

**AUDITORÍA ENERGÉTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO
ELÉCTRICO EN EL BLOQUE 4 DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL
BRAVO**

**JORGE ENRIQUE CASTAÑO OSPINA
FRANCISCO ALBERTO ORREGO ZAPATA
ALEJANDRO RAMÍREZ QUINTERO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

**AUDITORÍA ENERGÉTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO
ELÉCTRICO EN EL BLOQUE 4 DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL
BRAVO**

**JORGE ENRIQUE CASTAÑO OSPINA
FRANCISCO ALBERTO ORREGO ZAPATA
ALEJANDRO RAMÍREZ QUINTERO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero electricista

**Asesor técnico
Carlos Mario Moreno Paniagua
Ingeniero eléctrico**

**Asesor metodológico
José Ricardo Velasco Méndez
PhD en educación.**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

Contenido

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Planteamiento del problema | 9 |
| 1.1 | Descripción..... | 9 |
| 1.2 | Formulación | 10 |
| 2. | Justificación | 11 |
| 3. | Objetivos..... | 13 |
| 3.1 | Objetivo general | 13 |
| 3.2 | Objetivos específicos..... | 13 |
| 4. | Referentes teóricos | 14 |
| 4.1 | Eficiencia energética | 14 |
| 4.2 | Auditoría energética | 15 |
| 4.3 | Uso eficiente de la energía | 16 |
| 4.4 | Dispositivos de adquisición de datos | 16 |
| 4.5 | Norma ISO5002 de auditoría energética..... | 18 |
| 5. | Metodología..... | 20 |
| 5.1 | Tipo de proyecto..... | 20 |
| 5.2 | Método | 20 |
| 5.3 | Instrumentos de recolección de información. | 23 |
| 5.3.1. | Fuentes primarias..... | 23 |
| 5.3.2. | Fuentes secundarias | 23 |
| 6. | Resultados..... | 24 |
| 7. | Conclusiones..... | 44 |
| 8. | Recomendaciones | 45 |
| 9. | Referencias bibliográficas | 46 |
| 10. | Anexos | 49 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Gateway de comunicación. | 17 |
| Figura 2. Diagrama de interconexión del gateway. | 18 |
| Figura 3. Tabla de aforo de cargas. | 26 |
| Figura 4. Tabla de lecturas de voltajes y corrientes. | 26 |
| Figura 5. Primer análisis de la lectura de voltajes. | 27 |
| Figura 6. Analítica de datos de las variables medidas. | 27 |
| Figura 7. Curva del voltaje de la fase A. | 28 |
| Figura 8. Diagrama de la conexión de los dispositivos. | 28 |
| Figura 9. Medidores multifuncionales. | 30 |
| Figura 10. Mediciones de la fase B. | 31 |
| Figura 11. Análisis de datos de la fase B. | 32 |
| Figura 12. Curva de comportamiento del voltaje B. | 32 |
| Figura 13. Diagrama de dispersión. | 35 |
| Figura 14. Diagrama de relación consumo voltaje. | 35 |
| Figura 15. Diagrama de relación consumo corriente. | 36 |
| Figura 16. Diagrama de registro de consumo. | 36 |
| Figura 17. Diagrama de dispersión. | 38 |

Resumen

AUDITORÍA ENERGÉTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN EL BLOQUE 4 DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, TRABAJO DE GRADO

**JORGE ENRIQUE CASTAÑO OSPINA
FRANCISCO ALBERTO ORREGO ZAPATA
ALEJANDRO RAMÍREZ QUINTERO**

La Institución Universitaria Pascual Bravo ha experimentado en los últimos años un crecimiento en su infraestructura física y población académica, lo cual se ha traducido en un aumento sostenido de la demanda de energía eléctrica. Los análisis de los consumos históricos muestran incrementos anuales del orden del 5%. El Bloque 4 de la Institución Universitaria Pascual Bravo alberga varios laboratorios y talleres donde se encuentran equipos eléctricos y electrónicos de alto consumo energético. En los últimos meses se han evidenciado irregularidades en el sistema eléctrico de este bloque que se manifiestan en fluctuaciones de voltaje, armónicos, interrupciones del servicio y baja regulación de voltaje. Desde el punto de vista técnico, los análisis previos han demostrado la existencia de múltiples deficiencias en el sistema eléctrico actual que derivan en un funcionamiento ineficiente, interrupciones del servicio e incluso daños en los equipos. Con las medidas identificadas, se procederá a estimar su impacto energético y económico. Se calculará la reducción potencial de consumo eléctrico en kWh/año y los ahorros económicos considerando la tarifa promedio de la institución. Asimismo, dado que la energía proviene principalmente de fuentes térmicas, se cuantificará la disminución de emisiones de gases efecto invernadero utilizando los factores de emisión del sistema interconectado nacional.

Palabras claves: Voltaje, corriente, uso racional de la energía.

Abstract

In recent years, the Pascual Bravo University Institution has experienced growth in its physical infrastructure and academic population, which has translated into a sustained increase in the demand for electrical energy. Analysis of historical consumption shows annual increases of around 5%. Block 4 of the Pascual Bravo University Institution houses several laboratories and workshops where electrical and electronic equipment with high energy consumption is located. In recent months, irregularities have been evident in the electrical system of this block that manifest themselves in voltage fluctuations, harmonics, service interruptions and low voltage regulation. From a technical point of view, previous analyzes have shown the existence of multiple deficiencies in the current electrical system that lead to inefficient operation, service interruptions and even equipment damage. With the identified measures, their energy and economic impact will be estimated. The potential reduction of electricity consumption in kWh/year and the economic savings will be calculated considering the average rate of the institution. Likewise, given that the energy comes mainly from thermal sources, the reduction in greenhouse gas emissions will be quantified using the emission factors of the national interconnected system.

Keywords: Voltage, current, rational usage of energy.

Glosario

Ahorro energético: hacer uso racional (adecuado) de cualquier electrodoméstico.

Auditoría energética: inspección y análisis de los flujos de energía ya sea residencial, industrial, comercial, con el objetivo de analizar y entender la eficiencia energética.

Analizador de redes: el analizador de redes eléctricas es un instrumento de mesa que mide la potencia efectiva, la potencia aparente, el factor de potencia, el consumo energético, la corriente y la tensión alterna, la corriente y la tensión continua, la resistencia y la frecuencia.

Huella de carbono: indicador ambiental que pretende reflejar «la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo.

Transformador de corriente TC: Los transformadores de corriente (TC o CT por sus siglas en inglés) son transformadores utilizados para aumentar o disminuir una corriente alterna (AC). Produce una corriente en el devanado secundario proporcional a la corriente del primario.

Introducción

Las redes eléctricas primarias son en un 80% aéreas, con una extensión de 178 metros que atraviesan zonas arborizadas, lo que aumenta la vulnerabilidad del sistema ante eventos climáticos y fallas por contacto con vegetación. De hecho, el personal de mantenimiento reporta interrupciones frecuentes del servicio causadas por estos factores.

El Bloque 4 de la Institución Universitaria Pascual Bravo alberga varios laboratorios y talleres donde se encuentran equipos eléctricos y electrónicos de alto consumo energético. En los últimos meses se han evidenciado irregularidades en el sistema eléctrico de este bloque que se manifiestan en fluctuaciones de voltaje, armónicos, interrupciones del servicio y baja regulación de voltaje. Estas irregularidades han provocado un funcionamiento ineficiente y en algunos casos inadecuado de los equipos instalados, generando sobrecalentamientos, daños y vida útil reducida.

