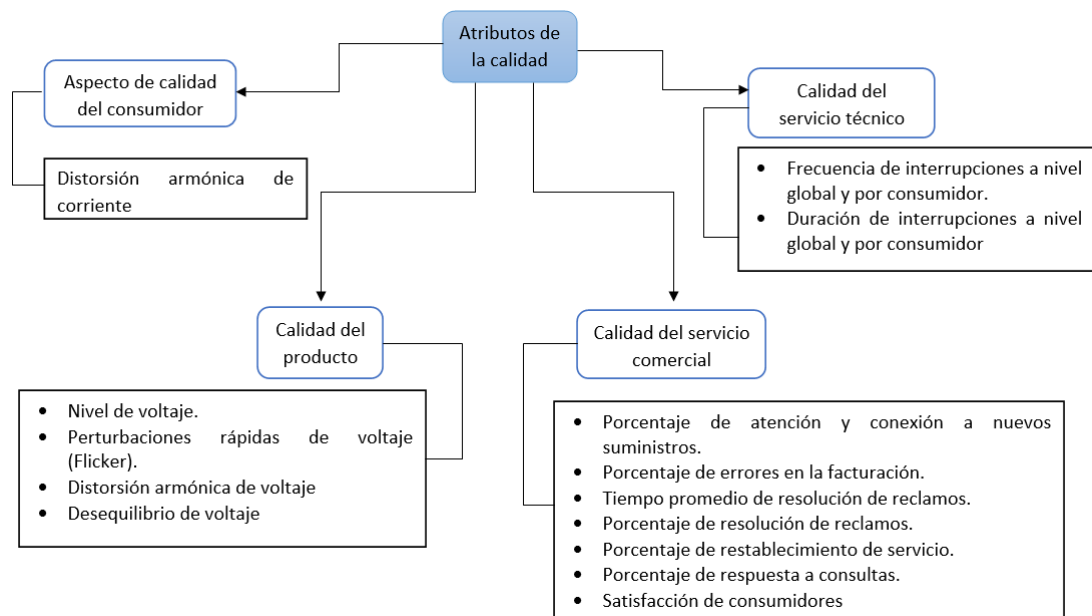


Figura 8. Atributos de la calidad según ACERNNR 002-20  
Fuente: [24]

## a. Calidad del producto

### Nivel de voltaje

Se determina mediante la ecuación 1, cumple con el estándar cuando el 95% o más de los registros, en cada una de las fases, en el periodo de medición de siete días continuos, si los valores registrados se encuentran dentro del rango de la Tabla 2, en el nivel de bajo voltaje que es 8%:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100[\%]$$

ecuación 1

Donde:

$\Delta V_k$ : Variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto k [V].

$V_k$ : Voltaje de suministro en el punto k, determinado como el promedio de las medidas registradas en un intervalo de 10 minutos [V].

$V_N$ : Voltaje nominal en el punto k [V].

Tabla 2. límites para el índice de nivel de voltaje

Nivel de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje	±5%
Medio voltaje	±6%
Bajo voltaje	±8%

### Perturbación rápida de voltaje (Flicker)

El flicker de corta duración ( $P_{st}$ ), se calcula mediante la ecuación 2, y cumple con la norma cuando el 95% o más de las mediciones realizadas en 7 días en intervalos de medición de 10 minutos, en cada una de las fases, son menor a 1:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0.1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}}$$

ecuación 2

Donde:

$P_{st}$ : Índice de severidad de flicker de corta duración [u].

$P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ : Nivele de efecto flicker que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del intervalo de medición [u].

### Distorsión armónica de voltaje

Se evaluará la distorsión armónica individual de voltaje y la distorsión armónica total de voltaje, conforme las *ecuación 3*, *ecuación 4* y *ecuación 5*; cumple con la norma cuando el 95% o más de los registros, en cada una de las fases, en el periodo de 7 días, son menores a los límites establecidos en la Tabla 3, dentro de los rangos de bajo voltaje que es el 8%:

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2}$$

ecuación 3

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} \times 100[\%]$$

ecuación 4

$$THD_k = \left[ \frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] \times 100[\%]$$

ecuación 5

Donde:

$V_{h,k}$ : armónica de voltaje h en el intervalo k de 10 minutos [V].

$V_{h,i}$ : Valor eficaz (rms) de la armónica de voltaje h (para h=2, 3,...,50), medido cada 3 segundos (i=1,2,...,200) [V].

$DV_{h,k}$ : Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica h (para h=2, 3,...,50) en el intervalo k de 10 minutos [%].

$THD_k$ : Factor de distorsión armónica total de voltaje [%].

$V_{h,1}$ : Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición [V].

Tabla 3. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)

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

### Desequilibrio de voltaje

El desequilibrio de voltaje en un punto del sistema de distribución se determinará mediante la ecuación 6; cumple con la norma cuando el 95% o más de los valores registrados, en el periodo de evaluación de 7 días continuos, es menor al 2% en todos los niveles de voltaje:

$$\text{Desequilibrio de Voltaje} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| \times 100[\%]$$

ecuación 6

Donde:

$V^-$ : Componente de secuencia negativa de voltaje, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos) en un intervalo de 10 minutos [V].

$V^+$ : Componente de secuencia positiva de voltaje, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos) en un intervalo de 10 minutos [V].

### b. Calidad responsabilidad del consumidor

#### Distorsión armónica de corriente

Se evaluará la distorsión armónica individual de corriente y la distorsión de demanda total, mediante las ecuación 7, ecuación 8 y ecuación 9; cumple con la norma cuando el 95% o más de los registros, en cada una de las fases, en el periodo de 7 días, son menores a los límites establecidos en la Tabla 4, donde el 20% de distorsión armónica de corriente es el máximo valor permitido en cualquier sistema eléctrico:

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2}$$

ecuación 7

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \times 100[\%]$$

ecuación 8

$$TDD_k = \left[ \frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] \times 100[\%]$$

ecuación 9

$I_{h,k}$ : Armónica de corriente h en el intervalo k de 10 minutos [A].

$I_{h,i}$ : Valor eficaz (rms) de la armónica de corriente h (para h= 2, 3, ..., 50), medido cada 3 segundos (para i=1,2, 3, ...,200) [A].

$DI_{h,k}$ : Factor de distorsión individual de corriente de la armónica h (para h=2, 3, ...,50) en el intervalo k de 10 minutos [%].

$TDD_k$ : Factor de distorsión de demanda total (armónicos de corriente) [%].

$I_{h,1}$ : Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de corriente (60 Hz) [A].

Tabla 4. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente

Nivel máximo de armónicos impares (% de la corriente máxima de demanda)						
$I_{cc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	$TDD$
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Todos los equipos están limitados a estos valores de distorsión de corriente, donde  $I_{cc}$ : corriente máxima de corto circuito en el punto común de acoplamiento; y,  $I_L$ : corriente máxima de carga a frecuencia fundamental (60 Hz).

### 1.2.3.3 Calidad de potencia

Los problemas de calidad de la energía parten de la interacción entre ésta y los equipos susceptibles. Lo que es potencia “buena” para un equipo puede ser potencia “mala” para otro.

Dos dispositivos o piezas de equipo idénticos pueden reaccionar de manera diferente a los mismos parámetros de calidad de energía debido a diferencias en su fabricación o tolerancia de componentes. Los dispositivos eléctricos son cada vez más pequeños y más sensibles debido a la proliferación de la electrónica [25].

Por ejemplo, un controlador electrónico del tamaño de una caja de zapatos puede controlar eficientemente el rendimiento de un motor de 1000 hp; mientras que el motor puede ser algo inmune a los problemas de calidad de la energía, el controlador no lo es. En algunos casos, los equipos eléctricos causan sus propios problemas de calidad de la energía.

La calidad de potencia ideal está representada por la forma de onda de tensión monofásica que se muestra en la Figura 9 y las formas de onda de tensión trifásicas que se muestran en la Figura 10.

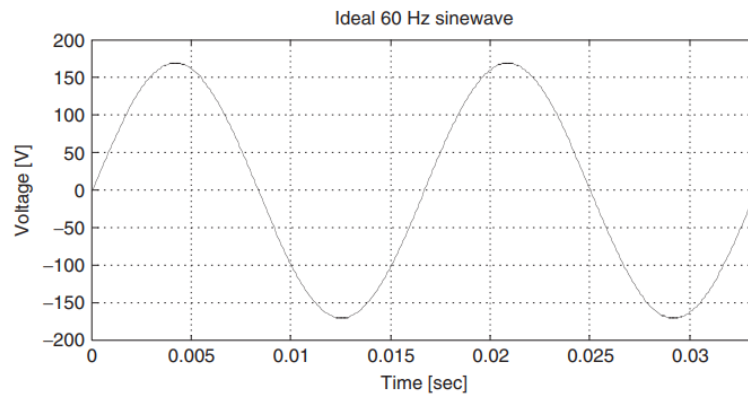


Figura 9. Forma de onda de tensión monofásica ideal. El valor pico es de 170 V, el valor rms es de 120 V y la frecuencia es de 60 Hz

Fuente: [21]

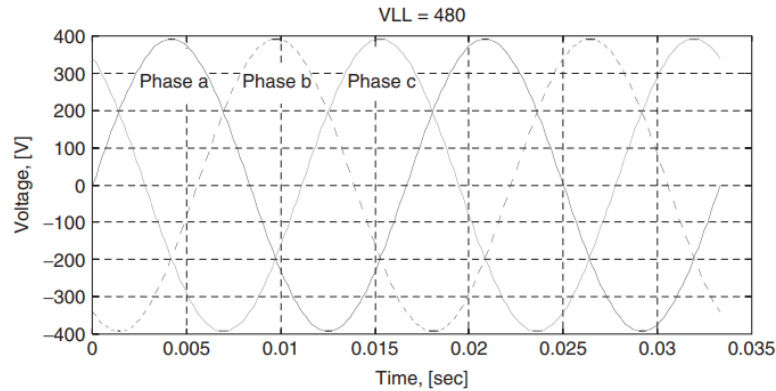


Figura 10. Una forma de onda de tensión trifásica ideal a 60 Hz con una tensión de línea a línea de 480 V rms. Se muestran los voltajes de línea-neutro de cada fase.

Fuente: [21]

Cuando los voltajes que se muestran en la Figura 9 y Figura 10 se aplican a cargas eléctricas, las corrientes de carga tendrán frecuencia y amplitudes que dependerán de la impedancia u otras características de la carga [21].

Si la forma de onda de la corriente de carga también es sinusoidal, la carga se denomina "lineal". Si la forma de onda de la corriente de carga está distorsionada, la carga se denomina "no lineal". La corriente de carga con forma de onda distorsionada puede producir distorsión del voltaje en el sistema de suministro, lo que es una indicación de mala calidad de energía.

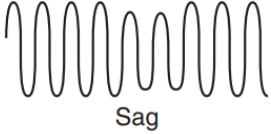
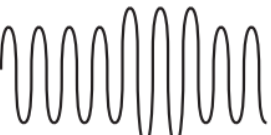
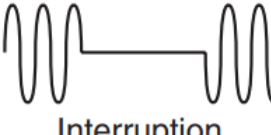
#### 1.2.3.4 Perturbaciones de los sistemas eléctricos

La mala calidad de la energía generalmente se identifica en las desviaciones de la forma de onda de voltaje del ideal de las Figura 9 y Figura 10, a las que se denominan perturbaciones de los sistemas eléctricos.


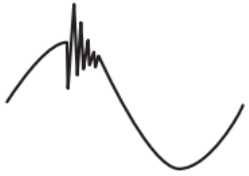

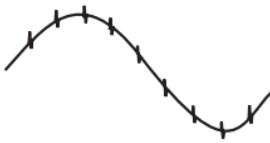
Antes del uso generalizado de equipos electrónicos de potencia, microprocesadores para control industrial y automatización en fábricas y oficinas, variaciones menores en la potencia no afectaban seriamente el funcionamiento de equipos convencionales. En estos días, los efectos de las interrupciones de energía son bastante costosos [26].

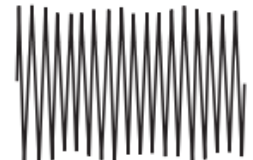

Las perturbaciones de un sistema eléctrico más comunes se muestran en la Tabla 5, las causas y posibles soluciones.

Tabla 5: Perturbaciones de potencia típicas

Disturbio	Descripción	Posibles Causas	Soluciones del lado de los servicios públicos	Soluciones del lado del cliente
 <p>Sag</p>	<p>Es una breve disminución en el voltaje de línea rms de 10 a 90 por ciento del voltaje de línea nominal. La duración de un hundimiento es de 0,5 ciclos a 1 minuto. Las fuentes comunes de caídas son el arranque de grandes motores de inducción y fallas de servicios públicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La caída de rayos.</li> <li>• Contacto con árboles, animales o con líneas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restaurador de voltaje dinámico.</li> <li>• Condensador estático.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acondicionador de línea.</li> <li>• Fuente de poder ininterrumpible.</li> </ul>
 <p>Swell</p>	<p>Es un breve aumento en el voltaje de línea rms de 110 a 180 por ciento del voltaje de línea nominal durante una duración de 0,5 ciclos a 1 minuto. Las fuentes de subidas de voltaje son fallas de línea y configuraciones de tomas incorrectas en los cambiadores de tomas en las subestaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallo en otra fase.</li> <li>• Rechazo de carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restaurador de voltaje dinámico.</li> <li>• Limitador de corriente de falla.</li> <li>• Descargador de sobretensiones de alta energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acondicionador de línea.</li> <li>• Regulador de voltaje.</li> <li>• Fuente de poder ininterrumpible.</li> </ul>
 <p>Interruption</p>	<p>Una interrupción se define como una reducción en el voltaje o la corriente de línea a menos del 10 por ciento del nominal, sin exceder los 60 segundos de duración.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fusible quemado.</li> <li>• Operación del interruptor en respuesta a una falla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disyuntor de estado sólido.</li> <li>• Condensador estático.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente de poder ininterrumpible.</li> <li>• Conjunto motor-generador.</li> </ul>



 <p>Impulsive transient</p>  <p>Oscillatory transient</p>	<p>Un transitorio impulsivo es una variación breve y unidireccional en el voltaje, la corriente o ambos. Estos transitorios pueden provocar el apagado o daño del equipo si el nivel de perturbación es lo suficientemente alto.</p> <p>Un transitorio oscilatorio es una breve variación bidireccional en el voltaje, la corriente o ambos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La caída de rayo.</li> <li>• Conmutación de servicios públicos.</li> <li>• Conmutación de cargas inductivas.</li> <li>• Conmutación de los bancos de capacitores.</li> <li>• Ferroresonancia del transformador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descargador de sobretensiones de alta energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acondicionador de línea.</li> <li>• Supresor de sobretensiones.</li> </ul>
 <p>Harmonic distortion</p>	<p>Cuando se alimenta una carga no lineal desde un voltaje de suministro de frecuencia de 60 Hz o 50 Hz, consume corrientes en más de una frecuencia, lo que da como resultado una forma de onda de corriente distorsionada.</p> <p>El análisis de Fourier de esta forma de onda la resuelve en su componente fundamental y diferentes armónicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargas no lineales.</li> <li>• Ferroresonancia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtrar.</li> <li>• Condensador estático.</li> <li>• Restaurador de voltaje dinámico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acondicionador de línea.</li> <li>• Filtrar.</li> </ul>
 <p>Noise</p>	<p>Señales eléctricas no deseadas (con un contenido espectral de banda ancha inferior a 200 kHz) que producen efectos no deseados en los circuitos de los sistemas de control.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cableado o conexión a tierra inadecuados del cliente.</li> <li>• Dispositivos electrónicos de potencia</li> <li>• Equipos de arco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtrar.</li> <li>• Transformadores de aislamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puesta a tierra y blindaje.</li> <li>• Acondicionador de línea.</li> <li>• Filtrar.</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargas con rectificadores de estado sólido</li> <li>• Fuentes de alimentación conmutadas</li> </ul>		
 <p>Voltage fluctuations</p>	<p>Las cargas que exhiben variaciones rápidas y continuas en la corriente de carga pueden causar variaciones de voltaje a las que se las conoce como “flicker” o perturbación rápida de voltaje 1.2.3.2 inciso b.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cicloconvertidores.</li> <li>• Hornos de arco.</li> <li>• Sistemas que consumen corriente que no está sincronizada con la frecuencia de la línea.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solucionar las fluctuaciones en la red</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulador de voltaje</li> </ul>
 <p>Long duration variations</p>	<p>Una subtensión “undervoltage” es una disminución de la tensión rms a menos del 90 % a la frecuencia de la red durante más de 1 min.</p> <p>Una sobretensión “overvoltage” es un aumento de la tensión rms a un nivel superior al 110 % a la frecuencia de la red durante más de 1 min.</p>	<p>Subtensión</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Al encender una carga grande.</li> <li>• Al apagar un banco de condensadores grande.</li> </ul> <p>Sobretensión</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Al apagar una carga grande.</li> <li>• Al energizar un banco de condensadores.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protecciones en fuentes de alimentación.</li> </ul>

Fuente: [21], [26]

Otras posibles estrategias de mitigación para la mala calidad de la energía y las recomendaciones para su aplicación se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Dispositivo de mitigación para corregir la calidad

<b>Dispositivo de mitigación</b>	<b>Aplicación de dispositivo</b>
Interruptor de transferencia de estado solido	Dispositivo utilizado junto con un suministro eléctrico alternativo.  Dependiendo de la velocidad y la calidad de la transferencia, este conmutador se puede utilizar en casos de interrupciones, bajadas, subidas y sobretensiones y bajas tensiones de larga duración. (Media y alta tensión)
Generador de reserva	Se utiliza un generador de reserva para suministrar energía eléctrica como alternativa a la energía normal suministrada por la empresa de servicios públicos. Se requiere un medio de transición.  Generadores se utilizan en casos de interrupciones.
Fuente de alimentación ininterrumpida (UPS)	El equipo UPS se puede utilizar en casos de interrupciones, caídas, subidas y fluctuaciones de voltaje.  También se puede lograr cierto éxito en casos de impulsividad y transitorios oscilatorios, sobretensiones y subtensiones de larga duración y ruido.
Dispositivo de almacenamiento superconductor (SSD)	El dispositivo utiliza el almacenamiento de energía dentro de un imán creado por el flujo de corriente continua.  Utilizado para interrupciones y caídas.
Conjuntos de motor-generador (MG)	Equipo utilizado en todos los casos excepto cortes de larga duración.  El motor impulsa el generador que aísla la potencia de salida de la fuente de entrada.
Arrancadores de voltaje reducido	Estos dispositivos se utilizan para reducir la irrupción de corriente en el arranque del motor y, por lo tanto, disminuir la caída de voltaje asociada con esa irrupción de corriente.
Dispositivos de contactor de paso	Desarrollar tecnología utilizada para mantener un voltaje constante a través de las bobinas del contactor y, por lo tanto, superar una caída de voltaje.

Transformadores ferroresonantes (CVT)	Estos dispositivos utilizan tecnología ferroresonante y saturación de transformador para tener éxito en casos de caídas, subidas y voltajes bajos de larga duración.
Dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD)	Dispositivo utilizado para abordar transitorios impulsivos.  Cierto éxito con transitorios oscilatorios.
Transformadores de aislamiento ciego	Estos dispositivos son efectivos en casos de transitorios oscilatorios y ruido.  Cierto éxito en casos de transitorios impulsivos.
Reactores de línea	Estos dispositivos son efectivos en casos de transitorios oscilatorios.
Transformadores de factor K	Dispositivo utilizado donde pueden estar presentes los armónicos.
Filtros armónicos	Dispositivo utilizado para proporcionar una ruta de baja impedancia para corrientes armónicas.  Reactores utilizados junto con condensadores (corrección del factor de potencia)
Cable de fibra óptica	Alternativa al cableado de cobre donde las comunicaciones pueden ser susceptibles al ruido.
Aisladores Ópticos	Complemento al cableado de cobre donde las comunicaciones pueden ser susceptibles al ruido.
Filtros de ruido	Dispositivo utilizado para pasar una señal de potencia de 60 Hz y bloquear frecuencias no deseadas (ruido).

Fuente: [21]

### 1.2.3.5 Armónicos

A principios del siglo XIX, el matemático francés Jean Baptiste Fourier formuló que una función periódica no sinusoidal de una frecuencia fundamental puede expresarse como la suma de funciones sinusoidales de frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental. En otras aplicaciones, la función periódica podría referirse a la transmisión de radiofrecuencia, el flujo de calor a través de un medio, las vibraciones de una estructura mecánica, una función sinusoidal de voltaje o corriente que depende del tiempo [25].

Los armónicos son voltajes sinusoidales o corrientes que tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, generalmente 60 Hz o 50 Hz en sistemas eléctricos de potencia [26].

La distorsión armónica es una preocupación creciente debido a la creciente aplicación de equipos electrónicos de potencia que poseen cargas que generan armónicos como los nombrados en la Figura 11, en el caso del hospital la mayor parte de las cargas son similar a la primera y tercera categoría.

Los dispositivos productores de armónicos no lineales se pueden modelar como fuentes de corriente que inyectan corrientes armónicas en el sistema de potencia, siendo sus principales fuentes los mostrados en la Figura 12, aplicando para el hospital los señalados.

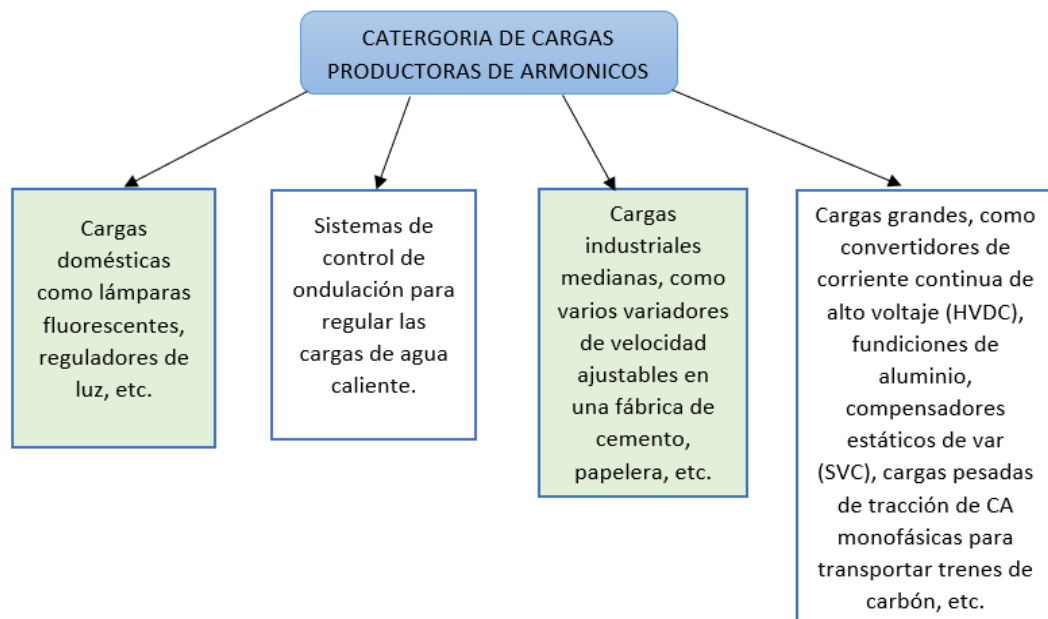


Figura 11. Cargas productoras de armónicos

Fuente: [26]

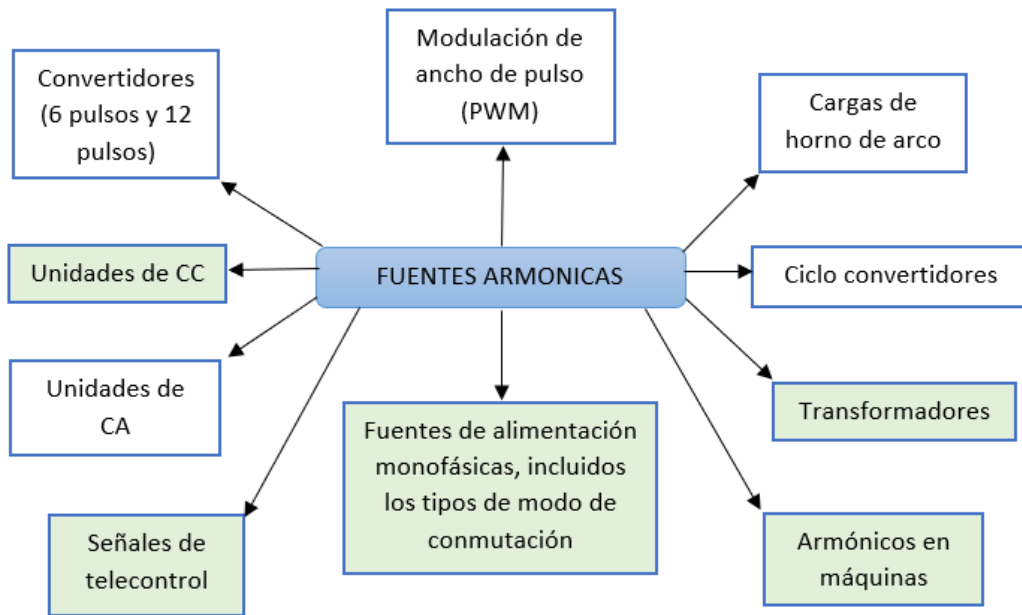


Figura 12. Fuentes armónicas

Fuente: [26]

Causando efectos en los equipos como los mencionados en la Figura 13 y la Tabla 7.