Estudios previos de caracterización de carga eléctrica del Bloque 4 han evidenciado que existen problemas en el dimensionamiento de los circuitos, con capacidades instaladas insuficientes para la demanda actual, lo que se traduce en caídas de tensión y pérdidas de energía. Adicionalmente, la instalación eléctrica tiene más de 20 años y el deterioro en el aislamiento de cables y conexiones ocasiona fugas de corriente que incrementan las pérdidas. Si bien la Universidad ha realizado campañas para promover el uso eficiente de la energía, los problemas en la instalación eléctrica limitan los resultados de estas iniciativas.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

La Institución Universitaria Pascual Bravo ha experimentado en los últimos años un crecimiento en su infraestructura física y población académica, lo cual se ha traducido en un aumento sostenido de la demanda de energía eléctrica. Los análisis de los consumos históricos muestran incrementos anuales del orden del 5%, superando actualmente un promedio mensual de 77.000 kWh. Esta situación ha generado problemas en el sistema eléctrico actual, el cual fue dimensionado para una demanda menor y presenta limitaciones para satisfacer los requerimientos energéticos presentes y futuros. El sistema cuenta con 1.540 kVA de capacidad instalada, compuesto principalmente por 5 subestaciones, una de ellas de 800 kVA que suple cerca del 52% del consumo total.

Las redes eléctricas primarias son en un 80% aéreas, con una extensión de 178 metros que atraviesan zonas arborizadas, lo que aumenta la vulnerabilidad del sistema ante eventos climáticos y fallas por contacto con vegetación. De hecho, el personal de mantenimiento reporta interrupciones frecuentes del servicio causadas por estos factores. Por otro lado, el análisis de las redes secundarias evidenció distancias excesivas entre la subestación principal y los puntos de consumo, con caídas de tensión superiores al 5% permitido. Esto se debe a una inadecuada ubicación de la subestación actual que no se encuentra en el centro de carga. Adicionalmente, se identificó desbalances entre las capacidades de los conductores y las protecciones instaladas.

La conjugación de todos estos factores ha derivado en problemas de confiabilidad, calidad del servicio e incremento de costos por energía no suministrada y pérdidas técnicas. De continuar esta situación, se compromete la prestación del servicio público de educación superior y se genera un impacto económico y reputacional negativo para la Institución. Por lo anterior, se hace necesario realizar una renovación del sistema eléctrico, migrando a redes subterráneas que brinden mayor confiabilidad y seguridad, reubicando estratégicamente la subestación en el centro de carga, y redimensionando adecuadamente los conductores y protecciones acorde a las

demandas actuales y futuras. Esto permitirá tener un sistema eléctrico eficiente, seguro y sostenible ante el crecimiento institucional.

Debe haber referencias bibliográficas que sustenten el rigor de lo que se afirma (Fitzgerald, 2003)

1.2 Formulación

¿Cómo optimizar el consumo eléctrico y mejorar el funcionamiento de los equipos eléctricos en el Bloque 4 de la institución universitaria, a través de una auditoría energética?

2. Justificación

Desde el punto de vista técnico, los análisis previos han demostrado la existencia de múltiples deficiencias en el sistema eléctrico actual que derivan en un funcionamiento ineficiente, interrupciones del servicio e incluso daños en los equipos. Realizar un diagnóstico profundo mediante una auditoría permitirá tener un conocimiento detallado sobre los puntos débiles y oportunidades de mejora, para así plantear soluciones efectivas sustentadas en información fidedigna.

Adicionalmente, la auditoría energética es una herramienta ampliamente validada y recomendada por expertos cuando se requiere mejorar la eficiencia de las instalaciones eléctricas. Desde la perspectiva económica, los sobrecostos actuales por el desperdicio energético son significativos, estimados en decenas de millones de pesos anuales según las proyecciones realizadas. Implementar las recomendaciones resultantes de la auditoría ha demostrado en múltiples casos generar ahorros sustanciales, con periodos de recuperación de la inversión menores a 3 años.

Considerando la longevidad de las mejoras, se obtendrían beneficios económicos durante muchos años, liberando recursos que la Institución podría destinar a otras prioridades en su misión educativa.

Ambientalmente, reducir el consumo eléctrico innecesario mediante medidas de eficiencia energética significaría disminuir la huella de carbono de la Institución, al requerirse menor generación en plantas térmicas que emplean combustibles fósiles. Cada MWh no demandado gracias a la implementación de las mejoras se traduce en cientos de kilogramos menos de emisiones de gases efecto invernadero.

La auditoría proporcionará la información para establecer la línea base y estimar los ahorros potenciales. En cuanto a la calidad de la prestación del servicio educativo, una infraestructura eléctrica deficiente pone en riesgo la operación adecuada de los equipos utilizados en las prácticas de formación, investigación y extensión que realiza la Institución. Prevenir daños en los

equipos, y garantizar condiciones eléctricas óptimas para su funcionamiento mediante las recomendaciones de la auditoría, eleva la calidad de estos procesos misionales.

Respecto a la responsabilidad social, al ser una Institución de educación superior pública se debe velar por el uso eficiente de los recursos, la austeridad en el gasto y la protección del medio ambiente. Este proyecto se alinea totalmente con esos principios al buscar reducir el desperdicio de electricidad, disminuir costos operativos y mitigar impactos ambientales.

Demostraría el compromiso de la organización con la sostenibilidad. En cuanto al cumplimiento normativo, la evidencia recabada sugiere incumplimientos con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE, por lo cual la auditoría también serviría para establecer la magnitud de las desviaciones y definir las acciones requeridas para regularizar la situación desde el punto de vista legal.

Finalmente, para la Universidad este proyecto será una oportunidad de aplicar y afianzar conocimientos, dado que los profesionales que lo ejecutarán son estudiantes de los programas de Ingeniería Eléctrica y afines. La experiencia contribuirá a su formación integral, complementando la teoría recibida con práctica en un caso real bajo la supervisión de docentes expertos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar una auditoría energética en el Bloque 4 para evaluar su eficiencia y proponer medidas que optimicen el consumo eléctrico.

3.2 Objetivos específicos

Diagnosticar el consumo eléctrico actual del Bloque 4 mediante el análisis de los registros históricos de consumo, mediciones in situ y caracterización de los equipos existentes. Detectando las áreas críticas de consumo ineficiente de energía en el Bloque 4 a través de inspecciones, análisis de indicadores energéticos y comparaciones con estándares.

Proponer medidas técnicas, operativas y tecnológicas específicas para optimizar el uso de la energía eléctrica en las áreas identificadas con problemas de eficiencia energética, estimando el potencial de ahorro energético en kWh/año y en términos económicos que se puede lograr con la implementación de las medidas de eficiencia energética propuestas.

Evaluar el impacto ambiental positivo de la optimización energética propuesta en el Bloque 4, estimando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, elaborando un plan de acción para la implementación de las medidas recomendadas, definiendo responsables, cronogramas e inversiones requeridas.

Proponer indicadores de seguimiento que permitan evaluar los resultados de la implementación de las medidas de optimización energética.

4. Referentes teóricos

4.1 Eficiencia energética

La eficiencia energética juega un papel clave en la optimización de los consumos eléctricos y la sostenibilidad, por lo cual es fundamental profundizar en sus conceptos, herramientas e impactos. La eficiencia energética puede definirse como la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de transformación de la misma.

En ese sentido, la Agencia Internacional de Energía (IEA) plantea que “consiste en utilizar menos energía para proveer la misma cantidad de servicios energéticos” (IEA, 2021). Capehart (2022) complementa diciendo que representa una manera efectiva de cumplir necesidades energéticas evitando pérdidas innecesarias y sin sacrificar calidad de vida, niveles de producción o comodidades. Implica obtener los mismos resultados o beneficios consumiendo menos energía a través de medios tecnológicos, operativos o conductuales.

García (2011) indica que la eficiencia energética tiene múltiples beneficios entre los que destacan “reducción del consumo energético, reducción de costos por consumo de energía, reducción de emisiones contaminantes y mitigación del cambio climático”. Por ello, “debe ser la primera opción a considerar para atender las necesidades energéticas”.

En el contexto organizacional, la eficiencia energética involucra la optimización de los procesos que demandan energía, la utilización de tecnologías eficientes, el monitoreo de los consumos y el cambio de comportamientos de los usuarios; todo orientado a reducir los requerimientos energéticos para un mismo propósito.

Una de las herramientas fundamentales para promover la eficiencia energética son las auditorías energéticas. Una auditoría energética es un proceso sistemático de recolección y análisis de datos e información con el fin de comprender el consumo energético de una instalación u organización y detectar oportunidades de ahorro. Según Thumann (2022), “ayuda a determinar cómo se usa la energía en un edificio, un proceso o un sistema, y a identificar

posibilidades de ahorro sin sacrificar comodidad, producción o calidad”. La IEA (2021) señala que este tipo de auditorías “evalúan las necesidades energéticas para calefacción, refrigeración, iluminación e instalaciones productivas. Identifican las áreas de potencial ahorro, cuantifican los beneficios de implementar cada medida y dan prioridad a aquellas que proporcionen el mayor retorno de la inversión”.

4.2 Auditoría energética

Dentro de los objetivos de una auditoría energética se encuentran (Thumann, 2022): determinar los tipos de energía usados en la instalación y los costos asociados; descubrir dónde se usa y se desperdicia la energía en el proceso de producción o en los equipos auxiliares; identificar, cuantificar y valorar económicamente las oportunidades de ahorro; realizar un ranking de medidas de eficiencia según su retorno de la inversión y elaborar un plan de implementación de las recomendaciones.

Es una herramienta fundamental para elaborar programas de gestión de la energía y obtener la certificación en sistemas como ISO 50001. Permite establecer una línea base y fijar metas. También es requerida para acogerse a beneficios tributarios o acceder a financiación.

A partir de los resultados de las auditorías energéticas, se pueden adoptar diversas tecnologías para la optimización del consumo eléctrico en instalaciones comerciales o institucionales. Existe una amplia variedad de alternativas que pueden contribuir a este propósito. Algunas de las principales son (IDAE, 2011; Kaabe, 2021): sistemas de iluminación eficiente con lámparas LED, sensores de presencia y regulación basada en luminosidad; variadores de velocidad y arrancadores suaves en motores eléctricos; equipos de ofimática y cómputo de bajo consumo con certificación Energy Star; electrodomésticos y equipos de frío y A/C energéticamente eficientes; paneles fotovoltaicos para generación en sitio; sistemas de gestión de cargas para programar consumos; rebobinado de motores con alambre de mayor sección; aislamiento térmico de cubiertas y cerramientos; recuperadores de calor y enfriadores adiabáticos; transformadores de alta eficiencia y capacitores para la corrección del factor de potencia.

La selección de las medidas más convenientes depende del uso final de la electricidad, los equipos existentes y su antigüedad, el plan de mantenimiento, los recursos disponibles para inversión y otros factores de cada instalación.

4.3 Uso eficiente de la energía

En síntesis, numerosos estudios coinciden en que el uso eficiente de la energía es una de las mejores estrategias para la reducción de emisiones contaminantes y la mitigación del cambio climático, dado que la mayor parte de la energía eléctrica mundial es generada a partir de combustibles fósiles. La IEA (2021) afirma que “mejoras relativamente modestas en la eficiencia energética de los electrodomésticos, la industria y los edificios, podrían reducir la demanda mundial de energía en más de un 8% en 2030, lo que equivale a la producción actual de petróleo y gas de Estados Unidos”.

Por su parte, el IPCC indica que la eficiencia energética puede contribuir a la mitad de las reducciones de emisiones necesarias para limitar el calentamiento global a menos de 2°C (IPCC, 2014). Kaabe (2021) reporta que cada MWh eléctrico ahorrado gracias a medidas de eficiencia permite dejar de emitir entre 0,5 y 1 tonelada de CO₂.

Las auditorías energéticas son esenciales no solo para identificar las oportunidades de ahorro, sino también para cuantificar los beneficios ambientales de cada iniciativa mediante el cálculo de la reducción de emisiones a partir de los factores de emisión del sistema interconectado nacional. En conclusión, la evidencia muestra que el uso eficiente de la energía eléctrica, promovido por auditorías energéticas rigurosas, tiene un alto potencial para la mitigación del cambio climático al evitar de manera rentable importantes cantidades de emisiones contaminantes.

4.4 Dispositivos de adquisición de datos

Los instrumentos fundamentales serán analizadores de redes inteligentes (IoT) que registrarán de forma automática variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia activa y reactiva, factor de potencia, armónicos y energía consumida (kWh).

Se deben instalar analizadores fijos en los tableros principales y móviles en los secundarios. Para complementar, se utilizarán multímetros, pinzas amperimétricas, luxómetros, cámaras termográficas, medidores de aislamiento y equipos para pruebas a motores y transformadores.

Las principales fuentes de información serán las mediciones eléctricas realizadas a la muestra de equipos y sistemas seleccionados. Esta data primaria permitirá caracterizar el consumo energético y calcular los indicadores requeridos. Como fuentes secundarias se emplearán los registros históricos de consumo eléctrico, reportes de mantenimiento, planos eléctricos y bases de datos técnicas de los equipos.



Figura 1. Gateway de comunicación.
Fuente. Diseño propio.

La figura 1 presenta un Gateway y comunicaciones. Gateway es de enlace Wifi Modbus Mqtt, el cual es un dispositivo electrónico que permite realizar enlaces entre autómatas programables, medidores de energía y equipamiento de campo, con servidores tipo bróker MQTT, mediante los protocolos de comunicaciones Modbus RTU y MQTT.

El gateway de enlace wifi Modbus Mqtt, es un dispositivo microelectrónico orientado a la implementación de múltiples aplicaciones de comunicaciones para dispositivos de medición y control en el ámbito del internet de las cosas IoT.

En la figura 2 se puede observar la conexión de un autómata programable al Gateway VMQ, el cual tiene las siguientes conexiones: Power Gnd = Conexión al negativo de la fuente de

alimentación externa, la cual puede ser la misma que alimenta al autómata programable. Power +Vd = Conexión al terminal positivo de la fuente de alimentación.

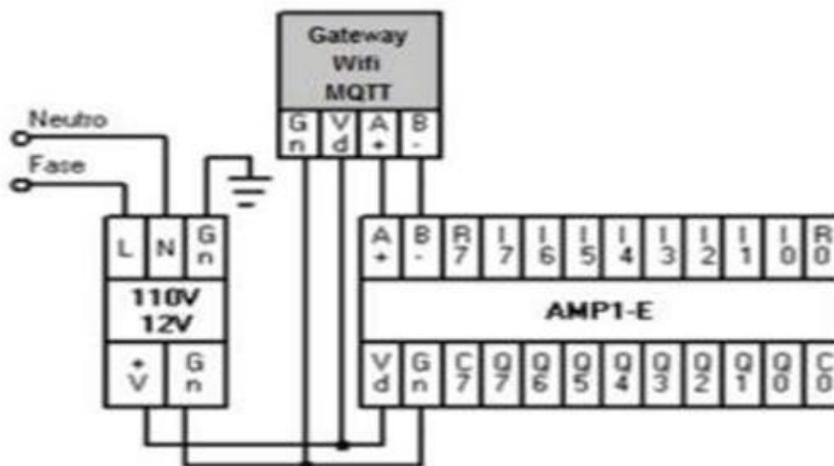


Figura 2. Diagrama de interconexión del gateway.
Fuente. Diseño propio.

4.5 Norma ISO5002 de auditoría energética

La norma ISO 50001 brinda a las organizaciones un marco reconocido para desarrollar un sistema de administración de energía efectivo. Al igual que otros estándares del sistema de gestión ISO, sigue el proceso de "Planificar-Hacer- Verificar-Actuar" para la mejora continua

La norma ISO 50001 proporciona un conjunto de requisitos que permiten a las organizaciones desarrollar una política para un uso más eficiente de la energía, fijar objetivos y metas para cumplir con esa política, recopilar datos para comprender mejor y tomar decisiones relacionadas con el uso de la energía, medir los resultados obtenidos, revisar la efectividad de la política, y mejorar continuamente la gestión energética.

Las auditorías energéticas se planifican y llevan a cabo como parte de la identificación y priorización de oportunidades para mejorar el desempeño energético. Una auditoría de energía puede respaldar una revisión de energía como se describe en ISO 50001 o se puede utilizar de forma independiente.

En las etapas de la norma ISO50002 está la planificación de la auditoría energética. Las actividades de planificación de la auditoría energética son esenciales para definir el alcance de los trabajos y para recopilar información preliminar de la organización.