Presentes en el hospital las señaladas:

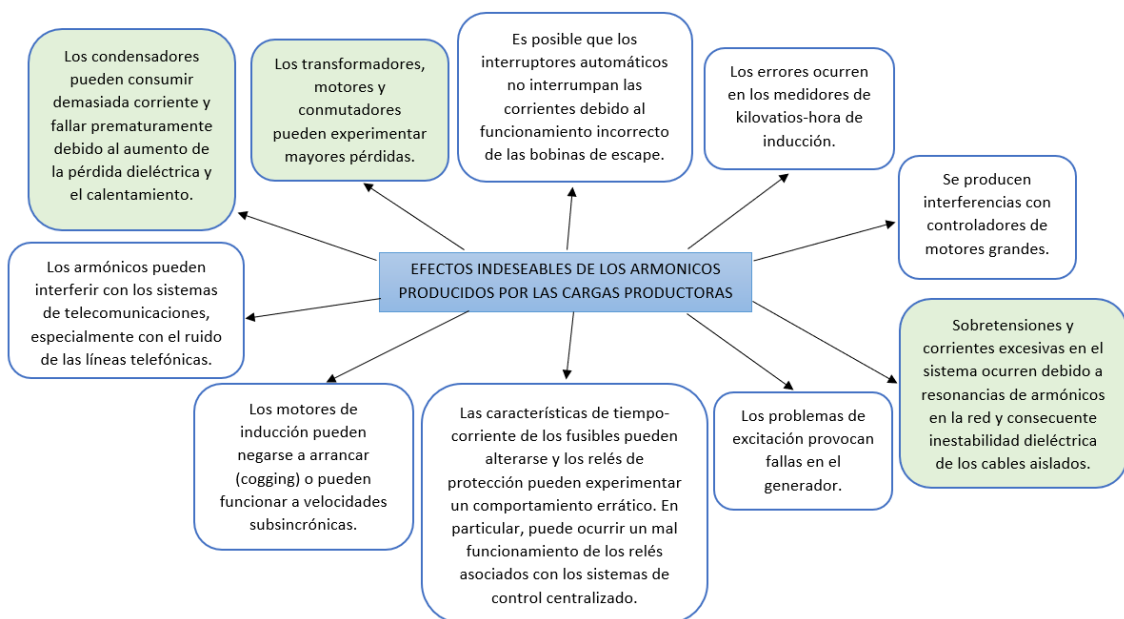


Figura 13. Efectos de los armónicos en los equipos

Fuente: [26]

Tabla 7. Efectos de los armónicos en los equipos

EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS	CAUSAS	CONSECUENCIAS
---------------------------	--------	---------------

En los condensadores	Posibilidad de que entren en resonancia con la instalación.	Amplificación de los armónicos y reducción de su vida útil.
		Aparición de armónicos pares.
En los conductores	El efecto pelicular "skin" hace que la corriente circule por la zona superficial del conductor	Sobrecalentamiento de los conductores.
	Aumento de la Irms.	Disparo intempestivo de diferenciales y/o de magnetotérmicos.
	Saturación de las líneas	Necesidad de ampliar la sección por fase.
En el conductor neutro	Las componentes homopolares no se cancelan entre ellas.	Sobrecalentamiento de los conductores.
		Necesidad de ampliar la sección del neutro a 1,5 veces la de la fase.
En los transformadores	Aumento de las pérdidas por un aumento de corriente	Pérdida de potencia disponible (factor k de desclasificación).
	Posibilidad de saturación del trafo.	Posible fuente generadora de armónicos, concretamente del 3er armónico.
En los motores	Aparición de un campo magnético rotatorio.	Puede frenar o acelerar los motores.
En equipos electrónicos	La insuficiente inmunidad de éstos frente a los armónicos.	Destrucción de las fuentes de alimentación.

Fuente: [27]

De acuerdo a los procesos que practica la empresa, predominan cierto orden de armónicos que se muestran en las Tabla 8 y Tabla 9. En esta última se encuentra los armónicos que predominan en un hospital, que son el tercero, quinto y séptimo armónico.

Tabla 8. Orden de los armónicos predominantes en el sector industrial

SECTOR INDUSTRIAL					
Actividad	Procesos	3er armónico	5º armónico	7º armónico	con tiristores
Metalúrgico	Soldadura por puntos y/o baños galvánicos.				
	Estampación, bombeo, corte por láser.				

	Fresado, torneado, pulido.				
Cementera, canteras, minería	Triturado, moleteado, transporte, elevación, ventilación.				
Siderurgia	Hornos de inducción.				
	Laminados, trefilados				
Agroalimentaria, farmacia, refinería	Filtración, concentración, bombeo				
Maderero	Transporte, serrado				
Plásticos	Extrusión, termoconformado				

Fuente: [27]

Tabla 9. Orden de los armónicos predominantes en el sector terciario

SECTOR TERCIARIO					
Actividad	Procesos	3er armónico	5° armónico	7° armónico	con tiristor
Centros comerciales	Informática, iluminación, climatización, montacargas				
Hospitales, residencias	Informática, iluminación, climatización, ascensores, equipos electrónicos				
Hostelería	Informática, iluminación, climatización, ascensores, equipos electrónicos				
Oficinas	Informática, iluminación, climatización, ascensores, equipos electrónicos				
Clubs deportivos	Informática, iluminación, climatización, ascensores, equipos electrónicos				

Fuente: [27]



### 1.2.3.6 Potencia eléctrica en sistemas eléctricos trifásicos basada en IEEE STD.1459-2010

Un sistema eléctrico trifásico a 4 hilos no lineal con voltajes asimétricos y corrientes desequilibradas, corresponde al caso más genérico presentado en la IEEE Std. 1459-2010. Incluye a los sistemas eléctricos, cuyas tensiones son asimétricas y distorsionadas, y cuyas corrientes son desequilibradas y distorsionadas [28]. A continuación, se presenta un resumen de las ecuaciones utilizadas en el cálculo de potencias totales, efectivas y no fundamentales. Ecuaciones que serán utilizadas para determinar las pérdidas de potencia en los transformadores del hospital.

#### **Voltaje efectivo fundamental**

Corresponde al valor rms de la tensión fundamental de secuencia positiva, como explica la ecuación 10. Que será uno de los valores medidos por el analizador de red.

$$V_{e1} = V^+_1$$

ecuación 10

Donde:

$V_{e1}$ : Voltaje efectivo fundamental [V].

$V^+_1$ : Voltaje fundamental de secuencia positiva[V].

#### **Voltaje efectivo no fundamental**

El voltaje efectivo no fundamental  $V_{eH}$  está conformado por todas las componentes armónicas de voltaje y puede calcularse a partir de la ecuación 11.

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V^2_{aH} + V^2_{bH} + V^2_{cH}) + (V^2_{abH} + V^2_{bcH} + V^2_{caH})]}$$

ecuación 11

Donde:

$V_{eH}$ : Voltaje efectivo no fundamental [V].

$V_{aH}, V_{bH}$  y  $V_{cH}$ : Son los voltajes rms armónicos y cuadráticos de fase-neutro medidos en el pcc [V].

$V_{abH}, V_{bcH}$  y  $V_{caH}$ : Son los voltajes rms armónicos y cuadráticos de línea a línea en el pcc [V].

### **Voltaje efectivo**

El voltaje efectivo  $V_e$  esta conformado por  $V_{e1}$  y por  $V_{eH}$  de acuerdo con la ecuación 12.

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2}$$

ecuación 12

Donde:

$V_e$ : Voltaje efectivo [V].

### **Corriente efectiva fundamental**

Corresponde al valor rms de la corriente fundamental de secuencia positiva, como explica la ecuación 13. Que será uno de los valores medidos por el analizador de red.

$$I_{e1} = I_1^+$$

ecuación 13

Donde:

$I_{e1}$ : Corriente efectiva fundamental [A].

$I_1^+$ : Corriente fundamental de secuencia positiva [A].

### **Corriente efectiva no fundamental**

La corriente efectiva no fundamental  $I_{eH}$  esta conformada por todas las componentes armónicas de corriente. De acuerdo a la ecuación 14.

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3}(I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2)}$$

ecuación 14

Donde:

$I_{eH}$ : Corriente efectiva no fundamental [A].

$I_{aH}$ ,  $I_{bH}$  e  $I_{cH}$ : Son las corrientes rms armónicas y cuadráticas por fase [A].

$I_{nH}$ : Es la corriente rms armónica y cuadráticas del neutro [A].

### Corriente efectiva

La corriente efectiva  $I_e$  esta conformado por  $I_{e1}$  y por  $I_{eH}$  conforme a la ecuación 15.

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2}$$

ecuación 15

Donde:

$I_e$ : Corriente efectiva [A].

### Potencia efectiva

En teoría  $S_e$ , representa todos los fenómenos físicos que pueden ocurrir en el sistema de potencia, incluidas las pérdidas en el conductor del neutro en un sistema trifásico de cuatro hilos, también el fenómeno de desequilibrio. Se obtiene de acuerdo a la ecuación 16. Este es uno de los valores que serán registrados en el analizador de red, con el cual se calculará la potencia armónica desperdiciada.

$$S_e = 3 \cdot V_e \cdot I_e$$

ecuación 16

Descomponiendo la potencia efectiva en sus componentes de potencia efectiva fundamental y potencias efectiva no fundamental, se obtienen la ecuación 17.

$$S_e^2 = 9(V_{e1}^2 + V_{eH}^2)(I_{e1}^2 + I_{eH}^2)$$
$$S_e^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 + (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2$$

ecuación 17

El primer término de la ecuación 17 es  $S_{e1}$  correspondiente a la potencia efectiva fundamental y el resto de términos componen la potencia aparente no fundamental  $S_{eN}$ , como se muestra en la ecuación 18.

$$S^2_e = S^2_{e1} + S^2_{eN}$$

ecuación 18

$$S^2_{eN} = (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2$$

ecuación 19

Los términos que aparecen en  $S_{eN}$  de la ecuación 19 están definidos en la IEEE Std. 1459-2010. El primer término es la potencia debida a la distorsión de corriente  $D_{eI}$  (ecuación 20), cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por las corrientes no fundamentales.

$$D^2_{eI} = (3V_{e1}I_{eH})^2$$

ecuación 20

El segundo termino es la potencia debida a la distorsión armónica de voltaje  $D_{eV}$  (ecuación 21), cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por los voltajes no fundamentales.

$$D^2_{eV} = (3V_{eH}I_{e1})^2$$

ecuación 21

El tercer termino es la potencia armónica aparente  $S_{eH}$  (ecuación 22), cuantifica los fenómenos de potencia eléctrica provocados por los voltajes y corriente no fundamentales. Está compuesto por la potencia activa armónica  $P_H$  y la potencia aparente armónica de distorsión  $D_{eH}$ .

$$S^2_{eH} = P^2_H + D^2_{eH} = (3V_{eH}I_{eH})^2$$

ecuación 22

$P_H$  es una potencia activa considerada ineficiente debido a que proviene de un fenómeno ineficiente y provoca perdidas en la carga y en el sistema eléctrico de potencia:

### 1.2.3.7 Analizador de calidad Fluke 435 S-II

El analizador proporciona un conjunto de herramientas y métodos de medición para validar el rendimiento del sistema de energía eléctrica [29]. Se miden simultáneamente múltiples variables (Figura 14) y se muestran en un formato que describe el estado general de la calidad de la energía. Los datos se pueden obtener

como valores digitales simples, gráficos de tendencias (para una visualización rápida de los cambios a lo largo del tiempo), formas de onda o diagramas fasoriales. También se pueden analizar y organizar en forma tabular. Los datos detallados de eventos permiten ver la magnitud, la duración y el momento de las perturbaciones para correlacionar rápidamente los problemas que ocurren en las instalaciones.

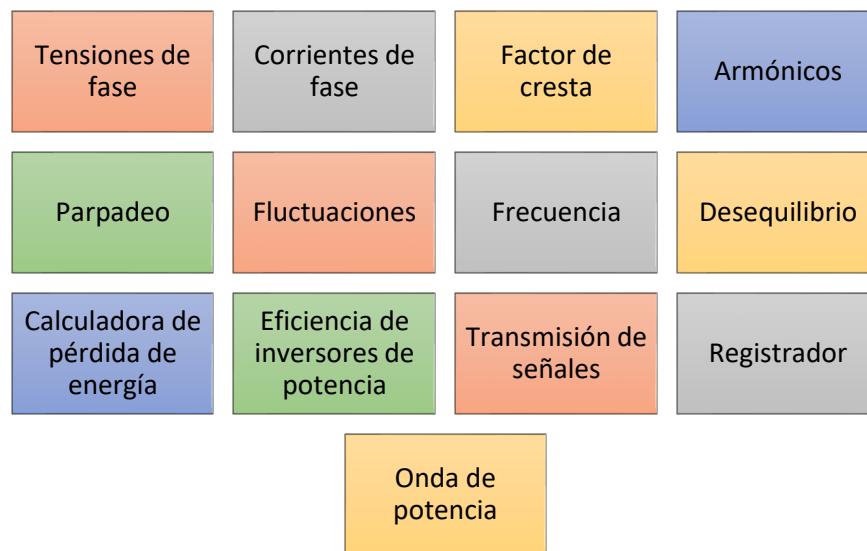


Figura 14. Variables eléctricas y modos de medición por FLUKE 435 SII

Fuente: [29]

### 1.3 Fundamentación metodológica

#### 1.3.1 Tipo de investigación

Para alcanzar los objetivos del proyecto se emplea una **Investigación de campo**, misma que permite el uso de instrumentos de medición y análisis de calidad (Analizador de red) en los transformadores del Hospital General de Latacunga, obteniendo los datos del comportamiento del sistema eléctrico como voltajes, corrientes, potencias, armónicos, entre otras perturbaciones; con el fin de determinar anomalías en el sistema que estén causando el desperdicio de energía.

#### 1.3.2 Métodos de investigación

Se utiliza el método **cuantitativo**, el cual permite el uso de estrategias de obtención (instrumentos de recolección y medición de datos) y análisis de información numérica (normativas, límites numéricos, fórmulas establecidas, etc).

Para obtener los datos se utiliza un analizador de red FLUKE 435 SII, datos que serán analizados a través procedimientos estadísticos usando fórmulas conforme a la norma ARCERNNR 002-20 para determinar las magnitudes que no se encuentran dentro de la norma y proceder al análisis de las respectivas correcciones.

Se utilizarán fórmulas para determinar valores numéricos que dimensionen la alternativa de solución y el posible ahorro de energía.

### **1.3.3 Técnicas de recolección de datos**

#### **1.3.3.1 Observación**

Se realiza una visita general y una visita técnica a las instalaciones para deducir cómo funciona el sistema eléctrico, definir las rutinas de operación y mantenimiento e identificar alguna anomalía visible.

#### **1.3.3.2 Entrevista**

Se requiere de reuniones constantes con el personal de mantenimiento y personal encargado de la logística y documentación, para mantener informadas a las partes interesadas; en las mismas reuniones se requiere conocer la existencia de registros, información histórica, documentos de auditorías anteriores, etc. La guía de entrevista se presenta en el Anexo B

#### **1.3.3.3 Análisis documental**

Se efectúa un análisis sobre la información histórica documentada, como diagramas eléctricos, datos de construcción de las instalaciones, inventarios de los objetos auditados, dossier de calidad, etc.

#### **1.3.3.4 Medición**

Con el analizador de red se miden por un lapso de 7 días, con toma de datos cada 10 minutos las siguientes magnitudes:

- Valores rms: voltajes fase-neutro, voltajes fase-fase, corrientes fase-neutro.
- Frecuencia

- desbalance de voltaje y corriente
- Potencias: activa, reactiva, aparente, factor de potencia, factor de desplazamiento.
- Energía consumida
- Fluctuaciones de voltaje: fluctuación rápida de voltaje (Pst, Pstmin, Plt).
- Armónicos: THD (voltaje), TDD (corriente), armónicos desde orden 1 hasta orden 50.
- Eventos: perturbaciones que degeneran la pureza de la onda.

#### **1.3.4 Procedimientos empleados para la obtención**

Para el análisis de eficiencia energética basado en la norma ISO 50001 se requiere de la ejecución de una auditoría energética, cuyo procedimiento se detalla en el Anexo A, donde se incluyen desde la reunión inicial hasta la presentación del informe final de la auditoría.

#### **1.3.5 Análisis de la información**

Se realiza una estadística del comportamiento de las magnitudes medidas usando las fórmulas y límites de calidad establecidos en la norma ARCERNNR 002-20, para determinar las respectivas acciones correctivas.

### **1.4 Conclusiones Capítulo I**

Se concluyó realizar una auditoría energética eléctrica por medio de un análisis de calidad de energía, este es el paso más importante en un análisis de eficiencia energética, puesto que comprende todo el trabajo de campo, la obtención y el análisis de datos.

Se utilizarán las normativas ISO 50001 e ISO 50002 y regulación ARCERNNR 002-20, que son instrumentos de gran utilidad para planificar y mantener un buen control sobre el desempeño energético y uso racional de energía.

Muchas de las perturbaciones que ocasionan daños sobre los equipos son los armónicos, siendo el más perjudicial el de tercer orden, el cual está presente en las instalaciones eléctricas de un hospital.



## **CAPÍTULO II. PROPUESTA**

### **2.1 Título del proyecto.**

Análisis de eficiencia energética de los principales sistemas eléctricos del hospital general de Latacunga.

### **2.2 Objetivo del proyecto.**

Analizar la eficiencia de energía eléctrica de los principales transformadores de distribución de bajo voltaje del Hospital General de Latacunga por medio de una auditoria energética para formular un plan estratégico de reducción el consumo eléctrico.

### **2.3 Descripción de la propuesta.**

Para alcanzar los objetivos se propone realizar un plan de gestión energética en las instalaciones del Hospital General de Latacunga, tomando como base las recomendaciones de la norma ISO 50001. Para seguir un proceso de análisis de eficiencia energética se toma como referencia la norma ISO 50002.

El primer paso a realizar es mantener una entrevista con el personal encargado para establecer las metas del trabajo, solicitar información histórica relevante con el proyecto, datos de interés sobre las instalaciones y agendar una visita técnica.

El Hospital General de Latacunga, está catalogado como edificio público según clasificaciones de análisis energético. Su consumo eléctrico no depende únicamente ciertos objetos, sino que son un conjunto numeroso de equipos médicos, equipos auxiliares, iluminación, que su uso conjunto representan una gran demanda de energía, resulta poco viable el aislar objetos de mayor consumo y resolver el problema individualmente.

Con este análisis se propone una revisión sobre la calidad de energía que está manejando el hospital, así determinar los problemas de forma general, que puedan contribuir enormemente a la reducción de consumo, por ende, se instala un

anализador de red FLUKE 435 SII en el secundario de los tres transformadores que distribuyen la energía hacia los tableros de control y distribución; se realiza una medición y registro de datos durante siete días, tomando los datos cada diez minutos, como estipula la normativa de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos No Renovables (ARCERNNR 002-20).

Una vez obtenidos los datos se procede al análisis de las magnitudes para identificar anomalías, consecuentemente se realiza un cálculo estadístico de las magnitudes medidas para identificar si se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma.

Con las anomalías identificadas se procede a buscar alternativas de corrección de calidad de potencia, estos pueden ser los mencionados en la Tabla 6. Finalmente se elabora un informe técnico económico sobre la viabilidad de instalación de los equipos propuestos.

## **2.4 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados**

### **2.4.1 Descripción del entorno**

El Hospital General de Latacunga o Hospital General Hermanas Páez se encuentra en la ciudad de Latacunga, en la parroquia la matriz, en las calles Hermanas Páez y 2 de mayo, a 2919 metros sobre el nivel del mar, oscilando una temperatura entre los 10°C y 22°C. Consta de diversas edificaciones construidas a lo largo del tiempo, de las que destacaremos tres secciones vistas en la Figura 15.

La sección 1 vista en la Figura 16, es la construcción inaugurada en 1959, inicialmente contaba con cuatro especialidades, por lo que se entiende que no fue diseñada para un alto incremento de potencia instalada, actualmente el consumo de esta sección es mayormente por iluminación y equipos de cómputo.

La sección 2 vista en la Figura 17, es la construcción inaugurada en el año 2018, esta cuenta con la mayor parte de las especialidades médicas, mayor afluencia de pacientes, mayor número de equipos médicos e iluminación, por ende, representa la sección de mayor consumo de energía eléctrica.

Estas secciones 1 y 2 se encuentran asociadas a una acometida, representada por un medidor de la empresa ELEPCO S.A.

Finalmente, la sección 3 es una construcción de una planta, que es utilizada únicamente por el área administrativa, que cuenta con un medidor independiente.

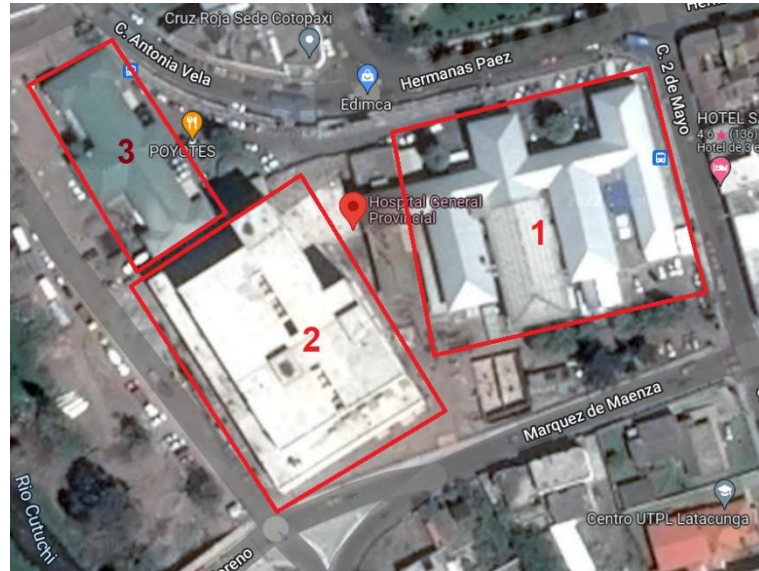


Figura 15. Croquis del Hospital General de Latacunga

Fuente: Sandra Chasiluisa

La sección 1, también llamado bloque A, se encuentra asociado al transformador 2. Este se cuenta con la carga instalada en el edificio antiguo del hospital.



Figura 16. Sección 1

Fuente: Ministerio de Salud Publica

La sección 2, también llamado bloque B, se encuentra asociado al transformador 1. A este se encuentra conectado a la carga del edificio nuevo del hospital, en donde se encuentran la mayor parte de los equipos médicos.



Figura 17. Sección 2

Fuente: Ministerio de Salud Pública

### 2.4.2 Gestión energética según ISO 50001

Cada organización debe implantar programas de administración de energía y designar un coordinador. Sin embargo, debido a las siguientes barreras, no es posible acoger la norma por completo.

**Tecnológicas:** el hospital no cuenta con los equipos de medición necesarios para el seguimiento de un programa de gestión energética como son analizador de red, luxómetro, etc.

**Corporativas:** cada empleado del hospital desempeña un rol y sus respectivas actividades acorde a su contrato, al implantar un programa de eficiencia energética se requiere de un gran compromiso por parte del personal directivo y empleados, lo que significa que cada uno de estos adquiriría más responsabilidades, o en su defecto, contratar nuevo personal especializado en el área.

**Laborales:** el hospital es una entidad pública, por lo cual los empleados y el personal administrativo tienden a cambiar constantemente, lo que perjudica la estabilidad, seguimiento y mejora de un programa de eficiencia.

Por estos motivos se recomienda el uso del modelo de gestión presentado en la Tabla 10, basado en ISO 50001.