Para llevar a cabo la auditoría se debe definir: el objetivo de la auditoría; límite, objetivos, necesidades y expectativas; nivel de detalle requerido, período de tiempo para completar la auditoría de energía; criterios para evaluar oportunidades para mejorar el rendimiento energético; 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; persona responsable del proceso de auditoría energética dentro de la organización

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

El análisis se realizará aplicando estadística descriptiva para calcular promedios, desviación estándar, variabilidad, análisis de frecuencias, correlaciones. Los resultados se presentarán a través de tablas, gráficos y parámetros estadísticos, contrastando los valores medidos con estándares y benchmarks como base para las recomendaciones. De esta manera, el uso de un enfoque cuantitativo soportado en mediciones eléctricas y análisis estadístico riguroso permitirá minimizar la incertidumbre y sustentar técnicamente las propuestas de optimización energética para el Bloque 4 constituyendo un proyecto de investigación aplicada.

5.2 Método

En primera instancia, se recopilará y analizará toda la documentación técnica disponible sobre las instalaciones eléctricas del Bloque 4, incluyendo planos eléctricos, diagramas unifilares, especificaciones de equipos, formatos de mantenimiento preventivo y correctivo. Esto permitirá tener un conocimiento detallado sobre las características y configuración real del sistema eléctrico.

Asimismo, se solicitarán los registros históricos de consumo eléctrico mensual del Bloque 4 para los últimos 2-3 años. Con esta data se construirán gráficas de la evolución del consumo, se calcularán indicadores como consumo por metro cuadrado y se identificarán meses críticos de alta demanda.

También se analizarán los reportes de mantenimiento preventivo y correctivo de los últimos años para detectar equipos o áreas problemáticas.

De estar disponible, se recopilará información de caracterizaciones de carga eléctrica previas que contengan mediciones de las demandas máximas, curvas de carga diarias, análisis de calidad de potencia, entre otros estudios técnicos realizados. Esta información secundaria permitirá tener

un primer acercamiento a los patrones de consumo eléctrico y posibles deficiencias del sistema. Posteriormente, se realizarán visitas detalladas a las instalaciones eléctricas y equipos del Bloque 4. de la institución universitaria Pascual Bravo

Mediante inspección visual se identificarán problemas evidentes como cables en mal estado, conexiones inadecuadas, circuitos sobrecargados, luxómetros quemados, motores con vibraciones excesivas. Se prestará especial atención a transformadores, tableros de distribución, cuartos de motores y el alumbrado interior y exterior.

Durante los recorridos también se georreferenciarán todos los equipos y se elaborarán planos As-Built en caso de existir modificaciones respecto a los planos eléctricos originales.

Las visitas serán guiadas por personal de mantenimiento eléctrico de la Institución que podrá aportar información relevante de primera mano. Se les aplicarán entrevistas semi-estructuradas para conocer su percepción sobre los problemas existentes y las posibles causas.

Posteriormente, se realizarán mediciones eléctricas preliminares en puntos representativos utilizando analizadores de redes. Se medirán al menos las tres fases de los tableros principales y la acometida, registrando parámetros como voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y armónicos.

Los resultados permitirán tener un primer diagnóstico de la calidad de la energía suministrada. Con toda la información recopilada y el trabajo de campo realizado se integrará un diagnóstico preliminar, identificando los equipos y áreas críticas en las que se concentrarán los esfuerzos de la auditoría.

Se espera detectar problemas como bajo factor de potencia, desequilibrios entre fases, caídas de tensión, presencia de armónicos, baja eficiencia en motores y transformadores, iluminación ineficiente, entre otros; que serán analizados a profundidad en la siguiente etapa mediante una auditoría detallada.

Para la etapa de auditoría detallada se realizarán mediciones eléctricas exhaustivas en los equipos y áreas identificadas como críticas en la fase de diagnóstico preliminar, con el fin de cuantificar variables como la demanda de potencia, el consumo de energía, los indicadores de eficiencia y la calidad de la energía suministrada.

Se instalarán analizadores de redes en los tableros principales y secundarios para registrar la demanda máxima diaria y obtener la curva de carga horaria durante una semana representativa. Con esto se determinarán los horarios y días de mayor consumo.

Asimismo, se medirá la energía consumida (kWh) por cada tablero mediante la integración de las curvas de carga para conocer la contribución de cada circuito al consumo total.

Para evaluar la calidad de potencia se medirán parámetros como contenido armónico, severidad de armónicos individuales y total (THD), fluctuaciones de tensión, desequilibrios, factor de potencia y otros durante al menos 72 horas continuas. Se utilizarán analizadores de calidad de energía según la norma IEC 61000-4-30.

Los resultados determinarán si existen problemas en la onda de voltaje que estén afectando el desempeño de equipos sensibles. Mediante termografía infrarroja se inspeccionarán las conexiones eléctricas, identificando puntos calientes por alta impedancia de contacto que generan pérdidas técnicas.

Las imágenes térmicas mostrarán la distribución de temperatura, permitiendo diagnosticar problemas en aislamientos, empalmes inadecuados y conductores sobrecargados.

A los motores eléctricos se les realizarán pruebas de eficiencia siguiendo los protocolos del código IEEE 112 para determinar las pérdidas en el hierro y cobre, el deslizamiento, el rendimiento y los kilovatios consumidos en vacío y bajo carga.

En transformadores se medirá la corriente y potencia de excitación, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas joule en devanados y se calculará el rendimiento. Mediante luxómetros se auditarán

niveles de iluminancia en distintas áreas comparándolos con los valores recomendados en la norma ISO 8995 para determinar sistemas de alumbrado sobredimensionados o ineficientes.

5.3 Instrumentos de recolección de información.

5.3.1. Fuentes primarias. Son las fuentes documentales de primera mano que han sido utilizadas y que corresponden a material que contienen información original. En este caso se ha recurrido a entrevistas, consulta de manuales técnicos y libros.

5.3.2. Fuentes secundarias. Se refiere al material de consulta, para este caso han sido revistas, artículos, diccionarios que abordan investigaciones cuantitativas, enfocadas en la recolección y análisis estadístico de datos eléctricos e indicadores energéticos.

6. Resultados

El Bloque 4 de la Institución Universitaria Pascual Bravo alberga varios laboratorios y talleres donde se encuentran equipos eléctricos y electrónicos de alto consumo energético. En los últimos meses se han evidenciado irregularidades en el sistema eléctrico de este bloque que se manifiestan en fluctuaciones de voltaje, armónicos, interrupciones del servicio y baja regulación de voltaje.

Estas irregularidades han provocado un funcionamiento ineficiente y en algunos casos inadecuado de los equipos instalados, generando sobrecalentamientos, daños y vida útil reducida. De acuerdo con estadísticas de la Universidad, en el último año el Bloque 4 ha presentado un aumento del 8% en el consumo de energía eléctrica, muy por encima del incremento promedio de los otros bloques que es del 3%.

Analizando los reportes de mantenimiento de equipos, se identifica que cerca del 12% de las solicitudes corresponden a daños o sobrecalentamientos relacionados con deficiencias en el suministro eléctrico.

Estudios previos de caracterización de carga eléctrica del Bloque 4 han evidenciado que existen problemas en el dimensionamiento de los circuitos, con capacidades instaladas insuficientes para la demanda actual, lo que se traduce en caídas de tensión y pérdidas de energía. Adicionalmente, la instalación eléctrica tiene más de 20 años y el deterioro en el aislamiento de cables y conexiones ocasiona fugas de corriente que incrementan las pérdidas. Si bien la Universidad ha realizado campañas para promover el uso eficiente de la energía, los problemas en la instalación eléctrica limitan los resultados de estas iniciativas.

Los equipos no pueden operar en condiciones óptimas de eficiencia energética si el suministro eléctrico es deficiente. Por ejemplo, los variadores de velocidad en motores eléctricos no logran los ahorros esperados. De continuar esta situación, se estima que los costos por consumo de energía eléctrica en el Bloque 4 podrían incrementarse en más del 10% anual, impactando significativamente el presupuesto de la Universidad. Considerando una tarifa promedio de \$480

COP/kWh, el desperdicio de energía representa pérdidas económicas por decenas de millones de pesos cada año.

Ambientalmente, el consumo excesivo de electricidad implica mayores emisiones de gases efecto invernadero por la generación en plantas térmicas que utilizan combustibles fósiles. Según factores de emisión del sistema interconectado nacional, cada MWh adicional desperdiciado podría estar generando alrededor de 380 kg de CO₂.

La situación descrita pone de manifiesto la necesidad de realizar una auditoría energética detallada del Bloque 4, con el fin de diagnosticar a profundidad las deficiencias del sistema eléctrico, cuantificar las pérdidas energéticas y sus causas, e identificar oportunidades de mejora en la eficiencia de equipos. Esto permitirá establecer un plan de acción técnico-económico para optimizar el consumo de electricidad, disminuyendo costos operativos y minimizando el impacto ambiental de las actividades desarrolladas en este bloque.

Diversos autores resaltan la utilidad de las auditorías energéticas para mejorar la eficiencia en instalaciones eléctricas. Según Gómez (2010), la implementación de las recomendaciones de estas auditorías permite conseguir ahorros promedio entre el 10% y el 20% del consumo eléctrico en edificaciones de uso universitario. Así mismo, Rodríguez & Casas (2018) demostraron en un estudio de caso que la inversión realizada en optimización de sistemas eléctricos tras una auditoría se recupera en menos de 3 años con los ahorros obtenidos.

Con relación a lo antes dicho, la problemática identificada en el Bloque 4 relacionada con el elevado e ineficiente consumo de electricidad, requiere con urgencia el desarrollo de una auditoría energética que sentará las bases para la implementación de mejoras técnicas y operativas necesarias para optimizar el uso de la energía eléctrica en esta importante instalación académica.

Los beneficios esperados incluyen la reducción de costos, la disminución del impacto ambiental de las actividades realizadas y una mejora sustancial en el funcionamiento de los equipos al normalizar las condiciones del suministro eléctrico

Se hace relación de todos los aparatos eléctricos que se encuentran en el bloque 4 con todas sus características eléctricas como voltaje potencia y consumos los cuales se relacionan en la tabla de la figura 3.

| Ítem | Fecha Hora | Nombre | Voltaje 1 | Corriente | Cantidad | Potencia en w | Horas Uso/Día | Consumo / semana | Consumo kwh/semanal |
|------|------------------|-----------------------------------|-----------|-------------|----------|---------------|---------------|------------------|---------------------|
| 1 | 23/10/2023 18:53 | Lámparas fluorescentes | 110,3 | 0,362647325 | 35 | 40 | 12 | 72 | 2,88 |
| 2 | 23/10/2023 18:53 | Computadores | 110,2 | 0,725952813 | 15 | 80 | 12 | 72 | 5,76 |
| 3 | 23/10/2023 18:53 | Cargadores de celular | 110,2 | 0,045372051 | 4 | 5 | 10 | 60 | 0,3 |
| 4 | 23/10/2023 | Dispensador de agua fría/caliente | 110,327 | 3,806865047 | 1 | 420 | 24 | 144 | 60,48 |
| 5 | 1/11/2023 | Nevera | 106,6 | 1,031894934 | 1 | 110 | 24 | 144 | 15,84 |
| 6 | 1/11/2023 15:14 | Cargador de baterías | 106,6 | 1,125703565 | 2 | 120 | 4 | 24 | 2,88 |
| 7 | 1/11/2023 15:15 | Cafetera | 107,2 | 2,332089552 | 1 | 250 | 12 | 72 | 18 |
| 8 | 1/11/2023 15:16 | Ventiladores | 107,2 | 0,746268657 | 3 | 80 | 10 | 60 | 4,8 |
| 9 | 1/11/2023 15:17 | Luzometro | 107,1 | 0,466853408 | 1 | 50 | 2 | 12 | 0,6 |
| 10 | 1/11/2023 15:18 | Balanceador | 106,9 | 3,274087933 | 1 | 350 | 2 | 12 | 4,2 |
| 11 | 1/11/2023 15:19 | Alineador | 106,9 | 3,274087933 | 1 | 350 | 2 | 12 | 4,2 |
| 12 | 1/11/2023 15:20 | Elevador | 107,1 | 11,20448179 | 1 | 1200 | 2 | 12 | 14,4 |
| 13 | 1/11/2023 15:21 | Esmeril | 107 | 2,336448598 | 1 | 250 | 2 | 12 | 3 |
| 14 | 1/11/2023 15:22 | Analizador de gases | 107 | 0,560747664 | 1 | 60 | 2 | 12 | 0,72 |
| 15 | 21/11/2023 23:35 | Transformador | 111,5 | 1,076233184 | 1 | 120 | 10 | 60 | 7,2 |
| 16 | 5/12/2023 20:14 | Computador de dinamometro | 111,8 | 0,715563506 | 1 | 80 | 2 | 12 | 0,96 |
| 17 | 20/12/2023 0:04 | Dinamometro | 112,6 | 2,220248668 | 1 | 250 | 2 | 12 | 3 |
| 18 | 20/12/2023 0:21 | Compresor | 112,5 | 5,777777778 | 1 | 650 | 2 | 12 | 7,8 |
| 19 | 14/02/2024 16:31 | Extractor de gases | 107 | 2,803738318 | 2 | 300 | 2 | 12 | 3,6 |
| 20 | 16/02/2024 10:46 | Aire acondicionado | 106 | 7,547169811 | 1 | 800 | 10 | 60 | 48 |
| 21 | 16/02/2024 15:41 | Televisor | 105,9 | 1,416430595 | 1 | 150 | 5 | 30 | 4,5 |

Figura 3. Tabla de aforo de cargas.

Fuente. Diseño propio.

para el análisis de la auditoría se instaló medidor multifuncional en el bloque 4 para tomar los datos de consumo, los datos se fueron recopilando en una tabla la cual se guarda con todos los datos, para el análisis se tomaron los datos de una semana continuas y fueron tomados cada 10 segundos. en total se tomaron 962 datos para hacer el análisis de la figura 4.

| Timestamp | volt_A | volt_B | volt_C | I_A | I_B | I_C | P_A | P_B | P_C | P_T | Q_A | Q_B | Q_C | Q_T | FP_A | FP_B | FP_C | FP_T | Frec |
|------------------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 22/04/2024 17:01 | 126,095 | 122,951 | 123,864 | 1,121 | 1,488 | 0,216 | 0,109 | 0,173 | 0,012 | 0,294 | 0,088 | 0,009 | 0,022 | 0,056 | 0,779 | 0,999 | 0,488 | 0,983 | 59,971 |
| 22/04/2024 17:03 | 125,933 | 122,833 | 124,166 | 0,856 | 1,481 | 0,216 | 0,073 | 0,171 | 0,012 | 0,258 | 0,079 | 0,009 | 0,022 | 0,047 | 0,711 | 0,999 | 0,487 | 0,985 | 59,959 |
| 22/04/2024 17:13 | 126,212 | 122,814 | 124,663 | 0,696 | 1,444 | 0,216 | 0,078 | 0,168 | 0,012 | 0,259 | 0,036 | 0,009 | 0,022 | 0,004 | 0,907 | 0,999 | 0,483 | 1 | 59,986 |
| 22/04/2024 17:23 | 125,909 | 122,714 | 125,042 | 0,402 | 1,327 | 0,216 | 0,042 | 0,153 | 0,012 | 0,208 | 0,024 | 0,012 | 0,022 | 0,011 | 0,868 | 0,997 | 0,484 | 1 | 59,945 |
| 22/04/2024 17:33 | 126,447 | 123,281 | 125,045 | 0,666 | 1,329 | 0,215 | 0,075 | 0,154 | 0,012 | 0,242 | 0,034 | 0,012 | 0,022 | 0,001 | 0,913 | 0,997 | 0,482 | 1 | 60,033 |
| 22/04/2024 17:43 | 126,279 | 123,057 | 125,226 | 0,396 | 1,329 | 0,216 | 0,042 | 0,154 | 0,012 | 0,209 | 0,023 | 0,012 | 0,022 | 0,012 | 0,878 | 0,997 | 0,482 | 0,999 | 59,943 |
| 22/04/2024 17:53 | 126,776 | 123,297 | 125,321 | 0,661 | 1,323 | 0,215 | 0,076 | 0,153 | 0,012 | 0,242 | 0,032 | 0,012 | 0,022 | 0,002 | 0,92 | 0,997 | 0,483 | 1 | 59,988 |

Figura 4. Tabla de lecturas de voltajes y corrientes.