Tabla 10. Modelo de gestión energética sugerido al Hospital General de Latacunga

	<b>Responsable</b>	<b>Actividades</b>
<b>Planificar</b>	Director del departamento de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Designar un gestor de energía (jefe de mantenimiento).</li> <li>• Gestionar los recursos técnicos y económicos para efectuar el</li> </ul>

		<p>proceso como si lo hiciera con el material o mano de obra.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Informar a los departamentos involucrados del proceso a realizarse.</li> </ul>
<b>Hacer</b>	Gestor de energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitorear y reportar el consumo energético.</li> <li>• Designar personal de auditoria energética, conjunto con los recursos para su ejecución.</li> <li>• Asegurar el suministro de energía.</li> </ul>
	Encargado de auditoria energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recopilar información acerca del consumo de energía (auditorias pasadas, registros de mantenimientos, planillas de consumo, etc)</li> <li>• Informar al gestor de energía de las actividades a realizar y los resultados.</li> <li>• Realizar el informe de auditoría.</li> <li>• Proponer correcciones.</li> </ul>
	Director del departamento de mantenimiento	<p>Proponer buenas practicas de ahorro de energía que no implique modificar la rutina de trabajo, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proponer a los empleados un fondo de pantalla negra, ya que la energía consumida por los otros colores es mayor.</li> <li>• Proponer siempre colores claros para las paredes para dispersar la iluminación reduciendo la necesidad de luz artificial</li> </ul>
<b>Verificar</b>	Gestor de energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analizar el informe de auditoría y las propuestas de mejora.</li> <li>• Informar los resultados al director de departamento.</li> </ul>
<b>Actuar</b>	Director del departamento de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisar la viabilidad de las propuestas correctivas.</li> <li>• Aprobar o gestionar la aprobación de implantar las propuestas correctivas.</li> </ul>

Fuente: Sandra Chasiluisa

### 2.4.3 Auditoria energética

La persona o equipo designado a la auditoria energética está encargado del proceso de gestión de energía desde la recolección de datos hasta la presentación de un

informe técnico económico de mejoras, para alcanzar dichos objetivos se realizan las actividades a continuación, resumidas en el Anexo A.

#### 2.4.3.1 Planificación de auditoría energética

En el Anexo B, se encuentra detallado el informe de planificación de auditoría energética, en la Tabla 11, se muestra un resumen sobre este proceso.

Tabla 11. Planificación de auditoría energética

<b>Objetivo</b>	Auditar los principales transformadores eléctricos de HGL
<b>Nivel de detalle</b>	2
<b>Periodo de tiempo</b>	6 meses
<b>Criterios a evaluar</b>	Viabilidad técnico económica
<b>Compromiso de la institución</b>	Pones a disposición la información y personal
<b>Datos relevantes</b>	Planillas eléctricas, planos eléctricos, inventarios de equipos eléctricos.
<b>Entregables esperados</b>	Informe de auditoría e informe económico

Fuente: Sandra Chasiluisa

#### 2.4.3.2 Plan de medición de datos

Antes de realizar el trabajo de campo en la medición de variables eléctricas, es necesario conocer cómo se encuentra funcionando el sistema eléctrico, donde se evalúan los puntos de la Tabla 12 para planificar la medición de datos.

Tabla 12. Plan de medición de datos

<b>Diseño eléctrico de la empresa</b>	Se identifican brevemente los equipos principales del sistema eléctrico. Dado que es una instalación para brindar servicios hospitalarios, cuenta con más de 1000 equipos de consumo eléctrico.
<b>Lista de puntos de medición</b>	Dado que no es viable analizar cada uno de los equipos de consumo eléctrico, se decide realizar un análisis de calidad de energía, donde se analizan todo el sistema en general. Tomando como puntos de medición los secundarios de los tres transformadores de bajo voltaje del hospital.
<b>Equipos de medición adecuados</b>	Analizador de red 435 FLUKE SII, multímetro.

<b>Responsable de las mediciones</b>	Sandra Chasiluisa
--------------------------------------	-------------------

Fuente: Sandra Chasiluisa

### **2.4.3.3 Reunión de inicio**

Se informa sobre cómo se realizará el proceso, la información requerida para el análisis, donde serán los puntos de medición, el equipo a utilizar, personal requerido para la visita técnica y la fecha de la visita técnica.

### **2.4.3.4 Recopilación de datos**

#### **Descripción del sistema eléctrico**

Las instalaciones eléctricas en baja tensión constituyen desde la salida de los bornes de baja tensión de los transformadores hasta llegar a todas y cada una de las salidas y cargas puntuales.

El sistema de baja tensión comprende: alimentadores y tableros principales y secundarios, iluminación interior y exterior, sistema de fuerza (fuerza normal, fuerza regulada, fuerza para salidas especiales).

Las instalaciones en baja tensión operan a un voltaje de 220/127 V. Para el diseño de los elementos y el sistema de baja tensión en sí mismo, se consideró que el edificio está destinado a dar servicios hospitalarios.

Los subtableros tipo centro de carga, en general, se dividen en subtableros para el sistema de fuerza normal, sistema de fuerza regulada, sistema de iluminación y sistema de aire acondicionado.

Los alimentadores principales de baja tensión salen de los terminales de cada transformador y alimentan a los respectivos tableros principales de distribución. Los alimentadores son trifásicos, 4 hilos, tensiones nominales 220/127 Voltios.

El primer transformador de 750 KVA (transformador No.1), alimenta a todas las cargas del edificio nuevo (Sección B). De este transformador parte una acometida en bajo voltaje al tablero de transferencia automática 1. A este tablero ingresa además una acometida del generador 1, el cual tiene una potencia en stand-by de 899 KVA. Del tablero de transferencia automática 1 sale una acometida al tablero

general TPB. De este tablero salen las acometidas a los tableros que alimentan las cargas generales del hospital.

El segundo transformador de 750 KVA (transformador No.2), alimentará a todas las cargas del edificio antiguo (Sección A) y cuarto de máquinas. De este transformador parte una acometida en bajo voltaje al tablero de transferencia automática 2.

A este tablero ingresa además una acometida del generador 2, el cual, en forma similar al generador anterior, tiene una potencia en stand-by de 899 KVA.

Del tablero de transferencia 2 sale una acometida al tablero general TGA. De este tablero salen las acometidas a los tableros a los tableros del edificio antiguo, casa de máquinas y ciertas cargas puntuales.

Del tercer transformador, de 250 KVA (transformador No.3), sale una acometida de bajo voltaje al tablero TRX el cual alimentará exclusivamente las cargas de los equipos de rayos X, densitómetro, mamógrafo y tomógrafo.

El sistema de iluminación ha sido diseñado para ofrecer adecuados niveles de iluminación de acuerdo a los usos de cada área. Para la iluminación interior y exterior del edificio se utilizaron luminarias tipo led.

El tipo de luminarias a instalarse está acorde con los ambientes donde se ubican. Para el área de estacionamientos, gradas, áreas exteriores, casa de máquinas, cuarto de generadores, casa de gases, cuarto eléctrico, y en general, en sitios donde no se tiene cielo falso o reticulado se utilizan luminarias herméticas sobrepuestas tipo led.

Para el resto de áreas interiores se utilizan luminarias empotrables, que dependiendo del área serán tipo ojo de buey o luminarias 60x60cm.

En el área de quirófanos, las luminarias para alumbrado general serán del tipo empotrable, adicionalmente, se instalaron lámparas cielíticas de acuerdo a las respectivas normativas, a fin de asegurar un nivel de iluminación adecuado.

En consideración a la gran importancia que tiene la iluminación exterior en un edificio, se ha previsto la instalación de postes tipo ornamental con luminarias tipo led, luminarias de piso para jardín y reflectores led.



### **Planos eléctricos**

De acuerdo con el Dossier de calidad del sistema eléctrico, se ha analizado el diagrama unifilar general del hospital, donde se dedujo los puntos de medición, que son los secundarios de los transformadores. Estos representan la alimentación de toda el área hospitalaria.

Se encuentran en el Anexo C: Diagrama unifilar del sistema eléctrico del HGL

### **Planillas de consumo eléctrico**

El Hospital General de Latacunga, cuenta con una acometida (Medidor 1) para las secciones 1 y 2; y una acometida (Medidor 2) para la sección 3.

El medidor de las secciones 1 y 2 presenta un consumo promedio de \$8000 mensuales, mientras que el medidor de la sección 3 (sección administrativa) presenta un consumo promedio de \$250 mensuales, estos valores representan únicamente el consumo eléctrico sin impuestos u otros valores adicionales.

Según los valores de cada planilla del medidor de las secciones 1 y 2; presentan, consumo de potencia reactiva, factor de potencia menor de 1. Mientras que el medidor de la sección 3 presenta consumo únicamente de potencia activa y un factor de potencia de 1.

El consumo de la sección administrativa es despreciable en comparación con el consumo de las secciones 1 y 2.

Por estos motivos se realiza un análisis anual detallado del medidor de las secciones 1 y 2, y un análisis general del medidor de la sección 3.

### **Consumo general en kWh por mes**

El valor consumido en kWh del año 2019 se presenta en la Figura 18, muestra el incremento de consumo en los últimos meses del año como es frecuente, debido a los accidentes de trabajo, reuniones por feriados y temporada, con un valor máximo de consumo de 181064 kWh en el mes de noviembre.

Y un bajo consumo de energía eléctrica en los meses de febrero, marzo, abril y mayo.

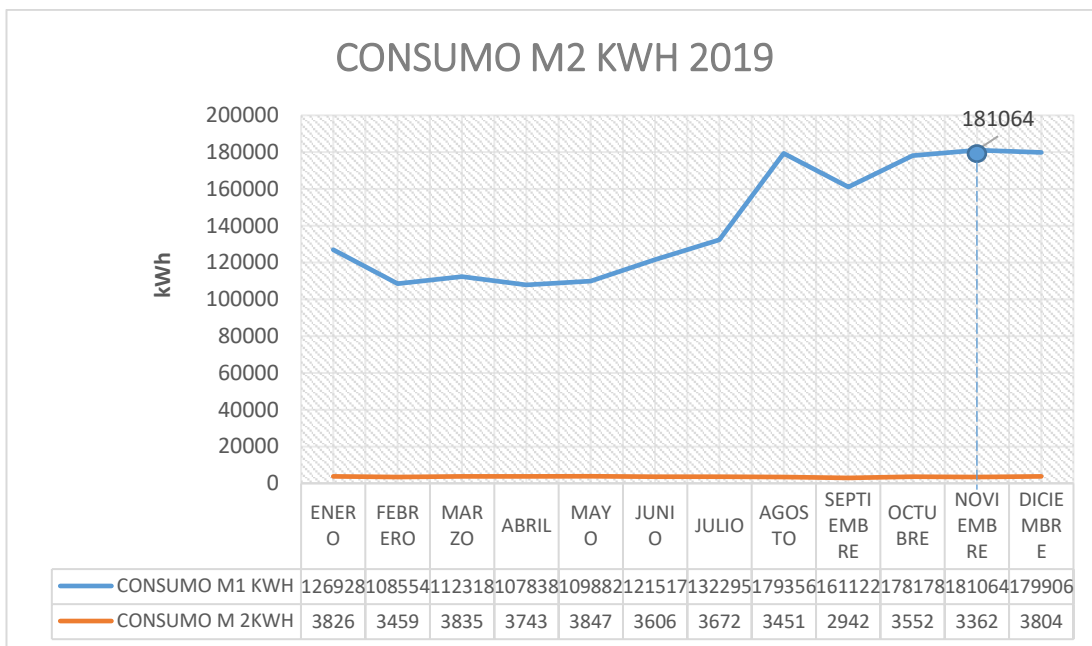


Figura 18. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2019

Fuente: Sandra Chasiluisa

Según la Figura 19 el consumo del año 2020 no se redujo, se presenta un pico en el mes de marzo donde inicio la cuarentena y hubo incremento de contagios de COVID 19, con un máximo valor de consumo eléctrico de 177474 kWh en el mes de enero, seguido por el mes de marzo.

Se entiende que los meses de mayor consumo generalmente son los meses de noviembre, diciembre y enero, mientras que los de bajo consumo son los meses de marzo, abril y mayo.

Sin embargo, en el año 2019 el consumo aproximado durante el resto de los meses del año es de 120000 kWh, mientras que el año 2020 el consumo aproximado es de 150000 kWh. En referencia al costo se incrementa aproximadamente \$1500 mensuales debido a la emergencia sanitaria.

El aumento de la afluencia de pacientes también provoca un incremento de potencia reactiva, haciendo que el factor de potencia disminuya, esto podría presentar problemas en el futuro cuando se implemente mayor carga.

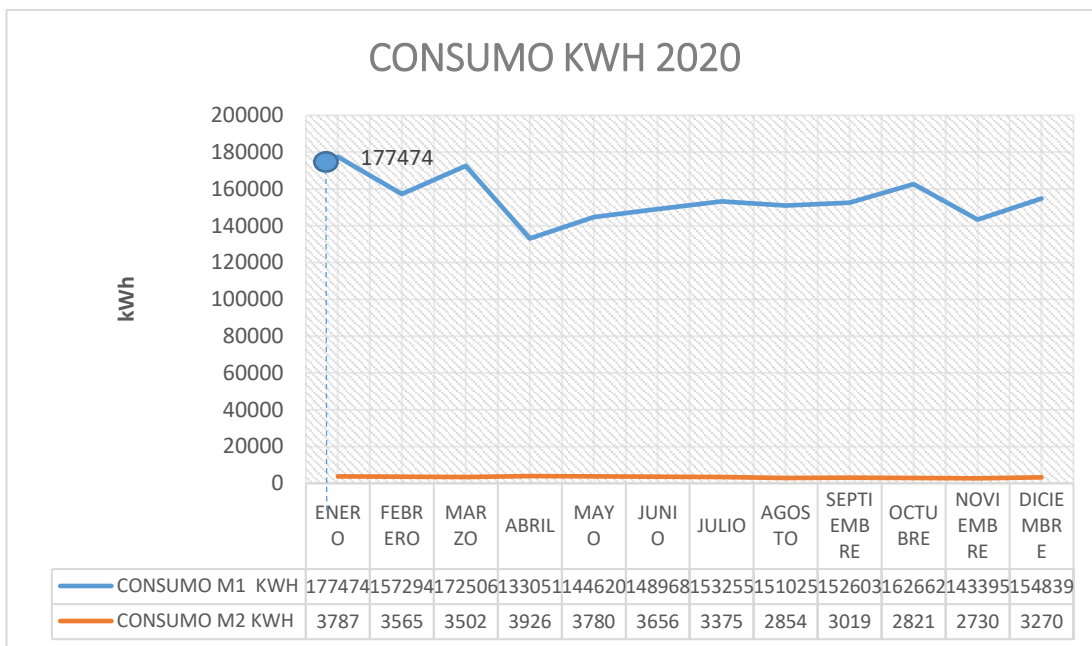


Figura 19. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2020  
Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 20, el consumo del 2021 se presenta constante y similar al del 2020, con valor de consumo máximo de 160629 kWh en el mes de agosto, a partir del mes de este empieza a decrecer gracias a que la campaña de vacunación ha inmunizado a más del 50% de la población. El consumo aproximado mensualmente es de 150000 kWh, representando un promedio de \$9000 mensuales en el año.

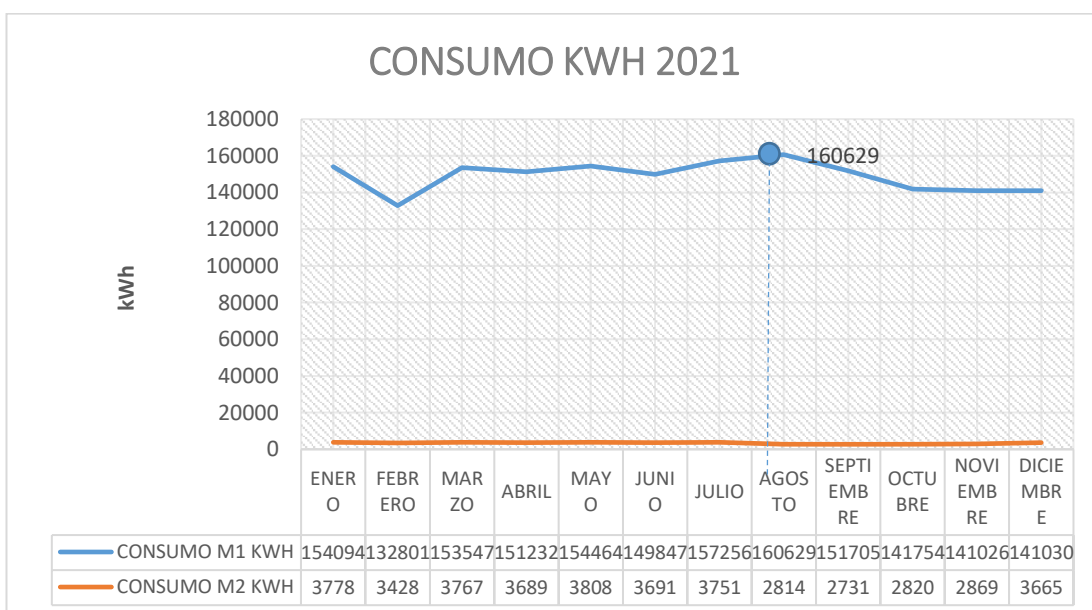


Figura 20. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2021  
Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 21 del consumo del 2022, los valores de consumo son constantes hasta el mes de febrero que empieza a disminuir gracias a la tercera dosis de la vacuna.

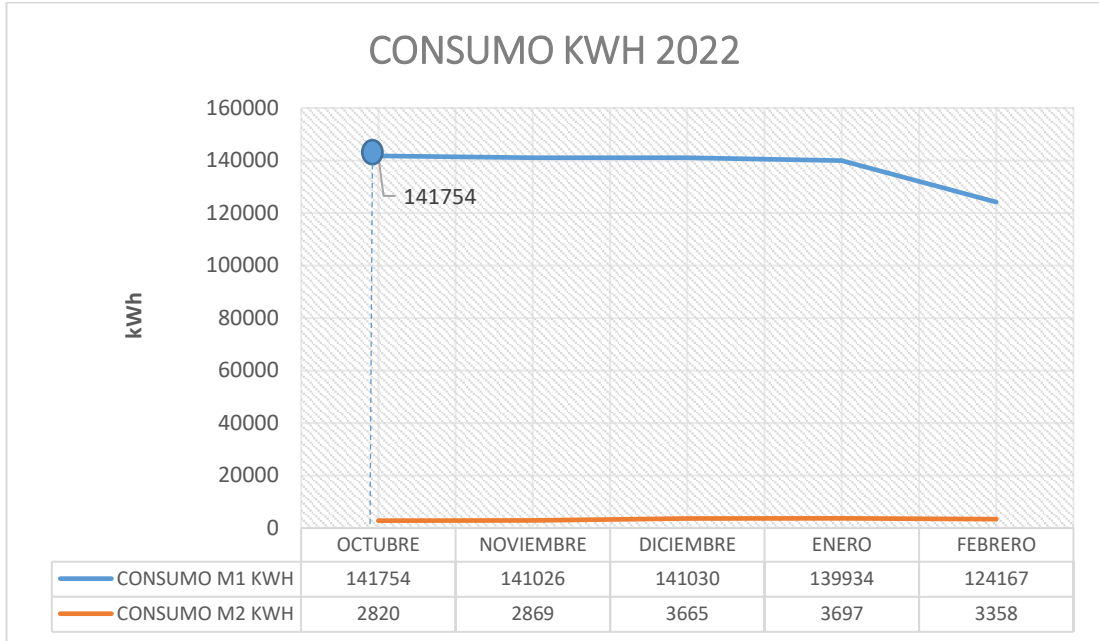


Figura 21. Consumo kWh del Medidor 1 y 2 en 2022

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Factor de potencia

Según los valores registrados por la empresa eléctrica ELEPCO S.A, no hay recargos por bajo factor de potencia, siendo el valor más bajo registrado de 0,922 en el mes de abril del 2020 y el valor mínimo aceptable es de 0,92.

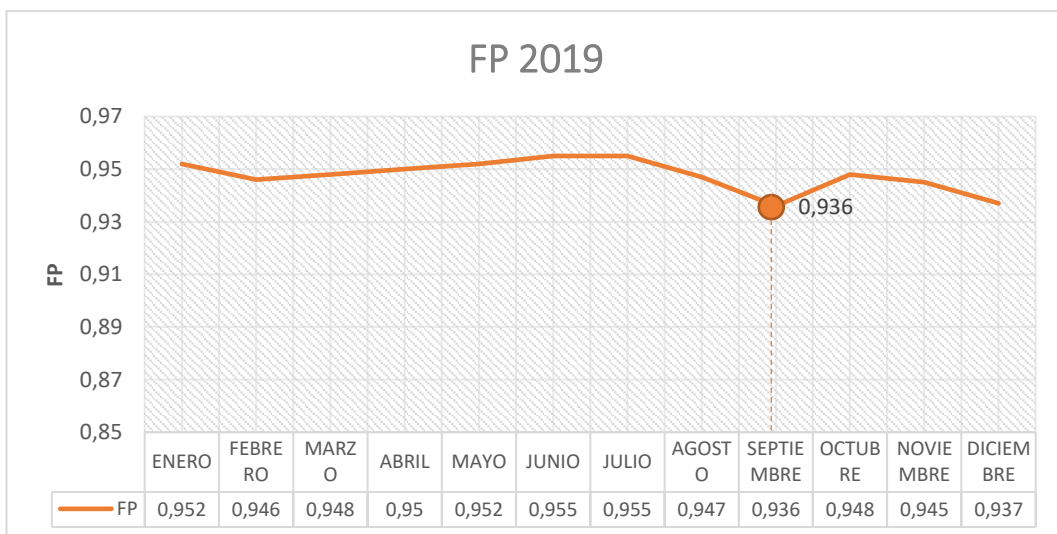


Figura 22. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en 2019

Fuente: Sandra Chasiluisa

Se observa en las Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25, valores de factor de potencia de 0.936, 0.922 y 0.938 respectivamente, estos se aproximan ligeramente al valor limite de 0.92, por lo que se espera que también exista un exceso de potencia reactiva.

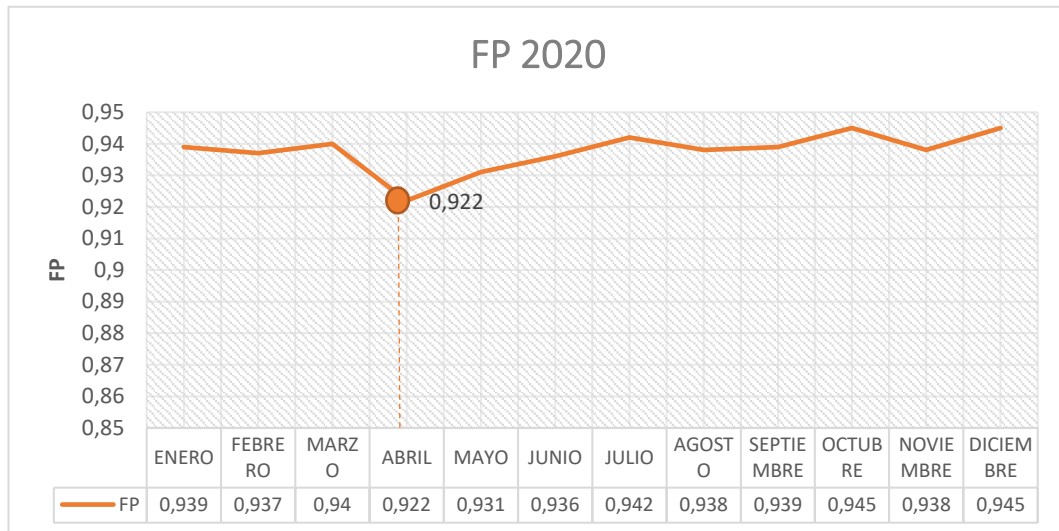


Figura 23. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en 2020

Fuente: Sandra Chasiluisa

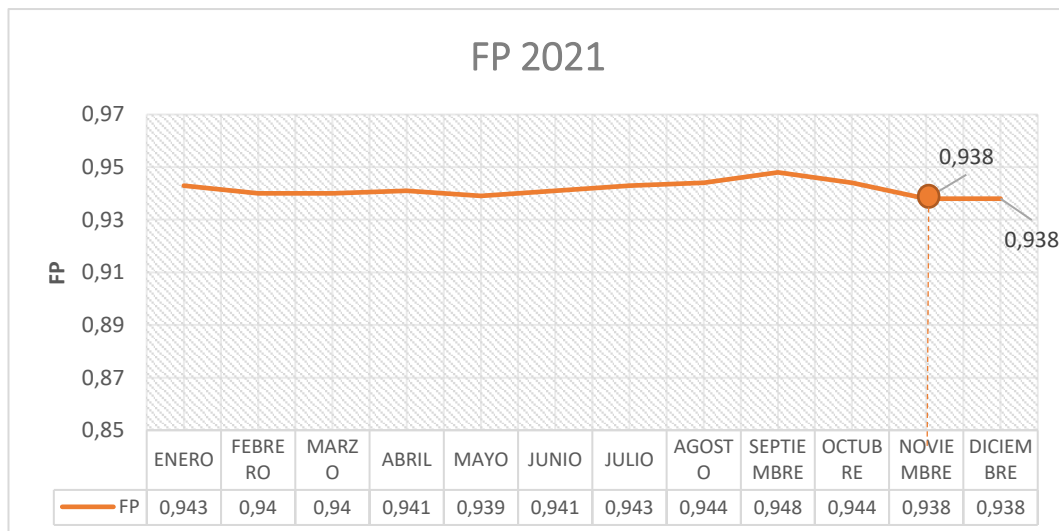


Figura 24. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en 2021

Fuente: Sandra Chasiluisa

Se aprecia, además, que los valores mínimos de factor de potencia se producen en los meses de mayor consumo eléctrico que son los últimos del año, y de acuerdo al crecimiento poblacional también incrementará la demanda de atención medica en

los años posteriores, por este motivo se debe tener en cuenta la corrección del factor de potencia como solución preventiva a futuro.