Fuente. Diseño propio.

Se toman los voltajes por fase y se hacen los respectivos análisis de datos y sus gráficas. Tales variables son el Voltaje A, Voltaje B, Voltaje C, Corriente A, Corriente B, Corriente C, Consumo A, Consumo B, Consumo C, Potencia Total, Consumo Total. Como muestra la figura 5

| Voltaje A | | Media | 127,037234 |
|------------|---------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 2,57 |
| Maximo | 130,483 | Desviacion | 1,60459177 |
| Minimo | 123,295 | | |
| Rango | 7,188 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,65 | | |

Figura 5. Primer análisis de la lectura de voltajes.

Fuente. Diseño propio.

Los instrumentos fundamentales serán analizadores de redes inteligentes (IoT) que registrarán de forma automática variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia activa y reactiva, factor de potencia, armónicos y energía consumida (kWh). Se instalarán analizadores fijos en los tableros principales y móviles en los secundarios.

| Voltaje A | x_i | f_i | F_i | $x_i f_i$ | $x_i - \bar{x}$ | $(x_i - \bar{x})^2$ | $f_i (x_i - \bar{x})^2$ |
|-----------------|--------|------------|-------|------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 123,3 - 123,95 | 123,62 | 14 | 14 | 1730,70 | -3,42 | 11,67 | 163,32 |
| 123,95 - 124,6 | 124,28 | 27 | 41 | 3355,43 | -2,76 | 7,63 | 205,98 |
| 124,6 - 125,26 | 124,93 | 83 | 124 | 10369,08 | -2,11 | 4,45 | 369,03 |
| 125,26 - 125,91 | 125,58 | 145 | 269 | 18209,40 | -1,46 | 2,12 | 307,03 |
| 125,91 - 126,56 | 126,24 | 129 | 398 | 16284,39 | -0,80 | 0,64 | 82,91 |
| 126,56 - 127,22 | 126,89 | 173 | 571 | 21951,80 | -0,15 | 0,02 | 3,80 |
| 127,22 - 127,87 | 127,54 | 98 | 669 | 12499,16 | 0,51 | 0,26 | 25,01 |
| 127,87 - 128,52 | 128,20 | 79 | 748 | 10127,48 | 1,16 | 1,34 | 106,06 |
| 128,52 - 129,18 | 128,85 | 87 | 835 | 11209,89 | 1,81 | 3,28 | 285,69 |
| 129,18 - 129,83 | 129,50 | 83 | 918 | 10748,73 | 2,47 | 6,08 | 504,57 |
| 129,83 - 130,48 | 130,16 | 43 | 961 | 5596,72 | 3,12 | 9,73 | 418,32 |
| Total | | 961 | | 122082,78 | | | 2471,73 |

Figura 6. Analítica de datos de las variables medidas.

Fuente. Diseño propio.

Para complementar, se utilizarán multímetros, pinzas amperimétricas, luxómetros, cámaras termográficas, medidores de aislamiento y equipos para pruebas a motores y transformadores. Las principales fuentes de información serán las mediciones eléctricas realizadas a la muestra de equipos y sistemas seleccionados para recoger datos que luego se analizarán como muestra la figura 7.

En el momento en que el dispositivo de la figura 8 se conecta a través de una red de área local, a un servidor, el LED se queda encendido en forma permanente. El Gateway se conecta a una red de área local, tan pronto como tenga configurado el nombre de la red y la clave de acceso, lo cual se hace con Mgd Mod.exe. (Herramientas/Configurar Gateway)

Para conectar el gateway de enlace wifi Modbus Tcp al PC, se debe utilizar un conversor de RS485 a USB con referencia CH340. Esto con el fin de configurar el dispositivo desde el programa Mgdmod.exe. En las ayudas del programa Mgd Mod se explica la forma de configuración del Gateway seleccionando la opción “Configurar Gateway” del menú de Herramientas.

Luego de ser configurado, el gateway de enlace wifi Modbus Tcp, permitirá la lectura y escritura de las variables de los dispositivos de campo, mediante Modbus RTU y enviará los datos recolectados hacia el servidor remoto, utilizando el protocolo Modbus TCP. Las conexiones del gateway de enlace wifi Modbus Tcp a los dispositivos del bus de campo. Se puede utilizar la misma fuente de alimentación de los autómatas programables para alimentar el Gateway. Los terminales RT+ se unen entre sí de la misma manera que los terminales RT-. La configuración del gateway de enlace wifi Modbus Tcp se realiza desde el programa Mgdmod.exe, el cual se abre desde la barra de inicio de Windows, luego de haberlo descargado desde www.tecvolucion.net e instalado en PC.

El medidor multifuncional trifásico Modbus RS485 es un dispositivo de medición de energía eléctrica diseñado para monitorear y gestionar el consumo de energía en sistemas eléctricos trifásicos. Este tipo de medidor es comúnmente utilizado en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales donde se requiere un monitoreo preciso y una gestión eficiente de la energía eléctrica.

Aquí hay algunas características clave de un medidor multifuncional trifásico Modbus RS485 como la medición Trifásica: El medidor puede medir y monitorear la energía eléctrica en tres fases, lo que permite una comprensión completa del consumo de energía en sistemas trifásicos.

Funcionalidad Multifuncional: Además de medir la energía eléctrica consumida, estos medidores pueden realizar otras mediciones importantes, como la corriente, el voltaje, la potencia activa, la potencia reactiva, la potencia aparente, el factor de potencia, entre otros parámetros eléctricos.

Comunicación Modbus RS485: La interfaz de comunicación Modbus RS485 permite la conexión del medidor a sistemas de control, dispositivos de supervisión y otros equipos compatibles. Esta interfaz facilita la integración del medidor en sistemas de gestión de energía más amplios. **Protocolo Estándar:** El protocolo Modbus RS485 es un estándar de comunicación ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, lo que garantiza la compatibilidad y la interoperabilidad con una amplia gama de dispositivos y sistemas.

Pantalla y/o Visualización Remota: Algunos modelos de medidores multifuncionales pueden tener una pantalla incorporada para mostrar los datos de medición localmente. Además, la comunicación Modbus RS485 permite la visualización remota de los datos en sistemas de supervisión y control. **Precisión y Fiabilidad:** Estos medidores suelen ofrecer una alta precisión en la medición de energía eléctrica, lo que garantiza la fiabilidad de los datos recopilados para la gestión de la energía, como el de la figura 9.



Figura 9. Medidores multifuncionales.
Fuente. Diseño propio.

En resumen, el medidor multifuncional trifásico Modbus RS485 es un dispositivo esencial para la monitorización y gestión eficiente de la energía eléctrica en sistemas trifásicos, ofreciendo mediciones precisas y una integración sencilla con sistemas de control y supervisión a través del protocolo Modbus RS485.

El análisis se realizará aplicando estadística descriptiva para calcular promedios, desviación estándar, variabilidad, análisis de frecuencias, correlaciones. Los resultados se presentarán a través de tablas, gráficos y parámetros estadísticos, contrastando los valores medidos con estándares y benchmarks como base para las recomendaciones. De esta manera, el uso de un enfoque cuantitativo soportado en mediciones eléctricas y análisis estadístico riguroso permitirá minimizar la incertidumbre y sustentar técnicamente las propuestas de optimización energética para el Bloque 4.

Recolección y análisis estadístico de datos eléctricos e indicadores energéticos. La población objetivo estará conformada por todas las instalaciones, sistemas y equipos consumidores de energía eléctrica del Bloque 4, incluyendo iluminación, motores, equipos de cómputo, aire acondicionado, entre otros. Dado que resulta inviable efectuar mediciones detalladas al 100% de los equipos por limitaciones de tiempo y recursos, se tomará una muestra representativa utilizando un muestreo probabilístico estratificado. Aplica también para la fase B como muestra la figura 10.

| Voltaje B | | | |
|------------|---------|------------|------------|
| Datos | 961 | Media | 125,274069 |
| Maximo | 129,802 | Varianza | 4,36 |
| Minimo | 120,478 | Desviacion | 2,08777212 |
| Rango | 9,324 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,85 | | |

Figura 10. Mediciones de la fase B.