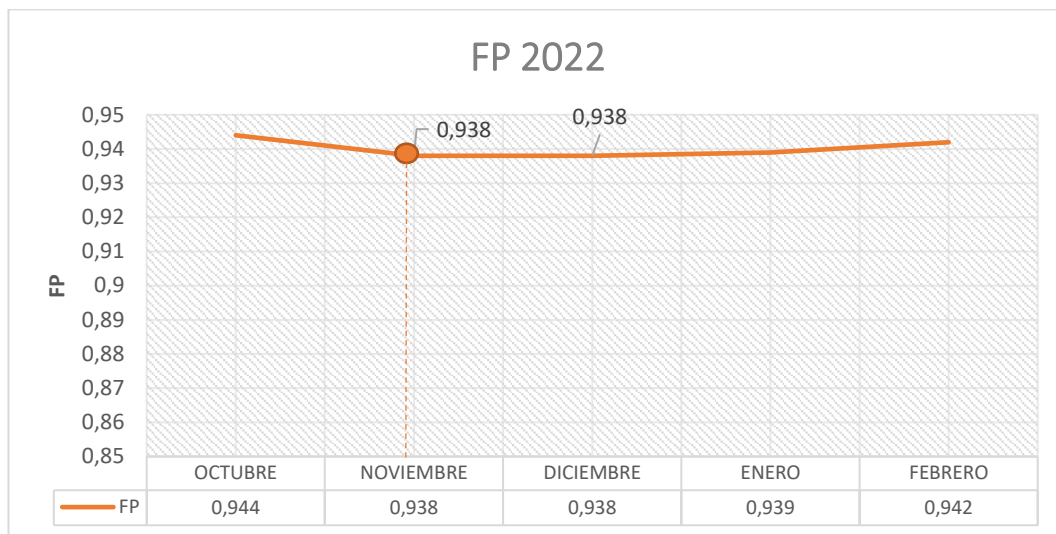


Figura 25. Factor de Potencia M1 medido por ELEPCO S.A en los meses octubre 2021 a febrero 2022

Fuente: Sandra Chasiluisa

## Inventario

Revisar el Anexo D: Inventario de equipos de consumo eléctrico.

Donde el 64% corresponde al equipo médico que representa la electrónica de potencia, 22% al equipo de oficina y 14% a equipo de calefacción y equipo de potencia.

### 2.4.3.5 Trabajo de campo

#### a. Medición

El trabajo de campo de este proyecto se basa en la medición de las magnitudes críticas de los transformadores principales de baja tensión, para ello se ha utilizado un analizador de red FLUKE 435 SII (Figura 26), proporcionado por el Departamento de Investigación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, antes de su instalación es necesario asegurar que la capacidad de la memoria sea suficiente para la medición en forma de registrador.



Figura 26. Analizador de red FLUKE 435-SII  
Fuente: Sandra Chasiluisa

Se procede a instalar el analizador de red en los secundarios de los secundarios de los transformadores, para ello se determina el tipo de conexión según la placa de datos de la Figura 27, donde se especifica que la configuración del secundario es estrella de cuatro hilos y los voltajes de baja tensión.

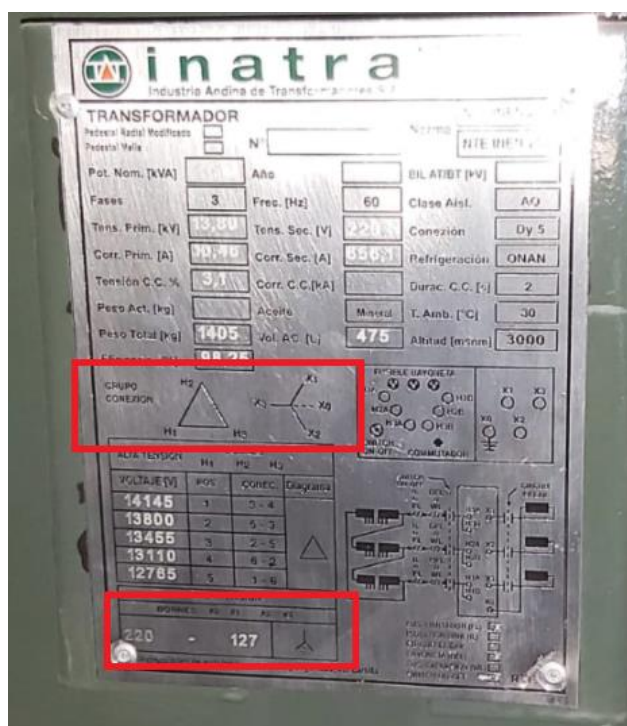


Figura 27. Placa de datos del transformador de 750KVA  
Fuente: Sandra Chasiluisa

Para instalar el analizador en los puntos de medición se procede con la configuración de la topología de medición como se muestran en la Figura 28 y se procede con la conexión según las Figura 29 y Figura 30.

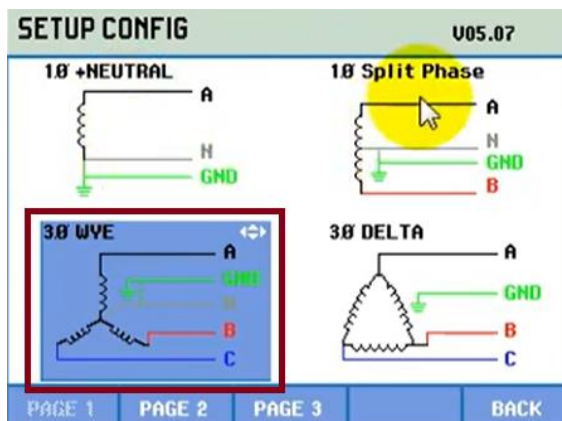


Figura 28. Configuración de topología de medición

Fuente: Sandra Chasiluisa

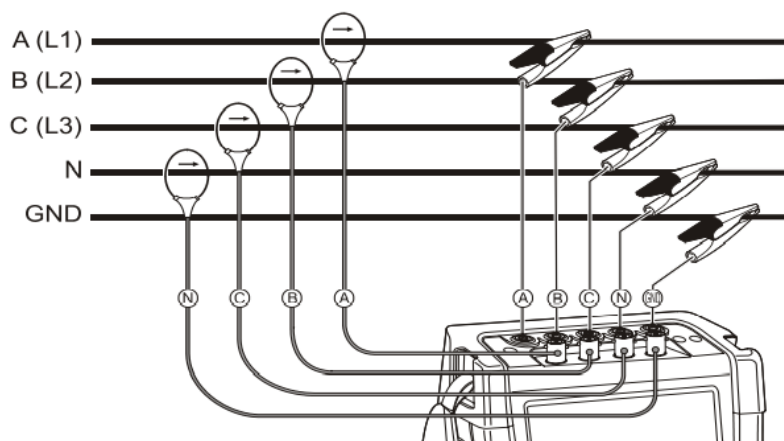


Figura 29. Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico

Fuente: Sandra Chasiluisa



Figura 30. Conexión física del analizador de red en T1

Fuente: Sandra Chasiluisa



Se verifica la conexión de los amperímetros en la pantalla de la Figura 31, según los colores de cada fase, donde la corriente se encuentra retrasada.

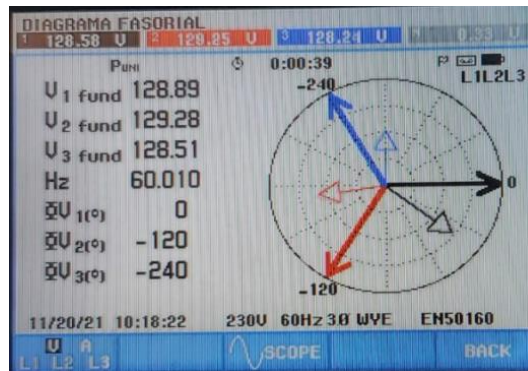


Figura 31. Diagrama fasorial de la conexión

Fuente: Sandra Chasiluisa

Finalmente se configura como registrador de dato, las variables a medirse son:

- Valores rms: voltajes fase-neutro, voltajes fase-fase, corrientes fase-neutro.
- Frecuencia
- Desbalance de voltaje y corriente
- Potencias: activa, reactiva, aparente, factor de potencia, favor de desplazamiento.
- Energía consumida
- Fluctuaciones de voltaje: fluctuación rápida de voltaje (Pst, Pstmin, Plt).
- Armónicos: THD (voltaje), TDD (corriente), armónicos desde orden 1 hasta orden 50.

De acuerdo al diagrama unifilar del hospital, la mayor carga instalada se asigna al transformador 1, donde se encuentran la mayor parte de las especialidades, por ende, la mayor parte de los equipos médicos.

Se realiza una medición según la norma ARCERNR 002-20 de 7 días ininterrumpidos, tomando un registro cada 10 minutos. Este procedimiento se

aplica para los transformadores 1 y 2 de 750KVA, y dos días de medición al transformador 3 de 250KVA destinado al equipo de imagenología.

### b. Informe de datos medidos

Para la extracción de la información registrada se necesita el software propio de FLUKE, llamado Power Log, este permite visualizar los datos en forma de tabla, línea de tendencia, porcentajes y estadísticas de las mediciones tomadas, se muestra la interfaz del programa en la Figura 32. Los archivos digitales se encuentran en el anexo J.

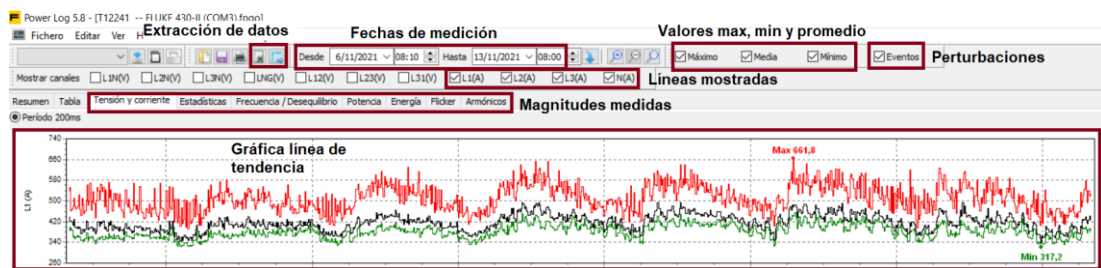


Figura 32. Pantalla Power Log

Fuente: Sandra Chasiluisa

El informe de gráficas de las magnitudes (tensión, corriente, frecuencia, potencia, energía, fluctuación de voltaje y armónicos) medidas de los tres transformadores se puede visualizar en el Anexo E y el banco de datos registrados en el Anexo F, a continuación, se presenta un resumen general de las mediciones realizadas.

#### Transformador 1: Edificio Nuevo

Se ha obtenido 1008 registros durante los 7 días, se describe el resumen de medición en la Tabla 13.

Tabla 13. Resumen de medición del transformador 1

Topología de medición	Sistema trifásico en estrella de cuatro hilos
Fecha de inicio de medición	06/11/2021-08:00
Fecha de fin de medición	13/11/2021-08:00
Intervalo de medición	10 minutos
Tensión nominal	230 V
Corriente nominal	300 A
Frecuencia nominal	60 Hz

Fuente: Sandra Chasiluisa

## Tensión

Los datos de placa del transformador especifican que el voltaje entre línea y línea es 220V y entre línea y neutro es 127V.

Los valores de tensión máxima y mínima entre línea y neutro registrados durante los 7 días de medición son los presentados en la Tabla 14:

Tabla 14. Tensión máxima y mínima registrada en T1 (L1, L2, L3)

	L1N	L2N	L3N
Vrms max	139,35V	139,79V	139,14V
Vrms min	114,21V	125,55V	114,97V

Fuente: Sandra Chasiluisa

Los valores de tensión máxima y mínima entre línea y línea registrados durante los 7 días de medición son los presentados en la Tabla 15:

Tabla 15. Tensión máxima y mínima registrada en T1 (L12, L23, L31)

	L12	L23	L31
Vrms max	242,16V	241,7V	240,73V
Vrms min	212,37V	213,65V	190,86V

Fuente: Sandra Chasiluisa

Estas variaciones de tensión pueden ocasionar daños a los equipos eléctricos, se analizará próximamente si cumple con los parámetros establecidos por la norma. También se observa que los valores de tensión no varían significativamente entre una línea y otra, demostrando que no hay desbalance de carga.

## Corriente

Los datos de placa del transformador especifican que la corriente nominal es 300A, sin embargo, se observa en la que incrementa visiblemente su magnitud.

Los valores de corriente máxima y mínima de las tres líneas y neutro registrados durante los 7 días de medición son los presentados en la Tabla 16:

Tabla 16. Corriente máxima y mínima registrada en T1 (L1, L2, L3, N)

	L1	L2	L3	N
Irms max	661,8 A	695,5 A	596,3 A	119,2 A
Irms min	317,2 A	293 A	234,9 A	47,1 A

Fuente: Sandra Chasiluisa

El valor de las corrientes de fase tiene un comportamiento inestable, probablemente debido a la presencia de armónicos que se corroborará más adelante mediante análisis, sin embargo, el problema más destacando que se observa en la gráfica es la corriente que circula en el neutro.

En un sistema eléctrico trifásico, la corriente de neutro es el vector suma de las tres corrientes de línea. Si el sistema posee simetría perfecta donde sus ondas estén desfasadas  $120^\circ$  y con carga lineal trifásica balanceada, la corriente de neutro es igual a cero. En la realidad, en un sistema trifásico de cuatro hilos, que se encuentre medianamente balanceado, se espera que la corriente que circula por el neutro sea máxima el 20% de la corriente de fase.

En el Anexo F, se calcula el 20% de la corriente de cada fase, en todos los datos medidos, se selecciona el valor promedio de las tres fases y se compara con el valor registrado en la corriente de neutro, se determina que el porcentaje de valores registrados donde la corriente de neutro es mayor al 0,2 de la corriente de fase, el cual es de 42,16%, donde el 95% de los valores de corriente de neutro son menores o iguales a 92A y la corriente de fase es menor o igual a 469 A, 456 A y 397 A para las línea 1, 2 y 3 respectivamente. El cálculo se realiza para cada instante de medición, dando como resultado una matriz de 1008 valores, se recomienda visualizar el anexo en la sección TDD CORRIENTE.

En un sistema trifásico de cuatro hilos con cargas no lineales balanceadas como es el caso del equipo médico del hospital, la corriente en el neutro dependerá del contenido armónico de corriente.

### **Frecuencia**

La frecuencia nominal es de 60Hz, los datos arrojan una lectura máxima de 60,128Hz y una mínima de 59,881Hz. Por lo que no se percibe fallos en la frecuencia del sistema.

### **Potencia**

La carga de la sección 2 del hospital no es constante, se presenta un resumen del consumo total de las tres fases en kVA, kW, kVAR por día en la Tabla 17. Tomando en cuenta que  $PT=PL1+PL2+PL3$ .

Tabla 17. Resumen de potencias registradas en T1 por día

Día	kVA		kW		kvar	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
06/11/2021-07/11/2021	210,45	120,3	203,76	113,85	68,91	24,66
07/11/2021-08/11/2021	204,96	123,96	196,68	117,33	67,68	25,29
08/11/2021-09/11/2021	230,07	125,13	208,29	118,86	85,41	25,59
09/11/2021-10/11/2021	245,34	126,36	231,93	120,12	96,18	26,7
10/11/2021-11/11/2021	233,31	115,14	218,88	108,48	86,1	26,16
11/11/2021-12/11/2021	251,76	127,56	230,07	120,24	106,65	28,71
12/11/2021-13/11/2021	227,79	115,5	219,24	109,02	83,43	25,29

Fuente: Sandra Chasiluisa

De acuerdo con las gráficas de potencia de las tres líneas, las horas de mayor demanda registrada se encuentran entre las 11:00am y las 14:00pm y las horas de menor consumo se encuentran entre las 15:00pm y las 17:00pm.

En la tabla Tabla 17 se observa que el valor de potencia aparente máximo registrado es de 251,76 kVA, ya que el transformador es de 750 kVA se concluye que este se encuentra sobredimensionado provocando pérdidas en el núcleo.

### **Energía**

La energía es directamente proporcional a la potencia, por ende, se entiende que la mayor energía registrada se encuentra entre las horas del mediodía y disminuye durante la noche

### **Fluctuación rápida de voltaje**

Las perturbaciones rápidas de voltaje mejor conocidas como flicker son perceptibles por el ojo humano en forma de parpadeo en las luminarias, estas pueden provocar daños en los equipos además de incrementar el cansancio y estrés mental. Se ven en la gráfica múltiples valores que superan la unidad.

### **Armónicos**

Los armónicos son ondas de voltaje y corriente que alteran la pureza de la onda fundamental, los armónicos de orden impar son los considerados críticos, en

especial el tercer armónico. Sin embargo, el gráfico de armónicos muestra porcentajes altos en el quinto, séptimo y onceavo.

El THD de voltaje presenta una distorsión que se acerca al 2%, y el THD de corriente presenta una distorsión armónica de aproximadamente 20%, siendo a simple vista el mayor inconveniente del sistema. Donde la Línea 3 presenta la mayor distorsión.

### **Transformador 2: Edificio Antiguo**

Se ha obtenido 1008 registros, se describe el resumen de medición en la Tabla 18.

Tabla 18. Resumen de medición del transformador 2

Topología de medición	Sistema trifásico en estrella de cuatro hilos
Fecha de inicio de medición	13/11/2021-09:34
Fecha de fin de medición	20/11/2021-09:24
Intervalo de medición	10 minutos
Tensión nominal	230 V
Corriente nominal	300 A
Frecuencia nominal	60 Hz

Fuente: Sandra Chasiluisa

### **Tensión**

Los datos de placa del transformador especifican que el voltaje entre línea y línea es 220V y entre línea y neutro es 127V.

Los valores de tensión máxima y mínima entre línea y neutro registrados durante los 7 días de medición se presentan en la Tabla 19:

Tabla 19. Tensión máxima y mínima registrada en T2 (L1, L2, L3, N)

	L1N	L2N	L3N	N
Vrms max	135,75V	136,23V	135,58V	0,76V
Vrms min	116,02V	118,88V	101,28V	0,57V

Fuente: Sandra Chasiluisa

Los valores de tensión máxima y mínima entre línea y línea registrados durante los 7 días de medición son los presentados en la Tabla 20:

Tabla 20. Tensión máxima y mínima registrada en T2 (L12, L23, L31)

	L12	L23	L31
Vrms max	235,78V	235,49V	235,18V

Vrms min	204,31V	185,04V	188,07V
----------	---------	---------	---------

Fuente: Sandra Chasiluisa

La L3 y L31 presenta mayor variación de voltaje, se analizará próximamente si cumple con los parámetros establecidos por la norma.

Los valores de voltaje registrados en las tres líneas son similares, se descarta el desbalance de carga.

### **Corriente**

Los datos de placa del transformador especifican que la corriente nominal es 300 A, sin embargo, se observa una variación de corriente drástica.

Los valores de corriente máxima y mínima de las tres líneas y neutro registrados durante los 7 días de medición son los mostrados en la Tabla 21:

Tabla 21. Corriente máxima y mínima registrada en T2 (L1, L2, L3, N)

	L1	L2	L3	N
Irms max	559 A	585 A	540,6 A	152,9 A
Irms min	70,1 A	71,3 A	42,1 A	51,9 A

Fuente: Sandra Chasiluisa

De igual manera que en el transformador 1, se presenta corriente en el neutro. Presentando una lectura máxima de 152,9 A y una lectura mínima de 51,9 A.

En el Anexo F, se calcula el 20% de la corriente de cada fase, en todos los datos medidos, al igual que el procedimiento para el transformador 1, se calcula el porcentaje de valores dentro de los parámetros, el cual es de 100% de los valores registrados superan el 20% de la corriente de fase, donde el 95% de los valores de corriente de neutro son menores o iguales a 39,9A y los valores de corriente de corriente de fase son menores o iguales a 186 A, 217 A y 155 A en las líneas 1, 2 y 3 respectivamente. Se concluye que la presencia de corriente en el conductor neutro es un problema para la operación eficiente del sistema.

### **Frecuencia**

La frecuencia nominal es de 60Hz, los datos arrojan una lectura máxima de 60,135Hz y una mínima de 59,821Hz. Por lo que no se percibe fallos en la frecuencia del sistema.

## Potencia

La carga de la sección 1 del hospital no es constante, ni balanceada, se presenta un resumen del consumo total de las tres fases en kVA, kW, kVAR por día en la Tabla 22. Tomando en cuenta que  $PT=PL1+PL2+PL3$ .

Tabla 22. Resumen de potencia registrada en T2 por día

Día	kVA		kW		kvar	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
13/11/2021-14/11/2021	161,85	31,14	102,06	26,82	124,71	9,57
14/11/2021-15/11/2021	174,87	27,48	118,98	23,88	133,92	7,38
15/11/2021-16/11/2021	171,72	28,5	120,18	25,05	126,72	6,72
16/11/2021-17/11/2021	195,09	27,09	125,43	23,55	154,56	7,35
17/11/2021-18/11/2021	213,27	31,47	146,1	27,66	165,48	8,46
18/11/2021-19/11/2021	209,37	27,33	137,46	24,21	161,61	5,64
19/11/2021-20/11/2021	177,69	32,28	124,95	28,32	133,35	8,82

Fuente: Sandra Chasiluisa

De acuerdo con las gráficas de potencia de las tres líneas, las horas de mayor demanda registrada se encuentran entre las 11:00am y las 14:00pm y las horas de menor consumo se encuentran entre las 17:00pm hasta el siguiente día a las 09:00am.

De igual manera que en el transformador 1, la potencia aparente máxima consumida por el transformador 2 es de 213,27kVA, mientras que su valor nominal es de 750kVA, lo que indica que se encuentra sobredimensionado, pudiendo causar pérdidas en el núcleo del transformador.

La carga de las dos secciones del hospital puede ser instalada a uno solo de estos transformadores.

## Energía

El mayor consumo de energía se produjo el día 17 de noviembre.

## Fluctuación rápida de voltaje

Se ven en la gráfica múltiples valores de Pst que superan la unidad.



## Armónicos

El gráfico de armónicos muestra porcentajes altos en el tercer armónico. El THD de voltaje presenta una distorsión promedio de 1%, y el THD de corriente presenta una distorsión armónica de aproximadamente 25%, lo que convierte este dato en el problema crítico del sistema.

## Transformador 3 -250kVA: Imagenología

Se ha obtenido 410 registros, se describe el resumen de medición en la Tabla 23.

Tabla 23. Resumen de medición del transformador 3

Topología de medición	Sistema trifásico en estrella de cuatro hilos
Fecha de inicio de medición	20/11/2021-09:34
Fecha de fin de medición	21/11/2021-09:24
Intervalo de medición	10 minutos
Tensión nominal	230 V
Corriente nominal	300 A
Frecuencia nominal	60 Hz

Fuente: Sandra Chasiluisa

No cuenta con un patrón de comportamiento, este solo opera cuando los equipos de imagenología son utilizados, los equipos son: tomógrafo, 2 equipos de rayos x, densitómetro y mamógrafo.

## Tensión

Los datos de placa del transformador especifican que el voltaje entre línea y línea es 220V y entre línea y neutro es 127V.

Los valores de tensión máxima y mínima entre línea y neutro registrados durante el día de medición son los presentados en la Tabla 24:

Tabla 24. Tensión máxima y mínima registrada en T3 (L1, L2, L3, N)

	L1N	L2N	L3N	N
Vrms max	132,6V	132,96V	131,94V	0,36V
Vrms min	130,31V	131,09V	129,92V	0,35V

Fuente: Sandra Chasiluisa

Los valores de tensión máxima y mínima entre línea y línea registrados durante el día de medición son los mostrados en la Tabla 25:

Tabla 25. Tensión máxima y mínima registrada en T3 (L12, L23, L31)

	L12	L23	L31
Vrms max	230,49V	229,28V	228,34V
Vrms min	226,58V	226,04V	225,14V

Fuente: Sandra Chasiluisa

De acuerdo a las mediciones y; los valores máximos y mínimos mostrados en la Tabla 25, se determina que no existe desbalance de carga.

### Corriente

Los valores de corriente máxima y mínima de las tres líneas y neutro registrados durante los 7 días de medición se muestran en la Tabla 26:

Tabla 26. Corriente máxima y mínima registrada en T3 (L1, L2, L3)

	L1	L2	L3	N
Irms max	26,6 A	27,3 A	26,3 A	0,3 A
Irms min	6,7 A	5,7 A	5,1 A	0,1 A

Fuente: Sandra Chasiluisa

No se observa presencia de corriente que pueda afectar el funcionamiento del sistema. La corriente máxima registrada en el neutro es de 0,3 A.

### Frecuencia

La frecuencia nominal es de 60Hz, los datos arrojan una lectura máxima de 60,061Hz y una mínima de 59,928Hz. Por lo que no se percibe fallos en la frecuencia del sistema.

### Potencia

La carga de los equipos de imagenología del hospital no es constante, se presenta un resumen del consumo total de las tres fases en kVA, kW, kVAR. Tomando en cuenta que  $PT=PL1+PL2+PL3$ . Como se indica en la Tabla 27

Tabla 27. Resumen de potencia registrada en T3

Día	kVA		kW		kvar	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
20/11/2021	10,53	2,34	8,34	1,59	2,1	1,53

Fuente: Sandra Chasiluisa

## Fluctuación rápida de voltaje

La línea de tendencia se encuentra sobre la unidad.

### Armónicos

El gráfico de armónicos muestra porcentajes altos en el quinto armónico. El THD de voltaje presenta una distorsión promedio de 1%, y el THD de corriente presenta una distorsión armónica de aproximadamente 40%.

#### 2.4.3.6 Análisis

Para determinar las anomalías existentes en el sistema eléctrico, se ha realizado la toma de 1008 datos durante 7 días, cada 10 minutos. Obteniendo una base de datos amplia (Anexo F), de los cuales se ha realizado los cálculos de cada valor y comparado los resultados con la norma ARCERNNR 002-20 del apartado 1.2.3.2, obteniendo los siguientes resultados.

##### a. Nivel de voltaje

Para realizar el cálculo de variación máxima de nivel de voltaje se ha utilizado la ecuación 1. Aplicándola a los 1008 datos registrados y determinando el porcentaje de valores que cumplen con la norma.

De acuerdo a esta, el 95% de los valores registrados o más, no deben superar el porcentaje de variación especificado en la Tabla 2.

En la Tabla 28, se observa un resumen del porcentaje de cumplimiento de los tres transformadores en las tres líneas, donde se encuentran resaltados las líneas que menor porcentaje de cumplimiento tienen como es la línea 2 del transformador 2 con 97,3% de valores que cumplen con la norma.

$\Delta V_k = 8\%$ , según lo especificado en la Tabla 2

$V_N = 127$ , dato de placa de los transformadores.

Tabla 28. Cumplimiento de la norma con respecto al nivel de voltaje de los tres transformadores

	T1		T2		T3	
L1						
CUMPLE	1004	99,6%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	4	0,4%	0	0%	0	0%

TOTAL	1008	100,0%	1008	100%	410	100%
L2						
CUMPLE	981	97,3%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	27	2,7%	0	0%	0	0%
TOTAL	1008	100,0%	1008	100%	410	100%
L3						
CUMPLE	1006	99,8%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	2	0,2%	0	0%	0	0%
TOTAL	1008	100,0%	1008	100%	410	100%

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 1

En la Figura 33 se observa que 100% de los valores registrados en las líneas 1 y 3 no superan el 8% de variación de nivel de voltaje, solo la línea 2 presenta un 2,68% de valores registrados que no cumplen con los parámetros.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados, no varían más del 8% de la tensión nominal. Cumple con la norma.

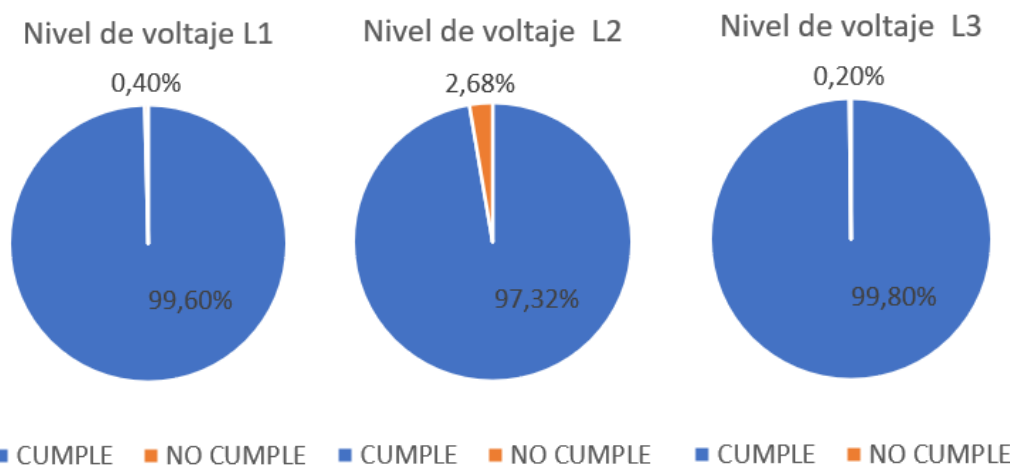


Figura 33. Porcentaje de valores registrados que cumplen con ARCERNNR 002-20 con respecto al nivel de voltaje del T1

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 2

En la Figura 34 se observa que 100% de los valores registrados en las tres líneas no superan el 8% de variación de nivel de voltaje.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados, no varían más del 8% de la tensión nominal. Cumple con la norma.

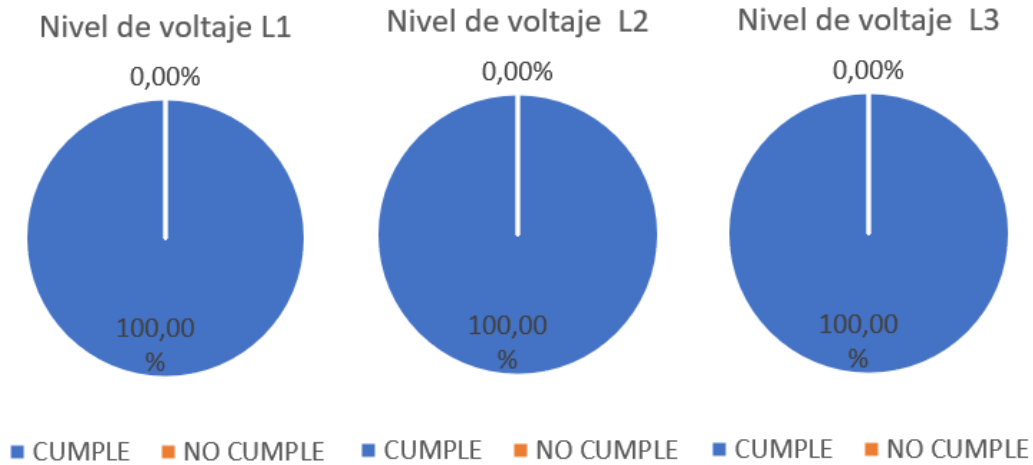


Figura 34. Porcentaje de valores registrados que cumplen con ARCERNNR 002-20 con respecto al nivel de voltaje del T2

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 3

En la Figura 35 se observa que 100% de los valores registrados en las tres líneas no superan el 8% de variación de nivel de voltaje

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados en un día, no varían más del 8% de la tensión nominal.

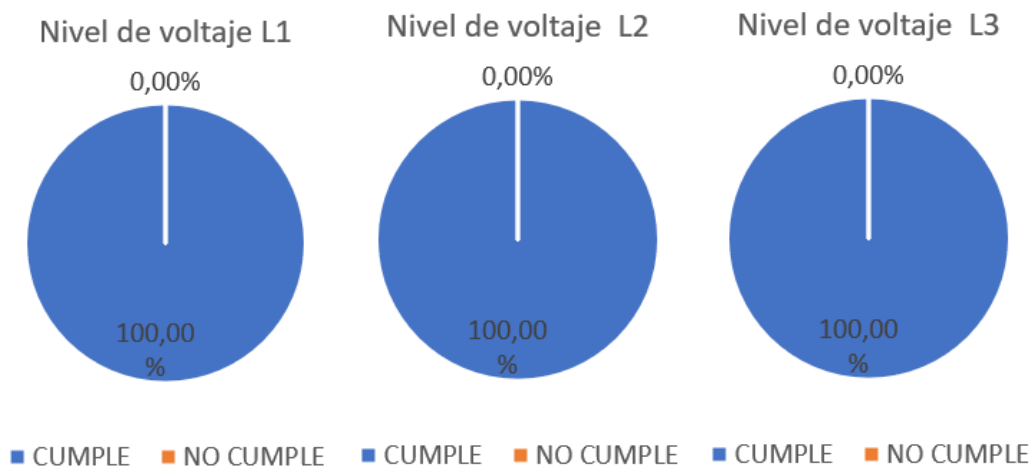


Figura 35. Porcentaje de valores registrados que cumplen con ARCERNNR 002-20 con respecto al nivel de voltaje del T3

Fuente: Sandra Chasiluisa

No existe inconveniente en los tres transformadores con respecto al nivel de voltaje.

## b. Perturbación rápida de voltaje

Para realizar el cálculo de Perturbación rápida de voltaje (Flicker) se ha utilizado la ecuación 2. Aplicándola a los 1008 datos registrados y determinando el porcentaje de valores que cumplen con la norma. De acuerdo a esta, el 95% de los valores registrados o más, no deben superar la unidad.

En la Tabla 29 se observa un resumen del porcentaje de cumplimiento de los tres transformadores en las tres líneas, donde se encuentran resaltados las líneas que menor porcentaje de cumplimiento tienen como es la línea 1 del transformador 1 con un valor de 37,60% de valores registrados que cumplen y del transformador 3 con un valor de 31,46% de valores que cumplen con la norma. Dado que las dimensiones de carga, tensión y corriente son superiores en el transformador 1, se concluye que este es el valor más crítico con respecto al flicker.

Tabla 29. Cumplimiento de la norma con respecto a la perturbación rápida de voltaje de los tres transformadores

	T1		T2		T3	
L1						
CUMPLE	379	37,60%	634	62,90%	129	31,46%
NO CUMPLE	629	62,40%	374	37,10%	281	68,54%
TOTAL	1008	100,00%	1008	100,00%	410	100,00%
L2						
CUMPLE	515	51,09%	742	73,61%	159	38,78%
NO CUMPLE	493	48,91%	266	26,39%	251	61,22%
TOTAL	1008	100,00%	1008	100,00%	410	100,00%
L3						
CUMPLE	430	42,66%	648	64,29%	139	34,32%
NO CUMPLE	578	57,34%	360	35,71%	266	65,68%
TOTAL	1008	100,00%	1008	100,00%	405	100,00%

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 1

En la Figura 36 se observa que el porcentaje de incumplimiento de los valores registrados es mayor del 48,91%, quiere decir que las tres líneas presentan un Pst mayor a la unidad, por lo que se encuentra fuera del rango establecido.

Conclusión: menos del 95% de los valores registrados no superan la unidad. No cumple con la norma.

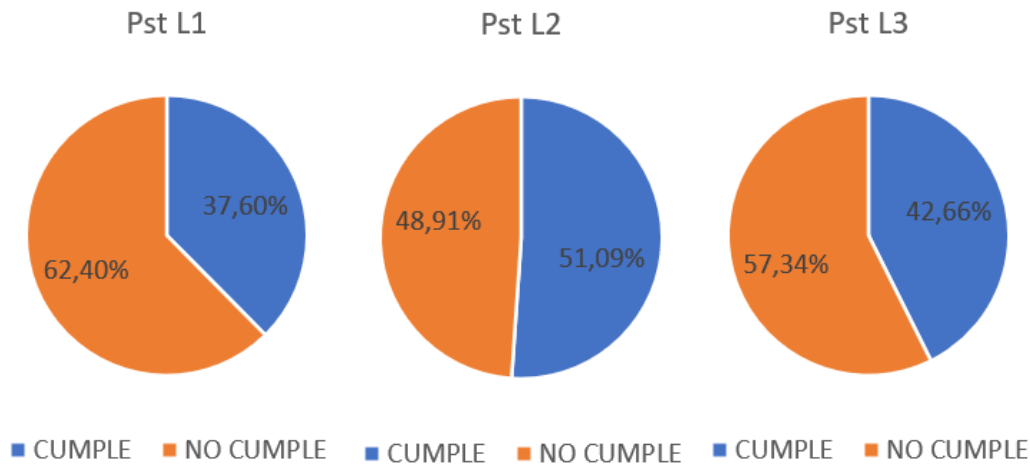


Figura 36. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la perturbación rápida de voltaje del T1

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 2

En la Figura 37 se observa que el porcentaje de cumplimiento es mayor al 62,90% en las tres líneas, aun así no cumple con el parámetro establecido.

Conclusión: menos del 95% de los valores registrados no superan la unidad. No cumple con la norma.

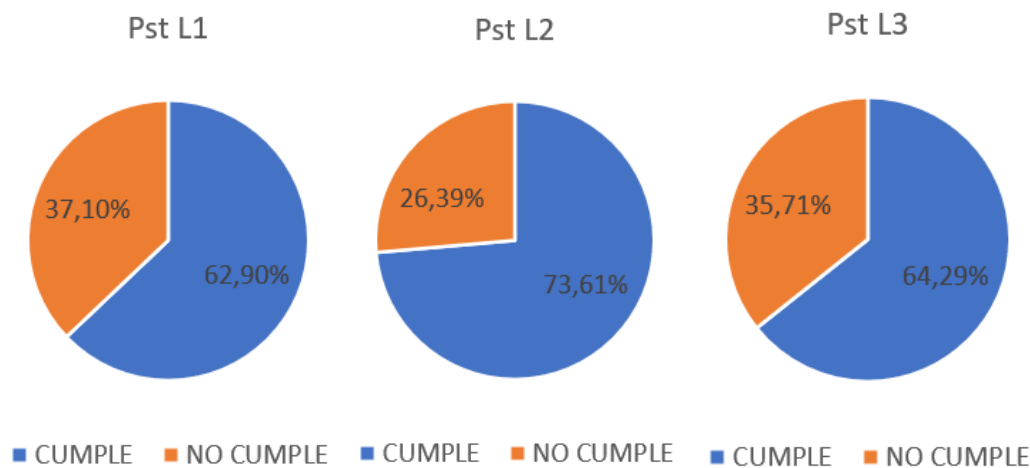


Figura 37. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la perturbación rápida de voltaje del T2

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 3

En la Figura 38 se observa que el porcentaje de incumplimiento del total de los valores registrados para las tres líneas es mayor a 61,22%.

Se encuentra completamente fuera de rango, este transformador es utilizado únicamente para imagenología, por lo que las cargas no son constantes en el tiempo.

Conclusión: menos del 95% de los valores registrados en un día no superan la unidad.

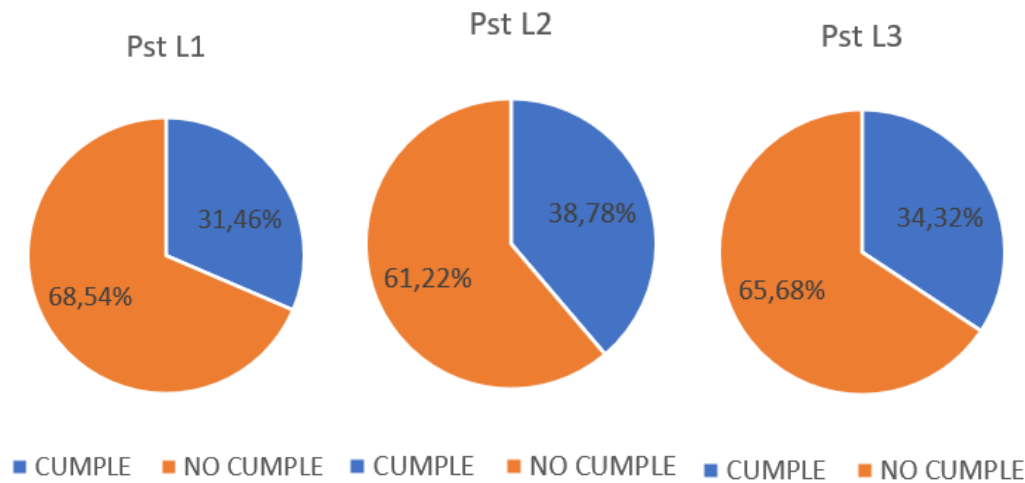


Figura 38. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la perturbación rápida de voltaje del T3

Fuente: Sandra Chasiluisa

### c. Distorsión armónica de voltaje

Para realizar el cálculo de distorsión armónica de voltaje máxima el analizador de red ha utilizado las ecuación 3, ecuación 4 y ecuación 5, registrando automáticamente los datos en forma de porcentaje. Aplicándola a los 1008 datos registrados y determinando el porcentaje de valores que cumplen con la norma. De acuerdo a esta, el 95% de los valores registrados o más, no deben superar el porcentaje de variación especificado en la Tabla 3.

En la Tabla 30, se muestra un resumen del porcentaje de valores registrados que se encuentran dentro del rango. Todos los valores de las tres líneas de los tres transformadores tienen una distorsión armónica de voltaje menor al 8%

$THD_k = 8\%$ , Factor de máximo de distorsión armónica total de voltaje según la Tabla 3.



Tabla 30. Cumplimiento de la norma con respecto a la distorsión armónica de voltaje de los tres transformadores

	T1		T2		T3	
L1						
CUMPLE	1008	100%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	0	0%	0	0%	0	0%
TOTAL	1008	100%	1008	100%	410	100%
L2						
CUMPLE	1008	100%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	0	0%	0	0%	0	0%
TOTAL	1008	100%	1008	100%	410	100%
L3						
CUMPLE	1008	100%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	0	0%	0	0%	0	0%
TOTAL	1008	100%	1008	100%	410	100%

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 1

En la Figura 39 se muestra que 100% de los valores registrados en las tres líneas del transformador 1 presentan una distorsión armónica de voltaje menor al 8% dictada por la norma.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados no superan el 8% de distorsión armónica de voltaje. Cumple con la norma.

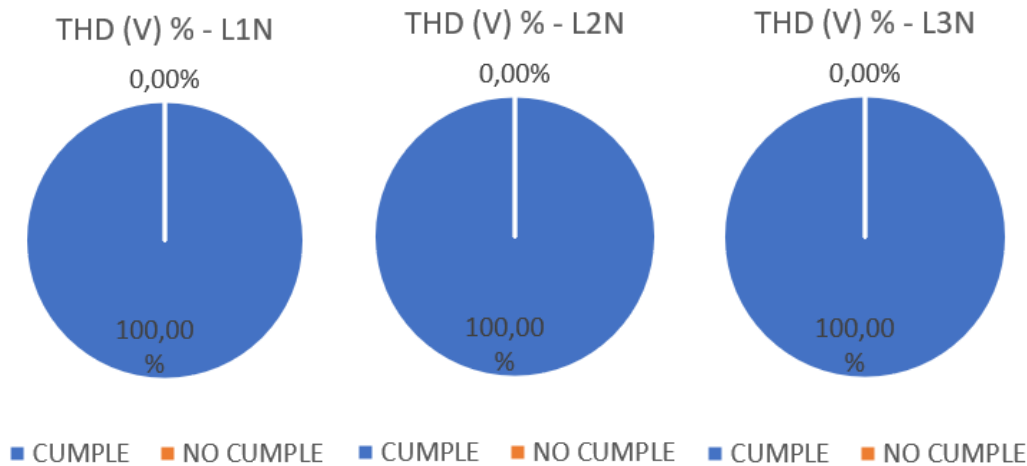


Figura 39. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de voltaje del T1

Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 40 se muestra el porcentaje armónico individual del tercer al treinta y unavo armónico, y el porcentaje de distorsión armónica de voltaje, en las tres líneas con valor menor al 1,4%. Los armónicos que destacan son el quinto, séptimo y onceavo, todos menores al 1%. Confirmando que se encuentra dentro de los límites impuestos por la norma.

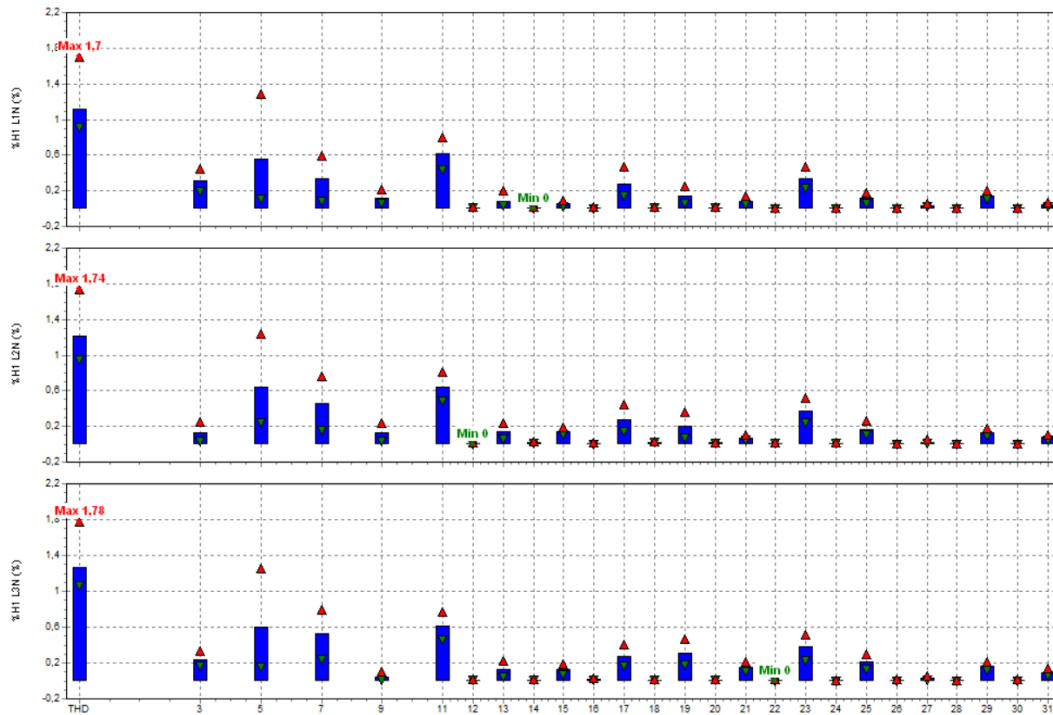


Figura 40. Espectro armónico de voltaje de T1

Fuente: Sandra Chasiluisa

## Transformador 2

En la Figura 41 se muestra que 100% de los valores registrados en las tres líneas presentan una distorsión armónica de voltaje menor al 8% dictada por la norma.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados no superan el 8% de distorsión armónica de voltaje. Cumple con la norma.

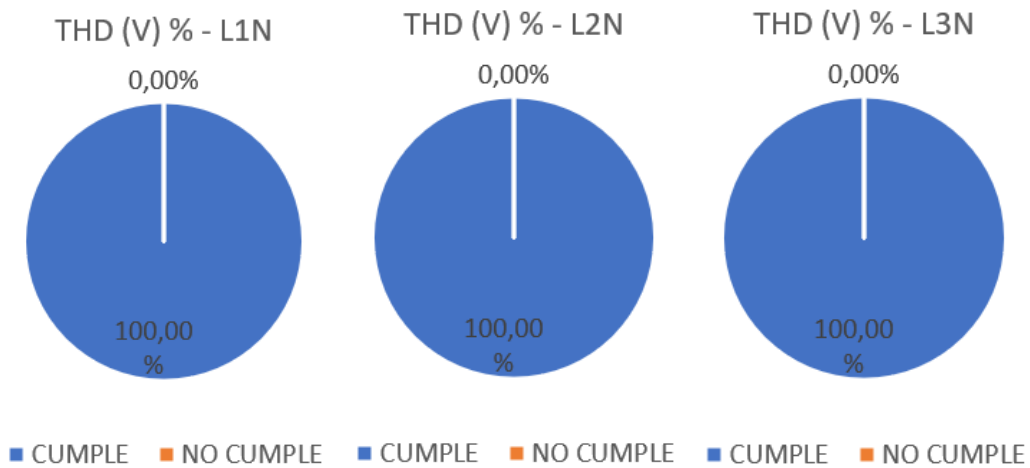


Figura 41. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de voltaje del T2

Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 42 se muestra el porcentaje armónico individual del tercer al treinta y unavo armónico, y el porcentaje de distorsión armónica de voltaje, en las tres líneas con valor menor al 1%. Existe presencia de una mínima cantidad de armónicos de voltaje del tercer al diecisieteavo. Confirmando que se encuentra dentro de los límites impuestos por la norma.