Fuente. Diseño propio.

La muestra incluirá mediciones al panel de acometida, tableros principales, al menos el 50% de los tableros secundarios, una parte de los circuitos terminales por cada tipo de carga (iluminación, tomacorrientes, equipos), y una fracción de las cargas unitarias significativas como aires acondicionados, ascensores, equipos de mayor potencia. El tamaño de muestra se estimará

aplicando la fórmula correspondiente para asegurar un nivel de confianza del 95% en los resultados. se realizará un análisis para la fase B, como lo muestra la figura 11.

| Voltaje B | x_i | f_i | F_i | $x_i f_i$ | $x_i - \bar{x}$ | $(x_i - \bar{x})^2$ | $f_i (x_i - \bar{x})^2$ |
|-----------------|--------|------------|-------|------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 120,48 - 121,33 | 120,90 | 16 | 16 | 1934,43 | -4,37 | 19,12 | 305,87 |
| 121,33 - 122,17 | 121,75 | 45 | 61 | 5478,73 | -3,52 | 12,42 | 559,03 |
| 122,17 - 123,02 | 122,60 | 75 | 136 | 9194,78 | -2,68 | 7,17 | 537,47 |
| 123,02 - 123,87 | 123,44 | 125 | 261 | 15430,59 | -1,83 | 3,35 | 418,31 |
| 123,87 - 124,72 | 124,29 | 166 | 427 | 20632,53 | -0,98 | 0,96 | 159,98 |
| 124,72 - 125,56 | 125,14 | 130 | 557 | 16268,20 | -0,13 | 0,02 | 2,34 |
| 125,56 - 126,41 | 125,99 | 106 | 663 | 13354,69 | 0,71 | 0,51 | 53,97 |
| 126,41 - 127,26 | 126,84 | 88 | 751 | 11161,50 | 1,56 | 2,44 | 214,49 |
| 127,26 - 128,11 | 127,68 | 95 | 846 | 12129,88 | 2,41 | 5,80 | 551,24 |
| 128,11 - 128,95 | 128,53 | 89 | 935 | 11439,22 | 3,26 | 10,60 | 943,81 |
| 128,95 - 129,8 | 129,38 | 26 | 961 | 3363,83 | 4,10 | 16,84 | 437,94 |
| Total | | 961 | | 120388,38 | | | 4184,44 |

Figura 11. Análisis de datos de la fase B.

Fuente. Diseño propio.

El proyecto de auditoría energética del Bloque 4 se abordará como una investigación cuantitativa, enfocada en la recolección y análisis estadístico de datos eléctricos e indicadores energéticos. La población objetivo estará conformada por todas las instalaciones, sistemas y equipos consumidores de energía eléctrica del Bloque 4, incluyendo iluminación, motores, equipos de cómputo, aire acondicionado, entre otros. Esto se logra mediante análisis de la curva de los voltajes como el que muestra la figura 12.

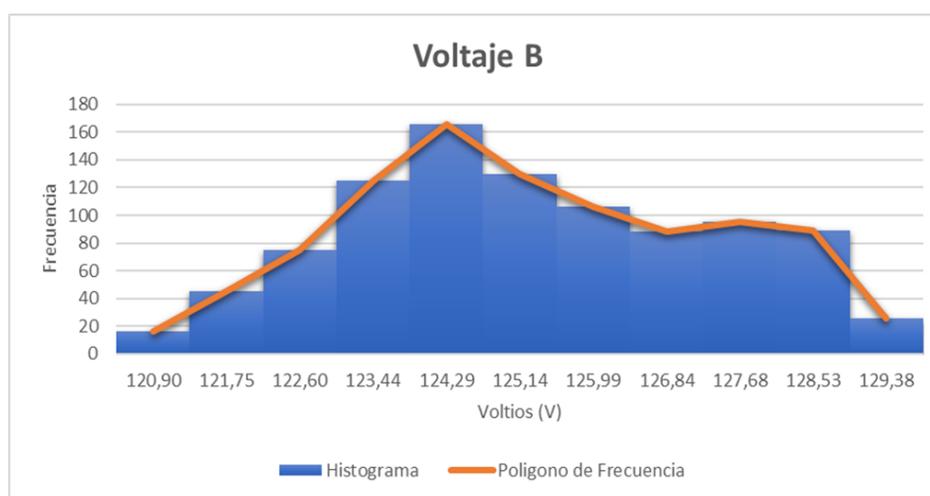


Figura 12. Curva de comportamiento del voltaje B

Fuente. Diseño propio.

En los anexos se presentan las diferentes mediciones y curvas de análisis de los demás parámetros de las mediciones.

Dado que resulta inviable efectuar mediciones detalladas al 100% de los equipos por limitaciones de tiempo y recursos, se tomará una muestra representativa utilizando un muestreo probabilístico estratificado. La muestra incluirá mediciones al panel de acometida, tableros principales, al menos el 50% de los tableros secundarios, una parte de los circuitos terminales por cada tipo de carga (iluminación, tomacorrientes, equipos), y una fracción de las cargas unitarias significativas como aires acondicionados, ascensores, equipos de mayor potencia. El tamaño de muestra se estimará aplicando la fórmula correspondiente para asegurar un nivel de confianza del 95% en los resultados.

Para evaluar la calidad de potencia se medirán parámetros como contenido armónico, severidad de armónicos individuales y total (THD), fluctuaciones de tensión, desequilibrios, factor de potencia y otros durante al menos 72 horas continuas. Se utilizarán analizadores de calidad de energía según la norma IEC 61000-4-30.

Los resultados determinarán si existen problemas en la onda de voltaje que estén afectando el desempeño de equipos sensibles. Mediante termografía infrarroja se inspeccionarán las conexiones eléctricas, identificando puntos calientes por alta impedancia de contacto que generan pérdidas técnicas. Las imágenes térmicas mostrarán la distribución de temperatura, permitiendo diagnosticar problemas en aislamientos, empalmes inadecuados y conductores sobrecargados.

Una vez realizadas las mediciones y la auditoría detallada, se procederá al análisis de los resultados obtenidos para identificar oportunidades de mejora y formular recomendaciones específicas. Inicialmente se evaluarán los indicadores energéticos calculados como consumo por metro cuadrado, consumo por equipo, factor de carga, factor de potencia, eficiencia de motores y transformadores, niveles de iluminancia, entre otros. Estos indicadores se compararán con benchmarks o referentes de eficiencia energética correspondientes a instalaciones similares, considerando las mejores prácticas y estándares como ISO 50001.

Las desviaciones respecto a los valores referentes permitirán identificar los sistemas y equipos con peor desempeño, en los cuales se deberá enfocar la optimización. Se realizará un análisis técnico-económico para cada equipo o área problemática a fin de determinar las medidas de eficiencia energética más viables desde el punto de vista de costo-beneficio. Por ejemplo, para motores de baja eficiencia se evaluará la conveniencia de reemplazarlos por motores premium de alta eficiencia IE3 o IE4, considerando el ahorro de energía proyectado y el costo de los nuevos motores.

De igual manera, en sistemas de iluminación sobredimensionados se calculará el retorno de la inversión de implementar lámparas LED, sensores de ocupación y reguladores de intensidad lumínica.

Con las medidas identificadas, se procederá a estimar su impacto energético y económico. Se calculará la reducción potencial de consumo eléctrico en kWh/año y los ahorros económicos considerando la tarifa promedio de la institución. Asimismo, dado que la energía proviene principalmente de fuentes térmicas, se cuantificará la disminución de emisiones de gases efecto invernadero utilizando los factores de emisión del sistema interconectado nacional.

Posteriormente se elaborará un plan de ejecución que incluirá para cada medida la descripción técnica, los responsables, las inversiones requeridas, los indicadores de seguimiento, y un cronograma de implementación priorizado según costo-beneficio.