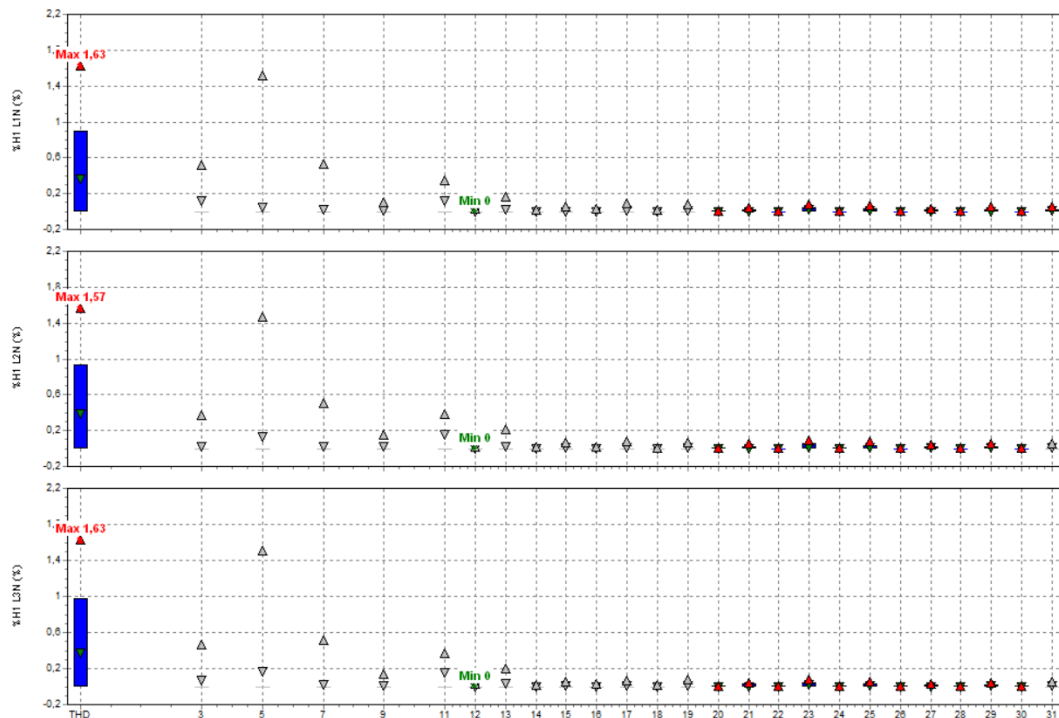


Figura 42. Espectro armónico de voltaje de T2

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 3

En la Figura 43 se muestra que 100% de los valores registrados en las tres líneas del transformador 3 presentan una distorsión armónica de voltaje menor al 8% dictada por la norma.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados no superan el 8% de distorsión armónica de voltaje. Cumple con la norma.

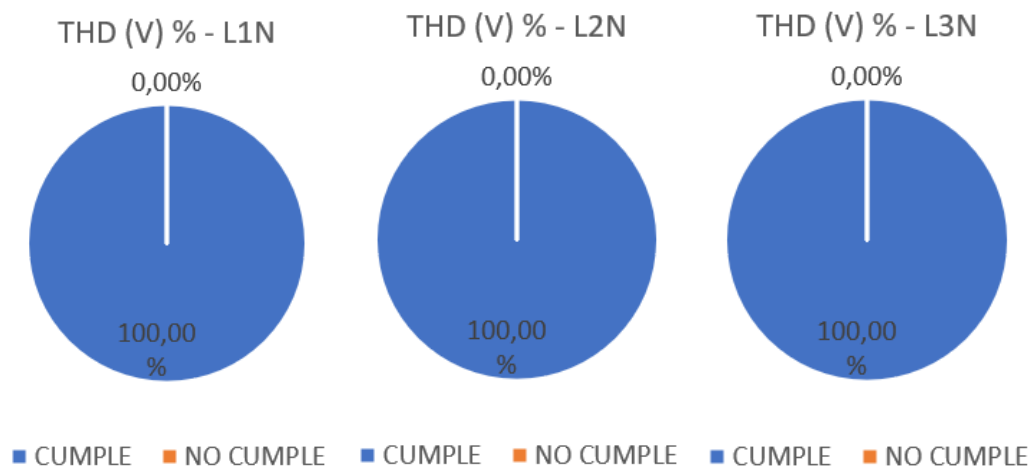


Figura 43. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de voltaje del T3

Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 44 se muestra el porcentaje armónico individual del tercer al treinta y unavo armónico, y el porcentaje de distorsión armónica de voltaje, en las tres líneas con valor menor al 1,08%.

Los armónicos que destacan son el quinto, séptimo y onceavo, todos menores al 1%. Sobre todo, el quinto armónico, que no representa un problema potencial ya que el transformador no posee una carga significativa con respecto al T1.

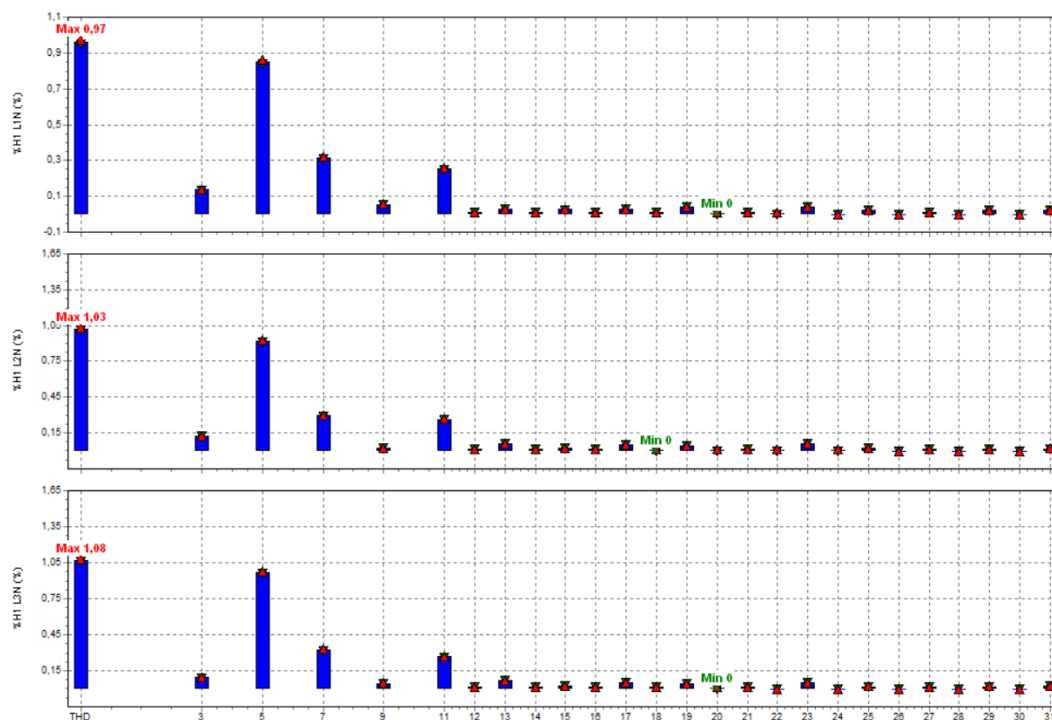


Figura 44. Espectro armónico de voltaje de T3

Fuente: Sandra Chasiluisa

#### d. Desequilibrio de voltaje

Para realizar el cálculo de desequilibrio máximo de voltaje, el analizador de red ha utilizado la ecuación 6, registrando automáticamente los datos en forma de porcentaje. Aplicándola a los 1008 datos registrados y determinando el porcentaje de valores que cumplen con la norma. De acuerdo a esta, el 95% de los valores registrados o más, no deben superar 2% de desequilibrio de voltaje.

En la Tabla 31 se muestra el resumen de porcentaje de valores registrados que se encuentran dentro de los parámetros, 100% de los valores de los tres transformadores presentan menos del 2% de desequilibrio de voltaje,

*Desequilibrio de Voltaje = 2%*, máximo desequilibrio de voltaje permitido.

Tabla 31. Cumplimiento de la norma con respecto al desbalance de voltaje de los tres transformadores

	T1		T2		T3	
Vz						
CUMPLE	1008	100%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	0	0%	0	0%	0	0%
TOTAL	1008	100%	1008	100%	410	100%
Vn						

CUMPLE	1008	100%	1008	100%	410	100%
NO CUMPLE	0	0%	0	0%	0	0%
TOTAL	1008	100%	1008	100%	410	100%

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 1

En la Figura 45 se aprecia que el 100% de los valores registrados del transformador 1 tienen menos del 2% de desequilibrio y desbalance de voltaje tipificados en la norma del ARCONEL. Por lo que no representa un problema potencial en ninguno de los tres transformadores de distribución.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados no superan el 2% de desequilibrio de voltaje. Cumple con la norma.

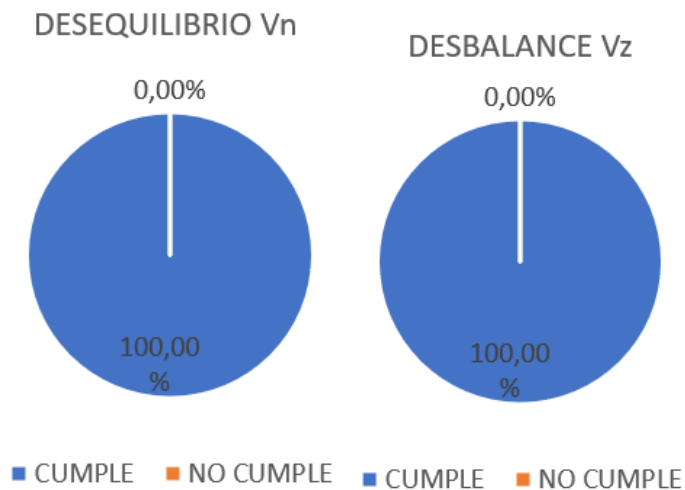


Figura 45. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto al desequilibrio de voltaje del T1

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 2

En la Figura 46 se aprecia que el 100% de los valores registrados del transformador 2 tienen menos del 2% de desequilibrio y desbalance de voltaje tipificados en la norma del ARCONEL.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados no superan el 2% de desequilibrio de voltaje. Cumple con la norma.

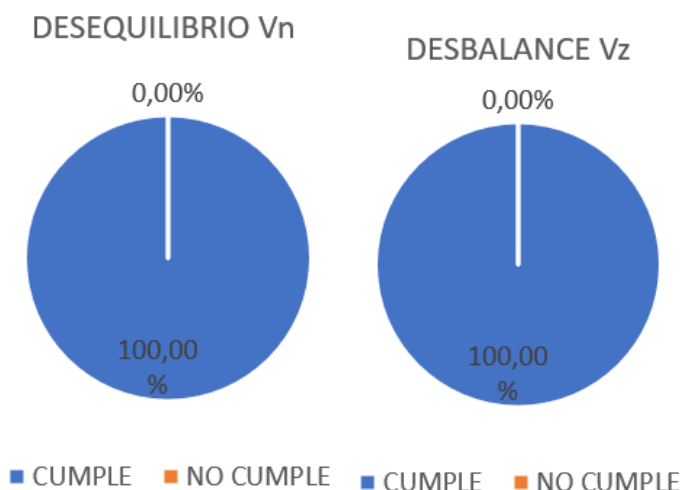


Figura 46. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto al desequilibrio de voltaje del T2

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 3

En la Figura 47 se aprecia que el 100% de los valores registrados del transformador 3 tienen menos del 2% de desequilibrio y desbalance de voltaje.

Conclusión: el 95% o más de los valores registrados no superan el 2% de desequilibrio de voltaje. Cumple con la norma.

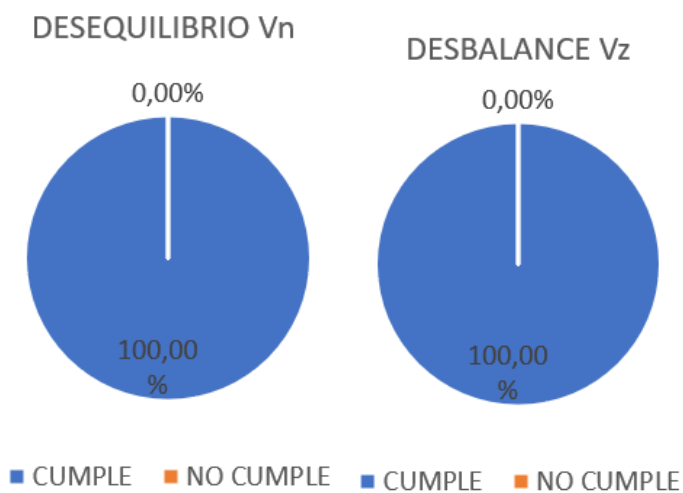


Figura 47. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto al desequilibrio de voltaje del T3

Fuente: Sandra Chasiluisa

#### e. Distorsión armónica de corriente

Para realizar el cálculo de distorsión armónica de corriente máxima, el analizador de red ha utilizado las ecuación 7, ecuación 8 y ecuación 9, registrando

automáticamente los datos en forma de porcentaje. Aplicándola a los 1008 datos registrados y determinando el porcentaje de valores que cumplen con la norma. De acuerdo a esta, el 95% de los valores registrados o más, no deben superar el porcentaje de variación especificado en la Tabla 4.

$TDD_k = 20\%$ , Factor de máximo de distorsión armónica total de voltaje según la Tabla 4.

En la Tabla 32 se presenta el resumen del porcentaje de valores registrados de las tres líneas de los tres transformadores que están dentro del rango permitido de distorsión armónica de corriente. Los valores críticos son la línea 3 del transformador 1 con un valor de únicamente 43,25% de valores que están dentro del rango, las 3 líneas del transformador 2 con 46,1%, 40,97% y 44,05% respectivamente y las 3 líneas del transformador 3 con 58,54% y 0% de cumplimiento. De las cuales, el transformador 1 es el más crítico a considerar puesto que maneja la carga de la sección nueva del hospital y las pérdidas son mayores. Después de este, el transformador 2 posee armónicos de corriente en las tres líneas.

Tabla 32. Cumplimiento de la norma con respecto a la distorsión armónica de corriente de los tres transformadores

	T1		T2		T3	
L1						
CUMPLE	1008	100,00%	465	46,13%	240	58,54%
NO CUMPLE	0	0,00%	543	53,87%	170	41,46%
TOTAL	1008	100,00%	1008	100,00%	410	100,00%
L2						
CUMPLE	992	98,41%	413	40,97%	0	0,00%
NO CUMPLE	16	1,59%	595	59,03%	410	100,00%
TOTAL	1008	100,00%	1008	100,00%	410	100,00%
L3						
CUMPLE	436	43,25%	444	44,05%	0	0,00%
NO CUMPLE	572	56,75%	564	55,95%	410	100,00%
TOTAL	1008	100,00%	1008	100,00%	410	100,00%

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 1

En la Figura 48, se puede apreciar que, las líneas 1 y 2 del transformador 1 superan el 95% de valores registrados dentro del rango, mientras que la línea 3 muestra un



porcentaje de solo el 43,25% de valores que están en el rango de distorsión armónica de corriente, este es el problema potencial a solucionar para mejorar la calidad de energía eléctrica en el hospital, debido a los efectos que causan los armónicos de corriente.

Conclusión: menos del 95% de los valores registrados no superan el 20% de distorsión armónica de corriente. No cumple con la norma.

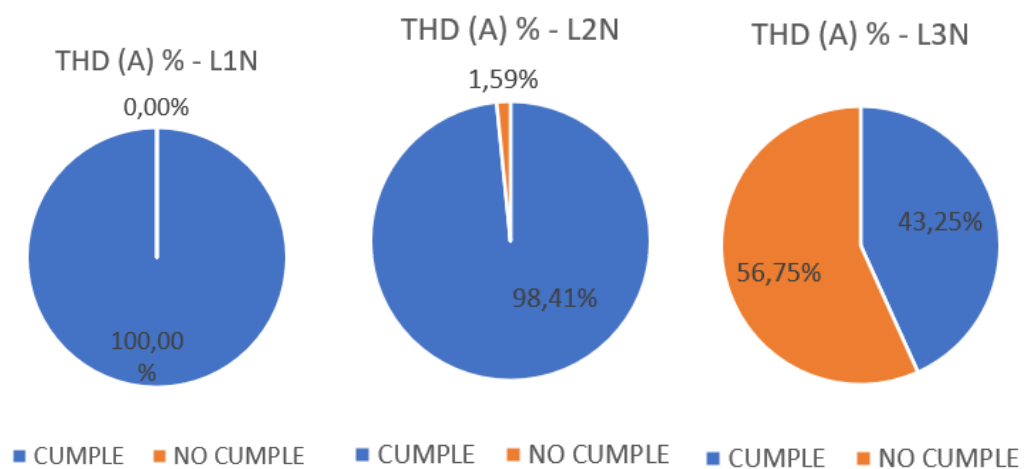


Figura 48. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de corriente del T1

Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 49 se observa el porcentaje de distorsión armónica total que supera el 20% en la línea 3, en la línea 1 es del 15% y en la línea 2 del 17,5%; el porcentaje de distorsión individual muestra la presencia del tercer, quinto, séptimo y onceavo armónico, tal y como se expuso en el marco teórico.

Debido a la presencia de electrónica de potencia que son los equipos médicos, equipo de oficina e iluminación.

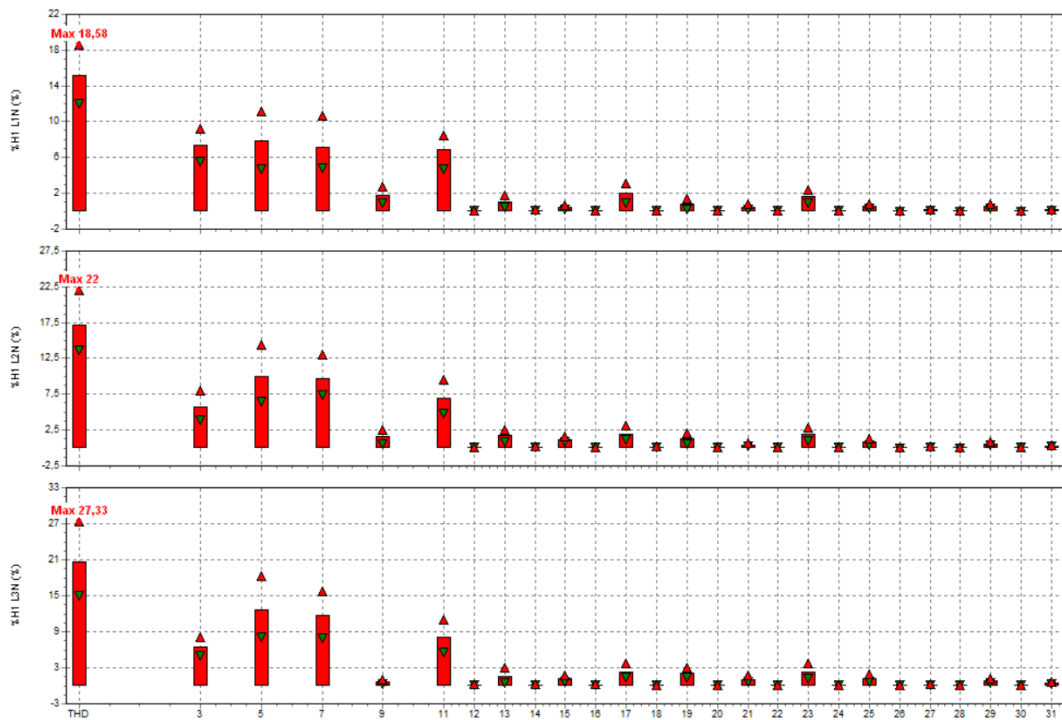


Figura 49. Espectro armónico de corriente de T1

Fuente: Sandra Chasiluisa

## Transformador 2

En la Figura 50 se observa claramente que el porcentaje de valores registrados de las tres líneas del transformador es sumamente bajo, menor al 46,13%.

Lo que significa que la presencia de corriente armónica esta presente en la red y causa una notable perdida de potencia y sobrecalentamiento de conductores, especialmente el neutro, que muestra altos valores de corriente de neutro.

Los armónicos de corriente también provocan el ascenso de la corriente de potencia reactiva y presentan dificultades a la hora de instalar un banco de capacitores para la corrección del factor de potencia, se recomienda compensar la corriente armónica antes de otros fallos del sistema.

Conclusión: menos del 95% de los valores registrados no superan el 20% de distorsión armónica de corriente. No cumple con la norma.

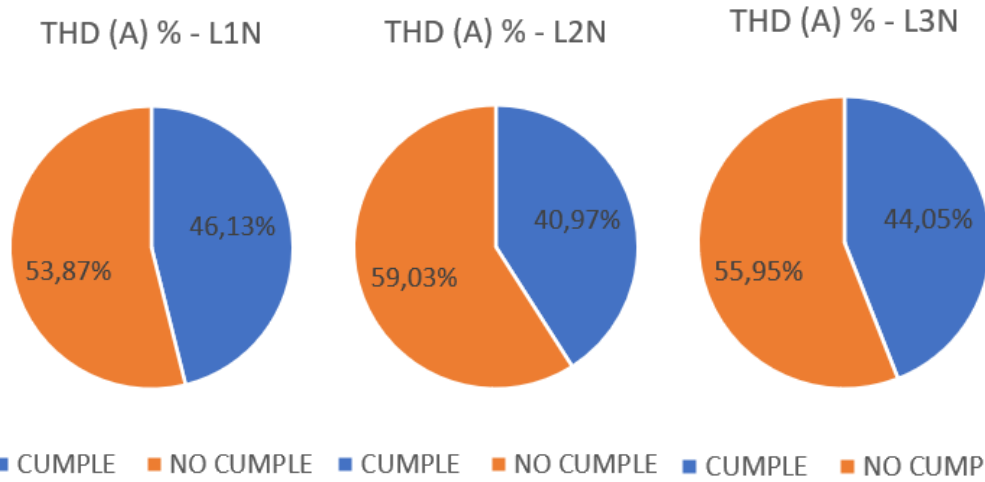


Figura 50. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de corriente del T2

Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 51 se observa el porcentaje de distorsión armónica total que supera el 20% en las tres líneas, con un valor máximo de 27% y un mínimo de 23%; el porcentaje de distorsión individual muestra la presencia del tercer, quinto y séptimo, tal y como se expuso en el marco teórico, este transformador cuenta con la carga de equipo de oficina, iluminación y unos pocos equipos médicos.

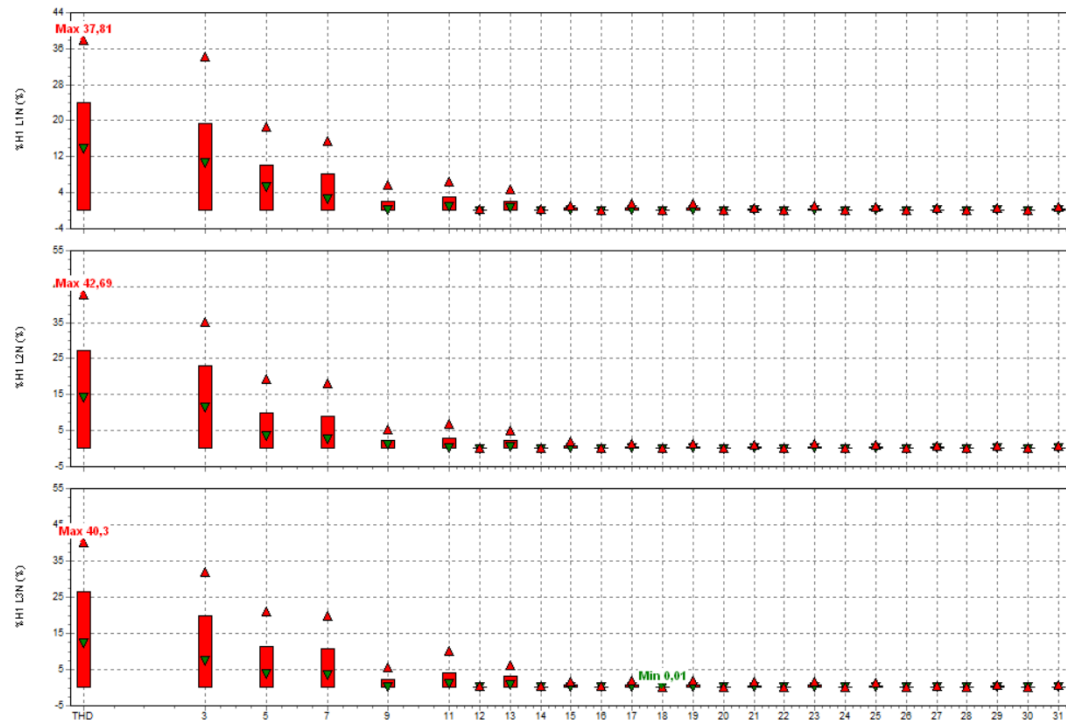


Figura 51. Espectro armónico de corriente de T2

Fuente: Sandra Chasiluisa

### Transformador 3

En la Figura 52 se muestra que las líneas de este transformador cuentan con la presencia de armónicos, los valores de corriente son bajos y esporádicos, por lo cual no es un problema crítico si mantiene el nivel de operatividad actual.

Conclusión: menos del 95% de los valores registrados no superan el 20% de distorsión armónica de corriente. No cumple con la norma.

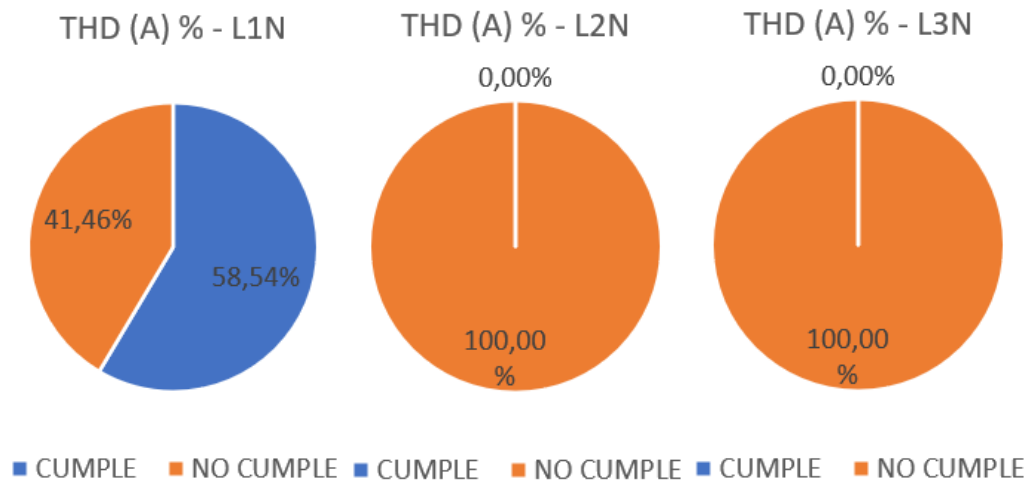


Figura 52. Porcentaje de valores registrados que cumplen con la ARCERNR 002-20 con respecto a la distorsión armónica de corriente del T3  
Fuente: Sandra Chasiluisa

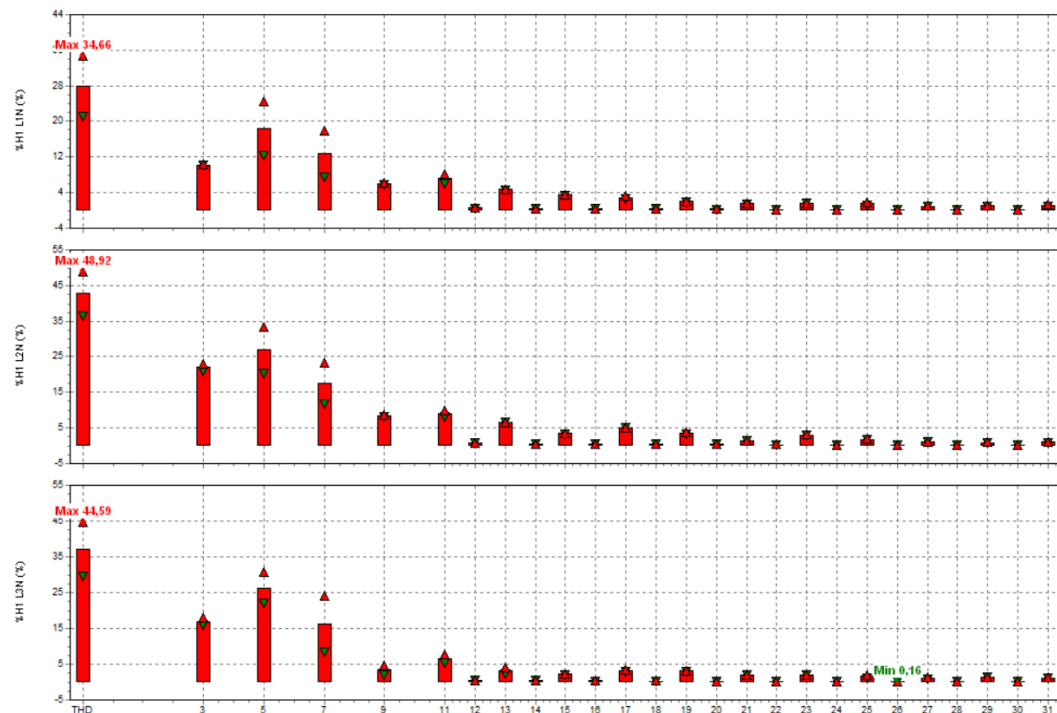


Figura 53. Espectro armónico de corriente de T3  
Fuente: Sandra Chasiluisa

En la Figura 53 se observan altos porcentajes de distorsión armónica de corriente, y la presencia del tercer, quinto y séptimo armónico.

#### 2.4.3.7 Planteamiento de soluciones

Para planear posibles soluciones primero se determinan cuáles son los problemas críticos del sistema eléctrico. En el análisis se destacaron los siguientes problemas en los transformadores de distribución del sistema eléctrico.

- Exceso de fluctuación rápida de voltaje en los tres transformadores, no cumple con la norma ARCERNNR 002-20.
- Presencia de corrientes en el neutro en los transformadores 1 y 2.
- Presencia de armónicos en la red, sobre todo armónicos de corriente, la distorsión armónica de corriente no cumple con la norma.
- Exceso de potencia reactiva en los tres transformadores, manteniendo el factor de potencia sobre 0,92 permitido por la norma.

Con respecto a la fluctuación rápida de voltaje se plantean posibles soluciones para baja tensión y características de las mismas en la Tabla 33.

Tabla 33. Planteamiento de soluciones para perturbación rápida de voltaje

Consecuencias	Soluciones	Características
Es una variación perceptible por el ojo humano, que se identifica más fácilmente en los dispositivos de iluminación led, como focos led, pantallas de computador, en el caso de los hospitales, monitores de signos vitales.  Produce una sensación molesta para el ojo humano, ya que es una reducción de luz de manera intermitente, que puede provocar fatiga, dolores de cabeza, incrementando el estrés en un ambiente de servicios hospitalarios.	Selección adecuada del sistema de alumbrado, la lámpara incandescente es menos sensible a las perturbaciones rápidas de voltaje y los balastos led son menos sensibles que los anteriores.	No es eficiente el uso de lámparas incandescentes y el uso de balastos electrónicos led inyecta armónicos a la red.
	Reguladores de voltaje.	Solución local, cuando las cargas generadoras están identificadas.
	Aislar las cargas perturbadoras de los circuitos de alimentación (Conexión de circuitos de iluminación cerca de la fuente de alimentación).	Modificación de tableros de distribución.
	Aumentar la potencia de cortocircuito de la red (conexión de transformadores en paralelo, reactor o capacitancia en serie).	Produce energía reactiva

	Aumentar el calibre de los conductores de baja tensión.	Altos costos y tiempo de trabajo
--	---	----------------------------------

Fuente: Sandra Chasiluisa

Otro de los problemas notorios es la presencia de corriente en el neutro, el cual se explica en la Tabla 34.

Tabla 34. Planteamiento de soluciones para la presencia de corriente en el neutro

Consecuencias	Soluciones	Características
Pueden producirse por desbalance de carga en las fases o por la introducción de armónicos de corriente de secuencia cero (armónicos de orden 3) provocando que los conductores, transformadores y generadores se sobrecalienten, dañando el aislamiento, disparo de las protecciones, seccionamiento del neutro, etc.	Estudio y corrección de balance de carga	Estudio de cargas, modificación de tableros de distribución, altos costos y tiempo de trabajo
	Aumentar el calibre de los conductores de neutro.	Altos costos y tiempo de trabajo.
	Instalar fuentes de compensación de corrientes como filtros de armónicos	Estudio de dimensionamiento y costos de importación e instalación

Fuente: Sandra Chasiluisa

Para evitar el sobrecalentamiento de los conductores es necesario aumentar el calibre del cable.

Actualmente el calibre del cable del transformador 1 es de (3x8x350+8x350+4x350) mcm, significa que, para las fases, neutro y tierra existe un cable AWG 350 que soporta una corriente de hasta 281 A en ducto enterrado según las especificaciones técnicas del Anexo L. Recalcando que son 8 conductores por fase, 8 conductores de neutro y 4 conductores de tierra se tiene que:

$$I_{total\ fases\ T1} = 8conductores.(281A)$$

$$I_{total\ fases\ T1} = 2248A$$

$$I_{total\ neutro\ T1} = 8conductores.(281A)$$

$$I_{total\ neutro\ T1} = 2248A$$

$$I_{total\ tierra\ T1} = 4conductores.(281A)$$

$$I_{total\ tierra\ T1} = 1124A$$

La corriente de neutro máxima en el transformador 1 es de 119,2 A según la Tabla 16, y la corriente que soportan los conductores instalados es de 2248 A, por lo tanto, no se requiere incrementar el calibre del cable, al contrario, este se encuentra dimensionado para corrientes de 1968,2 A del secundario del transformador (Figura 27).

El transformador 2, cuenta con un cable de (3x6x500+6x500+6x350) mcm, significa que para las fases y el neutro existe un cable AWG 500 que soporta una corriente de hasta 358 A en ducto enterrado y para tierra un cable AWG 350 que soporta una corriente de hasta 281 A en ducto enterrado. Recalcando que son 6 conductores por fase, 6 conductores de neutro y 6 conductores de tierra se tiene que:

$$I_{total\ fases\ T2} = 6conductores. (358A)$$

$$I_{total\ fases\ T2} = 2148A$$

$$I_{total\ neutro\ T2} = 6conductores. (358A)$$

$$I_{total\ neutro\ T2} = 2148A$$

$$I_{total\ tierra\ T2} = 6conductores. (281A)$$

$$I_{total\ tierra\ T2} = 1686A$$

La corriente de neutro máxima en el transformador 2 es de 152,9 A según la Tabla 21, y la corriente que soportan los conductores instalados es de 2148 A, por lo tanto, no se requiere incrementar el calibre del cable, de igual manera que en el transformador 1, este se encuentra dimensionado para corrientes de 1968,2 A del secundario del transformador.

La presencia de armónicos de corriente es la causa más crítica de la degradación de calidad de energía del hospital, también es causante de los dos problemas anteriores, se presentan alternativas de mitigación y sus características en la Tabla 35.

Tabla 35. Planteamiento de soluciones para la presencia de armónicos de corriente

<b>Consecuencias</b>	<b>Soluciones</b>	<b>Características</b>
Son producidos por la instalación de cargas no lineales que pueden	Batería con filtros de rechazo	Solución cuando ya existe un banco de capacitores. Solución individual y localizada.

<p>ocasionar grandes daños en los sistemas como la introducción de corriente residual en el neutro pudiendo hasta superar la corriente fundamental, pueden aparecer desequilibrios importantes de tensión que ocasionan averías en los equipos, aumentan las pérdidas en hierro del transformador, mal funcionamiento de cargas sensibles, sobrecarga de bancos de capacitores dando el fenómeno de resonancia o amplificación de armónicos.</p>		Evita la sobrecarga del banco de capacitores.
	Construcción de transformador con factor k	<p>Inmune a la presencia de armónicos.</p> <p>Alto costo de fabricación.</p>
	Generadores estáticos de reactiva	<p>Compensación de potencia reactiva.</p> <p>No compensan los armónicos de corriente, pero disminuyen los efectos de estos en los equipos.</p>
	Filtros pasivos	<p>Solución individual para un armónico.</p> <p>Instalado en serie o en paralelo a la carga generadora de armónicos.</p> <p>La carga debe ser estable.</p> <p>Dificultad de instalación.</p>
	Filtro activo	<p>Selección tecnológicamente más avanzada.</p> <p>Generador de corriente en contrafase a las corrientes de armónicos.</p> <p>Se colocan antes o después de la alimentación. (Salida del transformador)</p> <p>Se conectan en paralelo, menor dificultad de instalación.</p> <p>Se puede filtrar un conjunto de cargas variables.</p> <p>Posibilidad de compensar potencia reactiva.</p> <p>Filtros de cuatro hilos permite equilibrar la red.</p> <p>Con un correcto punto de conexión se puede evitar completamente la circulación de corriente de armónicos por todo el sistema.</p> <p>Facilidad de puesta en marcha.</p>

Fuente: [30]

Finalmente, la presencia de potencia reactiva en el sistema cumple con la norma, pero sigue siendo una condición para tomar en cuenta, puesto que el factor de



potencia no es menor a 0,92 pero si muy cercano. Se plantean soluciones para reducir la potencia reactiva en la Tabla 36.

Tabla 36. Planteamiento de soluciones para presencia de potencia reactiva

Consecuencias	Soluciones	Características
Se produce comúnmente por el uso de equipos inductivos como motores, generadores, etc. Pueden ocasionar pérdidas de potencia y energía eléctrica activa, recargo por bajo factor de potencia emitido por las entidades distribuidoras de energía eléctrica, pérdidas de potencia por efecto joule en los conductores, saturación de las líneas de transporte.	Compensación fija (Baterías de condensadores o banco de capacitores) sin filtro	El mal dimensionamiento genera potencia reactiva capacitiva. Únicamente para carga que produzca potencia reactiva constante. Sensible a las corrientes de armónicos (resonancia).
	Compensación regulada (banco de capacitores operada por tiristores o contactores).	Carga reactiva variable. Contactores cuando las corrientes de armónicos son bajas y tiristores cuando existen corrientes de armónico críticas.
	Filtro activo	Inyecta potencia reactiva en contrafase. Es mejor como filtro de armónicos evitando el fenómeno de resonancia (amplificación de armónicos) en el banco de capacitores.
	Generador estático de reactiva	Compensa a tiempo real y por fase la corriente reactiva ya sea inductiva o capacitiva.
	Equipos con mayor eficiencia	Equipos más actualizados que aprovechen mejor la energía.

Fuente: Sandra Chasiluisa

Algunos equipos poseen mejor viabilidad técnica y económica para su implementación en las instalaciones del hospital, se seleccionará colocando un X en los puntos a favor de cada equipo en la Tabla 37.

Tabla 37. Selección de equipos tentativos más eficientes

	Compensación de potencia reactiva	Filtro armónicos	Balanc e de fases	Facilidad de instalación	Mejora continua	Costo
Factor k	X	X	-	-	-	-
Banco de capacitores	X	-	-	X	X	X
Generador estático de reactiva	X	-	-	X	X	X
Filtro activo	X	X	X	X	X	X
Filtro pasivo	-	X	-	-	-	X

Fuente: Sandra Chasiluisa

Se selecciona el punto de medición 1 en los tres transformadores de acuerdo a la Figura 54. Se ha decidido seleccionar y dimensionar un filtro activo, gracias a la variedad de sus beneficios, y la posibilidad de mejora continua.

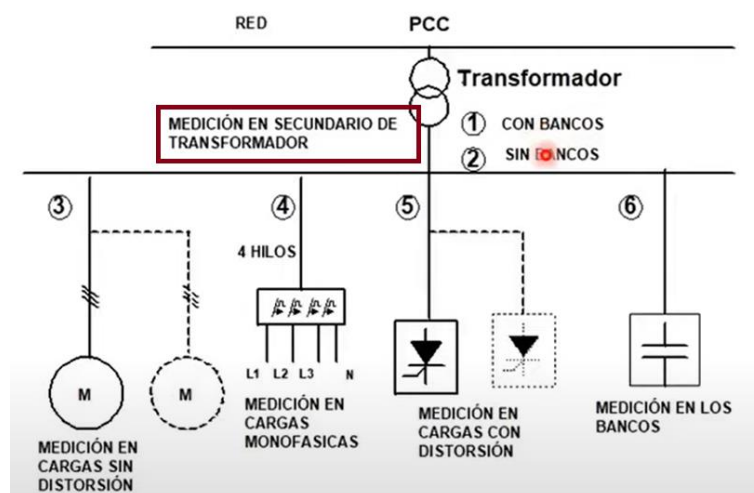


Figura 54. Puntos de medición para estudio de calidad de energía

### Dimensionamiento del filtro activo

Es un equipo multifunción, que permite filtrar armónicos, compensar la potencia reactiva y equilibrar fases.

Se dimensionará de acuerdo a las siguientes formulas:

### Corriente de selección de filtro activo

$$I_{\text{Filtro activo}} = \sqrt{I_{\text{armónicos}}^2 + I_{\text{pot reactiva}}^2 + I_{\text{equilibrado fases}}^2} \left[ \frac{A}{\text{fase}} \right]$$

ecuación 23

Donde

$I_{\text{Filtro activo}}$ : Corriente de filtro

$I_{\text{armónicos}}$ : Corriente armónica máxima a filtrar

$I_{\text{pot reactiva}}$ : Corriente reactiva máxima a compensar

$I_{\text{equilibrado fases}}$ : Corriente máxima de desequilibrio a compensar

### Corriente de armónicos:

$$I_{\text{armónicos fase1}} = I_{\text{RMS fase1}} \cdot \sqrt{\frac{\text{THD}_I^2 \text{ fase1}}{100^2 + \text{THD}_I^2 \text{ fase1}}} \cdot \left( 1 + \frac{\text{THD}_V \text{ fase1}}{10} \right) \left[ \frac{A}{\text{fase}} \right]$$

ecuación 24

Donde:

$I_{\text{armónicos fase1}}$ : Corriente de armónica máxima de la fase medida

$I_{\text{RMS fase1}}$ : Corriente Irms en el instante t

$\text{THD}_I \text{ fase1}$ : Distorsión armónica de corriente en el instante t

$\text{THD}_V \text{ fase1}$ : Distorsión armónica de voltaje en el instante t

### Corriente de potencia reactiva:

$$I_{\text{pot reactiva fase1}} = \frac{Q_{\text{fase1}}}{V_{\text{fase1}}}$$

ecuación 25

Donde:

$I_{\text{pot reactiva fase1}}$ : Corriente reactiva máxima en la fase medida

$Q_{\text{fase1}}$ : Potencia reactiva en el instante t

$V_{\text{fase1}}$ : Voltaje de fase en el instante t

**Corriente de desequilibrio de fases:**

$$I_{\text{equilibrado fases}} = \text{El valor mas grande de } \left[ \begin{matrix} I_{\text{media}} - I_{\text{min}} \\ I_{\text{max}} - I_{\text{media}} \end{matrix} \right]$$

ecuación 26

Donde:

$I_{\text{equilibrado fases}}$  : Corriente requerida para el equilibrio de fases

**Cálculo:**

Para determinar la  $I_{\text{armónicos}}$  a utilizar en la ecuación 23, se aplica la ecuación 24, para cada instante de medición de cada fase y se tomara los valores máximos de corrientes de armónicos.

Por ejemplo, se tomarán los datos correspondientes al primer registro a las 08:10 am del 6/11/2021 del Transformador 1

Donde:

$$I_{RMS \text{ fase1-T1}} = 437,5 A$$

$$THD_I \text{ fase1-T1} = 14,23 \%$$

$$THD_V \text{ fase1-T1} = 1,24\%$$

$$I_{\text{armónicos fase1-dato 1-T1}} = 437,5A * \sqrt{\frac{14,23^2}{100^2 + 14,23^2} \cdot \left(1 + \frac{1,24}{10}\right)} \left[ \frac{A}{\text{fase}} \right]$$

$$I_{\text{armónicos fase1-dato 1-T1}} = 69,28A$$

$$I_{\text{armónicos fase1-dato 1008-T1}} = 65,38A$$

Aplicando la ecuación 24, a todos los datos registrados de cada fase, de cada transformador, el valor máximo obtenido, son las siguientes corrientes mostradas en la Tabla 38.

Tabla 38. Corrientes armónicas máximas de los tres transformadores

	T1			T2			T3		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
armonica (A)	77,388	84,458	84,77	51,41	62,75	42,27	5,13	5,89	5,41

Fuente: Sandra Chasiluisa

Seleccionando el valor de corriente máxima de cada transformador, también se puede decir sobre la corriente del transformador 3, que es bajo en comparación al 1 y 2, a pesar de tener una distorsión armónica de corriente alta, la corriente es baja por lo tanto no afecta al sistema.

El comportamiento de las corrientes armónicas se visualiza en las Figura 55, Figura 56 y Figura 57. Claramente la presencia de armónicos en el transformador es constante, en el transformador 2 hubo días en los que no se han conectado cargas no lineales y finalmente en el transformador 3 las corrientes son momentáneas.

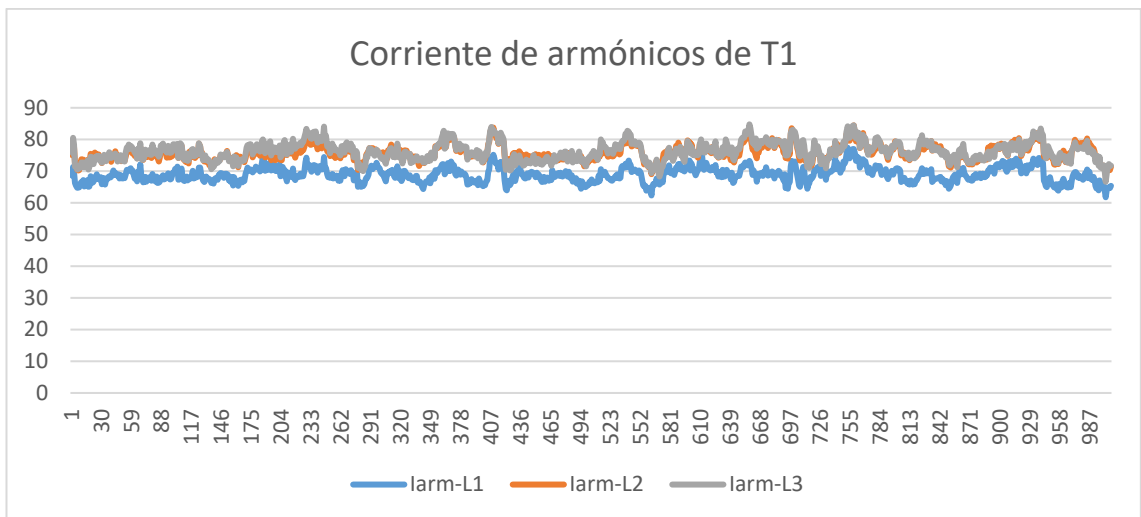


Figura 55. Corriente de armónicos de T1  
Fuente: Sandra Chasiluisa

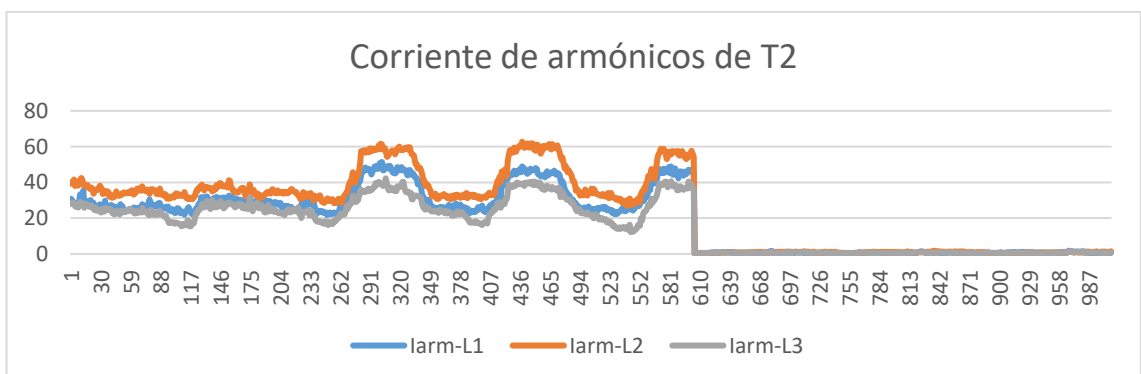


Figura 56. Corriente de armónicos de T2  
Fuente: Sandra Chasiluisa

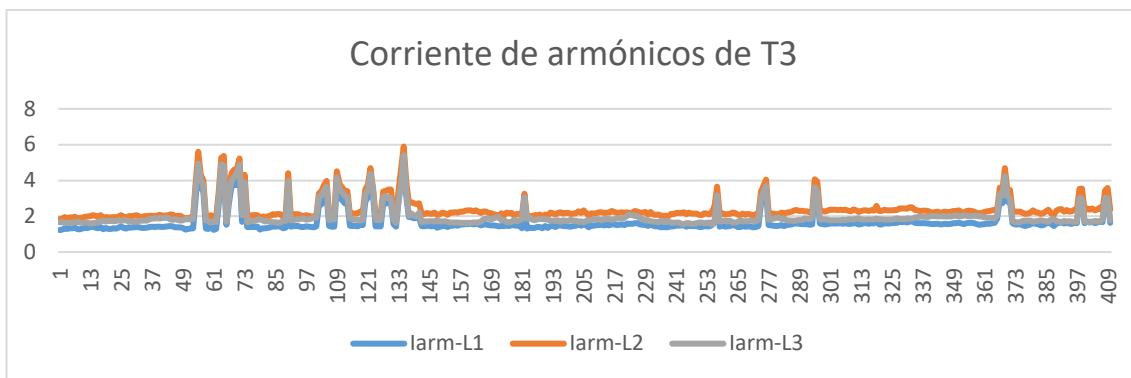


Figura 57. Corriente de armónicos de T3  
Fuente: Sandra Chasiluisa

Para determinar la  $I_{pot\ reactiva}$  a utilizar en la ecuación 23, se aplica la ecuación 25, para cada instante de medición de cada fase y se tomara los valores máximos de corrientes de potencia reactiva que se desea compensar.

Por ejemplo, se tomarán los datos correspondientes al primer registro a las 08:10 am del 6/11/2021 del Transformador 1

Donde:

$$Q_{fase1-T1} = 10340\ var$$

$$V_{fase1-T1} = 133,1V$$

$$I_{pot\ reactiva\ fase1} = \frac{10340var}{133,1V}$$

$$I_{pot\ reactiva\ fase1-dato1-T1} = 77,69A$$

$$I_{pot\ reactiva\ fase1-dato1-T1008} = 93,28A$$

Aplicando la ecuación 24, a todos los datos registrados de cada fase, de cada transformador, el valor máximo obtenido, son las siguientes corrientes en la Tabla 39:

Tabla 39. Corrientes de potencia reactiva máximas de los tres transformadores

	T1			T2			T3		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Ipot reactiva (A)	137,54	155,75	149,33	74,01	112,75	71,36	5,60	5,27	4,04

Fuente: Sandra Chasiluisa

Seleccionando el valor de corriente máxima de cada transformador, también se puede decir sobre la corriente del transformador 3, que es bajo en comparación al 1 y 2 al igual que en la corriente de armónicos, la corriente reactiva es baja por lo tanto no afecta al sistema.

El comportamiento de las corrientes de potencia reactiva se visualiza en las Figura 58, Figura 59 y Figura 60. La potencia reactiva en los transformadores 1 y 2 es constante, el transformador 3 no presenta grandes corrientes de potencia reactiva.

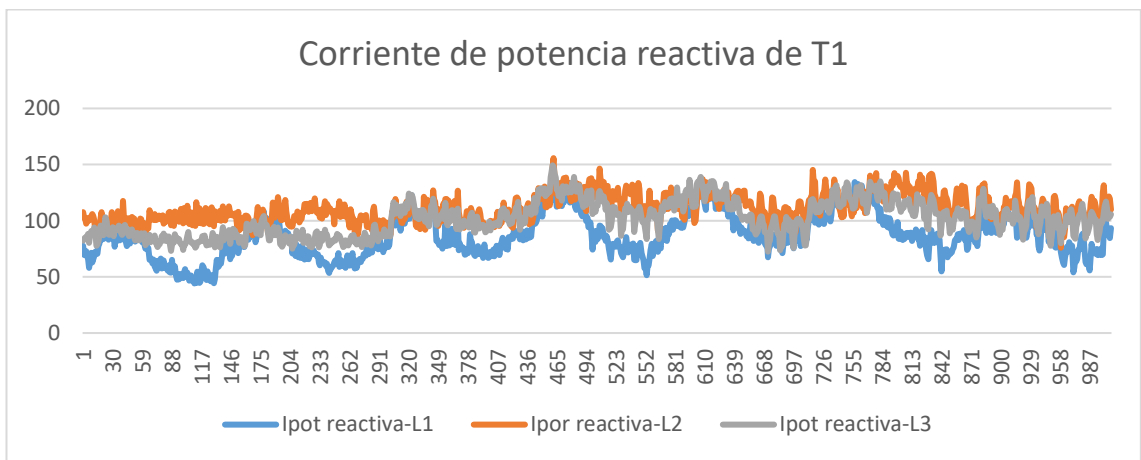


Figura 58. Corriente de potencia reactiva del transformador 1  
Fuente: Sandra Chasiluisa

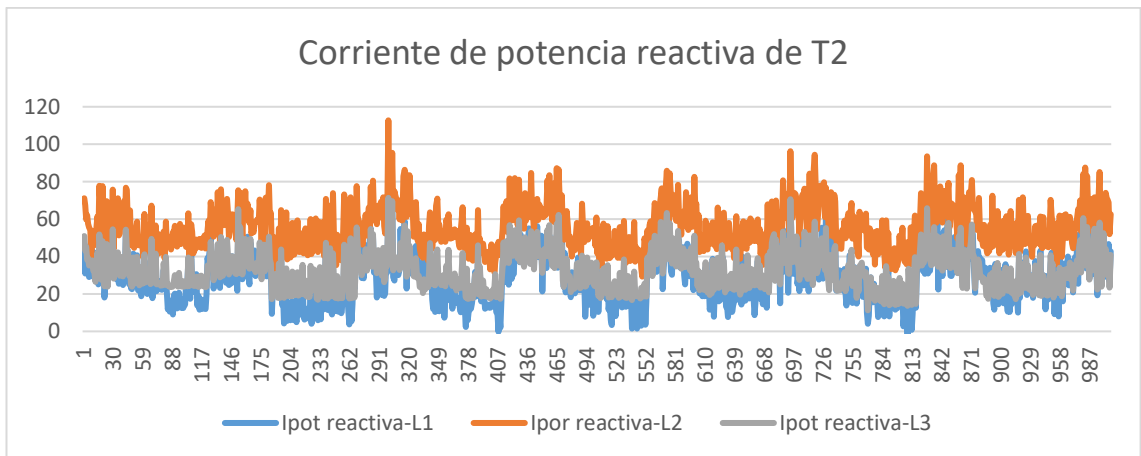


Figura 59. Corriente de potencia reactiva del transformador 2  
Fuente: Sandra Chasiluisa

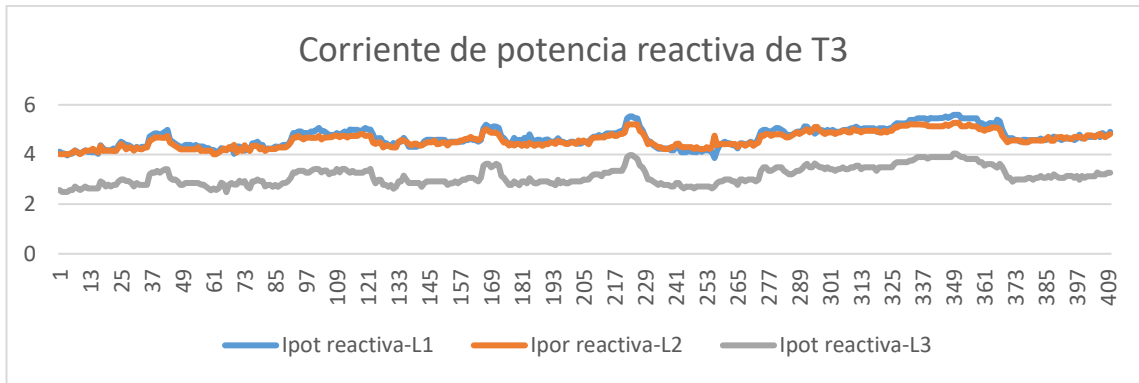


Figura 60. Corriente de potencia reactiva del transformador 3  
Fuente: Sandra Chasiluisa

Para determinar la  $I_{equilibrado\ fases}$  a utilizar en la ecuación 23, se aplica la ecuación 26, para cada instante de medición de cada fase y se tomara los valores máximos de corrientes de desequilibrio de la siguiente manera:

$$I_{equilibrado\ fases} = \text{El valor mas grande de } \left[ \frac{I_{media} - I_{min}}{I_{max} - I_{media}} \right]$$

$$I_{media} = \frac{I_{RMS\ fase1} + I_{RMS\ fase2} + I_{RMS\ fase3}}{3}$$

Por ejemplo, se tomarán los datos correspondientes al primer registro a las 08:10 am del 6/11/2021 del Transformador 1

Donde:

$$I_{RMS\ fase1-T1} = 437,5A$$

$$I_{RMS\ fase2-T1} = 415,5A$$

$$I_{RMS\ fase2-T1} = 348,6A$$

$$I_{max} = \text{Maximo valor de } (I_{RMS\ fase1-T1}, I_{RMS\ fase2-T1}, I_{RMS\ fase2-T1})$$

$$I_{max} = 437,5A$$

$$I_{min} = \text{Minimo valor de } (I_{RMS\ fase1-T1}, I_{RMS\ fase2-T1}, I_{RMS\ fase2-T1})$$

$$I_{min} = 348,6A$$

$$I_{media} = \frac{437,5 + 415,5 + 348,6}{3} A$$



$$I_{media} = 400,53A$$

$$I_{equilibrado\ fases} = \text{El valor mas grande de } \begin{bmatrix} 400,53 - 348,6 = 51,93 \\ 437,5 - 400,53 = 36,97 \end{bmatrix} A$$

$$I_{equilibrado\ fases} = 51,93A$$

Aplicando la ecuación 26, a todos los datos registrados de cada fase, de cada transformador, el valor máximo obtenido, son las siguientes corrientes en la Tabla 40:

Tabla 40. Corrientes máximas de desequilibrio de fases de los tres transformadores

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
Iequilibrado fases (A)	76,93	58,70	1,20

Fuente: Sandra Chasiluisa

Las corrientes de desequilibrio del transformador 1 y 2 se aproximan a las corrientes de armónicos y de potencia reactiva, mientras que la del transformador 3 es prácticamente despreciable.

Finalmente aplicando la ecuación 23 se calcula corriente de dimensionamiento del filtro activo para el transformador 1 y en la Tabla 41 se muestran las corrientes del transformador 2 y 3.

$$I_{Filtro\ activo} = \sqrt{I_{armónicos}^2 + I_{pot\ reactiva}^2 + I_{equilibrado\ fases}^2} A$$

$$I_{Filtro\ activo} = \sqrt{84,77^2 + 155,75^2 + 76,93^2} A$$

$$I_{Filtro\ activo} = 193,3A$$

Se aproxima al inmediato superior de selección del filtro obteniendo como corriente se selección:

$$I_{Filtro\ activo} = 200A$$

Tabla 41. Corriente de selección del filtro activo de los transformadores 1 y 2

	T1	T2	T3
Ifiltro activo (A)	193,30	141,76	8,22
FILTRO	200	150	

Fuente: Sandra Chasiluisa

#### **2.4.3.8 Informe final**

Visualizar el Anexo G, donde se muestran las gráficas de comportamiento de las variables medidas en los 7 días de medición.

### **2.5 Conclusiones Capítulo II**

La selección de los puntos de medición se determinó en el secundario de los transformadores, se realizó por medio del análisis de la viabilidad técnica y humana, es decir de los equipos a disponibilidad y las metas que se esperan alcanzar, en el caso del hospital, lo primero es realizar un análisis de calidad de energía eléctrica global sobre los tres transformadores de distribución que alimentan los dos edificios hospitalarios.

El equipo utilizado es un analizador de red FLUKE 435 SII, el programa power Log para la descarga de datos. La selección de equipos depende de los puntos de medición y los problemas de índole eléctrico a tratar.

Existe el problema de presencia de corrientes en el neutro de 119,2 A en el Transformador 1 y 152,9 A en el transformador 2, el cual se encuentra resultado por el sobredimensionamiento de los conductores de neutro con un calibre AWG 350 y 8 conductores para neutro, soportando una corriente de 2248A en el transformador 1, calibre AWG 500 y 6 conductores para neutro, soportando una corriente de 2148A en el transformador 2.

El problema potencia es la presencia de armónicos de corriente, la introducción de armónicos de corriente con un máximo de 84,77 A de corriente armónica en el transformador 1 62,75 A en el transformador 2, para el cual se realizó el cálculo de un filtro activo para cada transformador, cuyas dimensiones son 200 A para el transformador 1 y 150 A para el transformador 2.

## **CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA**

### **3.1 Análisis de los resultados:**

En el capítulo anterior se planteó un modelo de gestión de energía acorde a la factibilidad del Hospital General de Latacunga descrito en la Tabla 10, siguiendo este proceso se realizó una auditoria de energía eléctrica en los transformadores de distribución del hospital, obteniendo los resultados de los apartados 2.4.3.5 y 2.4.3.6, que en resumen presentan exceso de armónicos de corriente en el sistema, provocando corrientes en el neutro y sobrecalentamiento de los conductores, también existe presencia excesiva de potencia reactiva aunque esta aún se encuentra dentro de la norma.

En base a estos problemas eléctricos presentados, se plantea como mejor solución la implementación de un filtro activo multifunción AFQ de circutor. Con los valores obtenidos del analizador de red se determina la dimensión del filtro a utilizar, cuya corriente de filtro es 200A para el transformador 1 y 150 A para el transformador 2. Tomando en cuenta las condiciones de la carga instalada que es variable, las condiciones de medición, únicamente en el secundario de los transformadores y las condiciones del estado del sistema eléctrico, se ha seleccionado para el transformador 1, un filtro activo trifásico paralelo multifunción de cuatro hilos de 200A AFQ-4W, cuyo costo es de aproximadamente \$5000 con los gastos de importación, y para el transformador 2, un filtro activo trifásico paralelo multifunción de cuatro hilos de 150A AFQ-4W, con las características mostradas en el Anexo H.

### **3.2 Validación técnica -económica de los resultados:**

A continuación, se detalla el presupuesto del proyecto, donde se detalla los costos realizados y los costos a realizarse en caso de la implementación de los equipos seleccionados:

Descripción	Unidades	Costo uni	Costo final
<b>Gastos realizados</b>			
Analizador de calidad FLUKE 435 SII	1	\$50/dia-20 días	\$1000
Varios	1	\$700	\$700
<b>Gastos tentativos</b>			
Filtro activo trifásico de 4 hilos de 200A	1	\$5000	\$4000
Filtro activo trifásico de 4 hilos de 150A	1	\$5000	\$4000
Costos de instalación	2	\$700	\$1400
Varios	1	\$700	\$700
<b>Total</b>			<b>\$11800</b>

Donde el estudiante costea los gastos del análisis y auditoría siendo de \$1700, quedando \$10100 que el hospital invertirá si acepta implementar la propuesta.

Para determinar el tiempo de recuperación, se calcula la potencia ahorrada con la instalación del filtro activo, utilizando las ecuaciones del apartado 1.2.3.6, principalmente la ecuación 17. Los valores registrados por el analizador son efectivos, por lo tanto, se dispone de la potencia aparente efectiva, potencia activa efectiva y potencia reactiva efectiva. Descomponiéndose de la siguiente manera:

$$\begin{array}{c}
 S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \swarrow \quad \searrow \\
 (S_1^+)^2 + (S_{U1})^2 \quad D_{e1}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \swarrow \quad \searrow \\
 (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 \quad P_H^2 + D_{eH}^2
 \end{array}$$

De modo que,  $S_{eN}^2$  representa todas las potencias correspondientes a los valores no fundamentales, es decir a los valores de pérdidas por armónicos en el sistema.

$$\begin{aligned}
 S_e^2 &= S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \\
 S_{eN}^2 &= S_e^2 - S_{e1}^2 = D_{e1}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \\
 &= (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2
 \end{aligned}$$

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - P_1^2 - Q_1^2}$$

ecuación 27

Se aplica la ecuación 27, para los 1008 datos registrados, y de ellos se ha tomado como referencia el valor de potencia disipada que más se repite (MODA), obteniendo los siguientes datos.

Potencia ahorrada	W	kW
T1	29115,14	29,12
T2	12647,02	12,65

Para determinar la energía ahorrada al mes, se multiplica la potencia por el número de horas que opera al mes, según el análisis del perfil de consumo diario, aproximadamente son 8h que el hospital presenta mayor demanda, obteniendo 240 horas de mayor demanda en el mes. Mostrando como resultado los siguientes valores de energía.

Energía ahorrada		
T1	6987,63	kWh/mes
T2	3035,28	kWh/mes

Finalmente, para obtener el valor de los costos a ahorrar por la instalación del filtro, se multiplica por el costo kWh presentado en el pliego tarifario de Elepco SA, con un valor de 0,065\$/kWh, dando como resultado los siguientes costos.

Costo		
T1	454,20	\$
T2	197,29	\$
<b>TOTAL</b>	<b>651,49</b>	<b>\$</b>

La recuperación de la inversión simple se calcula con la siguiente ecuación:

$$RECUPERACION = \frac{INVERSION}{AHORRO/mes}$$

$$RECUPERACION = \frac{\$10100}{\$651.49/mes}$$

$$RECUPERACION = 15meses = 1 \text{ año y } 3 \text{ meses}$$

Los valores de recuperación de la inversión y rentabilidad se calculan de acuerdo al método de financiación de la entidad interesada.

### **3.3 Evaluación de expertos**

El documento de aval de expertos se encuentra en el Anexo K- Aval de experto.

### **3.4 Conclusiones del capítulo**

Se determino el ahorro de energía de 6987kWh/mes en el transformador 1 y 3035kWh/mes en el transformador 2, en base a las perdidas por armónicos en los transformadores, usando los valores de potencias efectivas registradas por el analizador de red.

El ahorro total calculado es de \$651 mensuales, donde la inversión se recupera en 1 año y 3 meses.

En base a la potencia reactiva que produce el hospital, existe posibilidad de pagar penalización por factor de potencia, hace más urgente la adquisición de un equipo para mitigar armónicos y reducir la potencia reactiva.

### **Conclusiones generales**

Se realizó una investigación bibliográfica especializada en temas de gestión, auditoría eléctrica y calidad de energía, para plantear el modelo de gestión adecuado a una entidad pública de acuerdo a las recomendaciones de ISO 50001.

Se realizó una auditoría eléctrica usando los procedimientos de ISO 50002, a través de un análisis de calidad de energía en los transformadores de distribución del hospital, utilizando un analizador de red proporcionado por la Universidad Técnica de Cotopaxi, obteniendo como resultado crítico la presencia de armónicos de corriente en los transformadores 1 en la línea 3 y transformador 2 en las tres líneas, con más del 20% de distorsión armónica de corriente. Obteniendo una corriente armónica máxima de 84,77 A en la línea 3 del transformador 1 y una corriente reactiva máxima de 155,75 A en la línea 2 del transformador 1.

Se planteó como posible solución un filtro activo trifásico de cuatro hilos de 200 A para el transformador 1 y un filtro activo trifásico de cuatro hilos de 150 A para el transformador 2, con la finalidad de compensar las corrientes de armónicos y la potencia reactiva, también balancear la corriente entre las fases de los transformadores, con un costo de adquisición, importación e instalación de \$10100.

### **Recomendaciones**

Para mejorar aún más la eficiencia eléctrica del Hospital General de Latacunga, se recomienda realizar más mediciones de calidad de potencia en cada una de las barras alimentadas por los transformadores 1 y 2, este proyecto es el punto de partida para un análisis más exhaustivo, que identifique las cargas y los sitios donde exista mayor contenido de armónicos.

Se recomienda adquirir buenas prácticas de ahorro de energía eléctrica y promocionar campañas de meeting como parte de la socialización de metas y resultados.

Adquirir equipos que promuevan la eficiencia eléctrica, con un alto factor de potencia y componentes de mitigación de armónicos.

## Referencias bibliográficas.

- [1] J. I. Briano, M. J. Baez, and R. Moya Morales, “Eficiencia energética en Ecuador: Identificación de oportunidades,” *Diseño y Desarrollo. Prod.*, pp. 4–44, 2016.
- [2] W. Löhr, K. Gauer, N. Serrano, and A. Zamorano, “Eficiencia Energética en Hospitales Públicos,” *Igarss 2014*, no. 1, pp. 6–15, 2014.
- [3] H. Del Pozo Barrezueta, *Ley Orgánica de Eficiencia Energética*. Ecuador, Quito, 2019, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/Ley-Eficiencia-Energética.pdf>
- [4] S. de C. de O. SECOB., “OBRA O PROYECTO: Inauguración del Hospital General Latacunga,” Latacunga, 2016. [Online]. Available: <http://docplayer.es/122748455-Informacion-tecnica-de-obra-obra-o-proyecto.html>
- [5] E. M. Quimbita, “AUDITORIA ENERGETICA DEL HOSPITAL,” 2002.
- [6] Schneider Electric, “Eficiencia energética en hospitales: tendencias, soluciones, resultados,” 2017. <https://hospitecna.com/instalaciones/eficiencia-energetica-en-hospitales-tendencias-soluciones-resultados/>
- [7] A. Bárcena, “El Cambio Climático en América Latina y el Caribe,” *Semarnat*, vol. 23, no. 2000, pp. 23–30, 2006, [Online]. Available: <http://www.eclac.cl/>
- [8] J. Pedrajas and A. Morell, “Auditoría energética de un hospital,” pp. 1–210, 2017.
- [9] C. A. Isaza Roldan and N. Jara, “Programas de Eficiencia Energética y Etiquetado en el Ecuador—Revisión del Estado Actual,” *II Encuentro Tecnol. E Ing. X Simp. Int. En Energías*, no. July 2015, 2014, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/280445703>
- [10] O. Arellano, “Estudio y análisis de eficiencia energética del sistema eléctrico del hospital IEISS - Ibarra,” UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS



ARMADAS - ESPE, 2015.

- [11] A. S. Haro Larco, “Integración de la norma ISO 50001:2011 con el Modelo Ecuador,” Universidad San Francisco de Quito – Ecuador, 2015.
- [12] Ministerio de Salud, “Hospital General Latacunga: Reseña Histórica,” 2021. <https://hgl.mspz3.gob.ec/index.php/hgl/his>
- [13] M. A. Espinosa Nava, “ENERGÍA.” p. 5,6, 2021. [Online]. Available: [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/79677/secme-1022\\_1.pdf?sequence=1](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/79677/secme-1022_1.pdf?sequence=1)
- [14] F. J. REY MARTINEZ and E. VELASCO GOMEZ, *Eficiencia energética en edificios*, Primera. España: CimaPress, 2006.
- [15] J. C. ASTUDILLO, “DIAGNOSTICO Y AUDITORIA ENERGETICA.” Latacunga, 2019.
- [16] B. L. Capehart, W. C. Turner, and W. J. Kennedy, *Guide to Energy Management*, Cuarta edi. The Fairmont Press, 2003.
- [17] W. C. TURNER, *ENERGY MANAGEMENT HANDBOOK*, Quinta edi. Nueva York, 2004.
- [18] M. Rodriguez, “Geoinnova,” *ISO 50001: Sistema de Gestión Energética*, 2016. [https://geoinnova.org/blog-territorio/iso-50001-sistema-de-gestion-energetica/?gclid=CjwKCAiAJoeRBhAJEiwAYY3nDLE8EY1TDGAo7pK1C\\_S9D5r6KYwNz1Pq8WtQ\\_pszFRWLO3SvneqjVxoCwdcQAvD\\_BwE](https://geoinnova.org/blog-territorio/iso-50001-sistema-de-gestion-energetica/?gclid=CjwKCAiAJoeRBhAJEiwAYY3nDLE8EY1TDGAo7pK1C_S9D5r6KYwNz1Pq8WtQ_pszFRWLO3SvneqjVxoCwdcQAvD_BwE)
- [19] H. Acoltzi and H. Pérez, “ISO 50001, Gestión de Energía,” pp. 157–161, Oct. 2011.
- [20] D. A. LARRAHONDO CHAVEZ, “IMPLEMENTACIÓN DE UNA AUDITORÍA ENERGÉTICA DE ACUERDO A LA NORMA ISO 50002 EN UNA EMPRESA PANIFICADORA,” UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, 2019.
- [21] A. Kusko and M. T. Thompson, *POWER QUALITY IN ELECTRICAL SYSTEMS*. NEW YORK: McGraw-Hill, 2007.
- [22] C. W. Aguilar Romero, “AUDITORÍA ENERGÉTICA EN EL HOSPITAL

JULIUS DOEPFNER DE LA CIUDAD DE ZAMORA,” UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA, 2012.

- [23] Agencia de regulación de control de energía y recursos naturales no renovables, *REGULACIONES 2020*. ECUADOR, 2020, p. 2.
- [24] Agencia de regulación de control de energía y recursos naturales no renovables, *Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*. ECUADOR, 2020.
- [25] C. Sankaran, “Power Quality Progression,” in *Power Quality*, NEW YORK: CRC Press LLC, 2002, pp. 1–15.
- [26] R. Sastry Vedam and M. S. Sarma, *POWER QUALITY VAR Compensation in Power Systems*. FLORIDA: Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- [27] Cisar, “Manual técnico 02 05,” no. 34, 2015, [Online]. Available: <https://cisar.es/wp-content/uploads/2015/07/manual-tecnico-cisar.pdf>
- [28] N. MUÑOZ GALEANO, “Contribución a la mejora de la eficiencia energética en sistemas trifásicos a cuatro hilos mediante la compensación selectiva de las potencias ineficientes,” 2011, [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/10988>
- [29] Corporation Fluke, “Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica-Manual de uso.” 2012.
- [30] Circutor, “Soluciones para mitigar los armónicos eléctricos en nuestras instalaciones,” 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xPJUGu5KgI8>