La fase de seguimiento y evaluación es fundamental para verificar la efectividad de las medidas de eficiencia energética implementadas, cuantificar los ahorros y realizar ajustes para la mejora continua. Una vez ejecutado el plan de optimización energética formulado tras la auditoría, se realizará una comparación antes-después de los indicadores energéticos calculados inicialmente. Por ejemplo, se compararán los nuevos valores de consumo por metro cuadrado, consumo por equipo, rendimiento de motores, factores de potencia, etc., respecto a los obtenidos en la línea base.

Esto permitirá comprobar que los indicadores mejoren efectivamente tras la implementación de las recomendaciones. Cualquier desviación deberá analizarse para determinar sus causas y tomar acciones correctivas. Asimismo, para confirmar los ahorros energéticos estimados, se realizará una medición y verificación rigurosa del nuevo consumo eléctrico (kWh) de las áreas intervenidas. Para llegar a tales propuestas se revisa el diagrama de dispersión de la figura 13

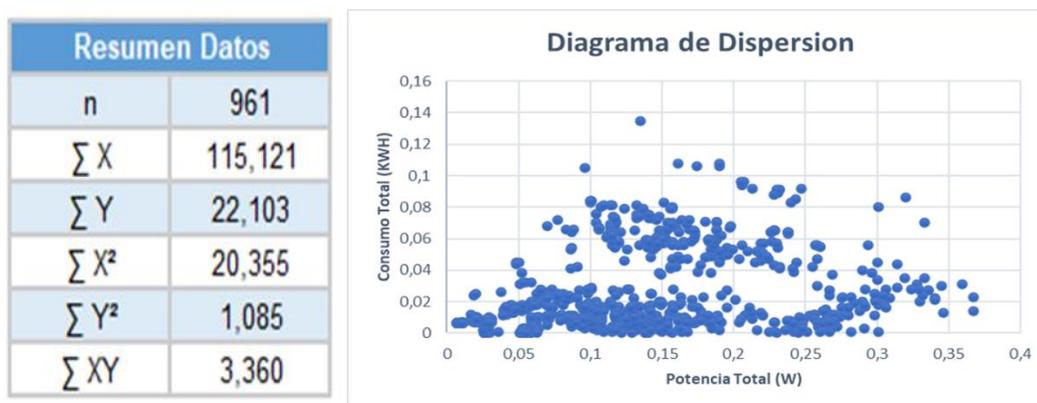


Figura 13. Diagrama de dispersión.

Fuente. Diseño propio.

Se utilizarán metodologías internacionales como el Protocolo de Medida y Verificación de Eficiencia Energética Internacional (IPMVP). Los resultados validarán las proyecciones y demostrarán la utilidad de las medidas adoptadas. Toda información será registrada para replicar las mediciones periódicamente. La figura 14 presenta la relación consumo vs voltaje.

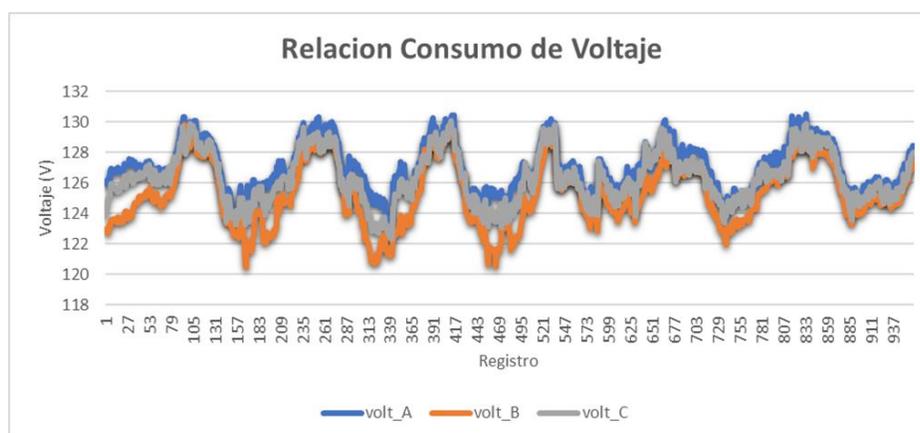


Figura 14. Diagrama de relación consumo voltaje.

Fuente. Diseño propio.

Respecto al cumplimiento de metas y cronogramas, se evaluará el grado de avance de cada iniciativa mediante reuniones periódicas de seguimiento con los responsables. Cualquier desviación deberá justificarse y tomar acciones para recuperar el tiempo planeado. Al finalizar la ejecución, se compararán las metas de ahorro energético y económico planteadas inicialmente contra los resultados efectivamente obtenidos. La figura 15 presenta la relación consumo corriente.

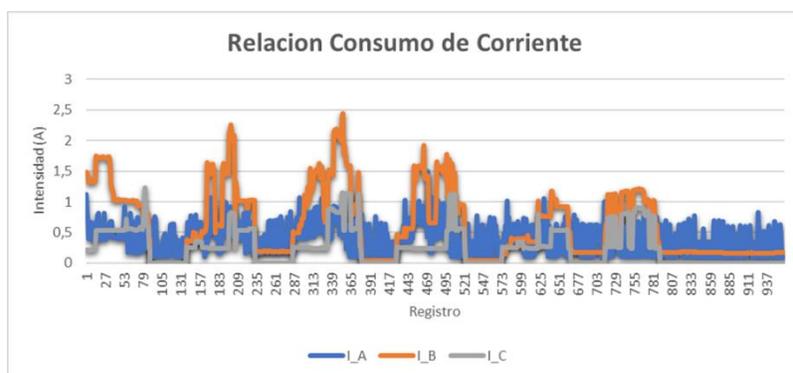


Figura 15. Diagrama de relación consumo corriente.

Fuente. Diseño propio.

Esto verificará el éxito global del proyecto. Finalmente, con los aprendizajes se elaborará un plan de gestión energética a largo plazo, realizando auditorías de seguimiento anualmente. Se documentarán oportunidades de mejora continua y se ajustarán los planes de acción para mantener la optimización como un proceso vivo. Las nuevas mediciones servirán también para detectar desviaciones y tomar acciones correctivas de manera oportuna. Así la figura 16 presenta el registro de consumo eléctrico.

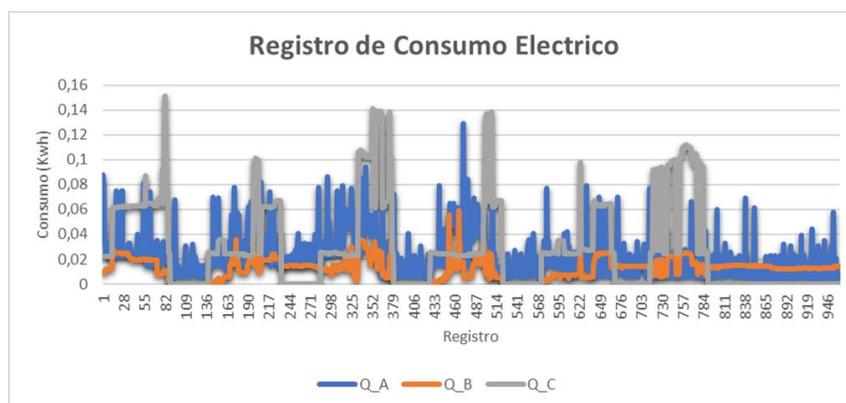


Figura 16. Diagrama de registro de consumo.

Fuente. Diseño propio.

De esta manera, la fase de seguimiento y evaluación resulta indispensable para verificar los beneficios concretos de la optimización energética, retroalimentar las iniciativas implementadas y asegurar la sostenibilidad de los resultados al incorporar la eficiencia energética como una actividad permanente en la gestión de la institución.

A los motores eléctricos se les realizarán pruebas de eficiencia siguiendo los protocolos del código IEEE 112 para determinar las pérdidas en el hierro y cobre, el deslizamiento, el rendimiento y los kilovatios consumidos en vacío y bajo carga.

En transformadores se medirá la corriente y potencia de excitación, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas joule en devanados y se calculará el rendimiento.

Mediante luxómetros se auditarán niveles de iluminancia en distintas áreas comparándolos con los valores recomendados en la norma ISO 8995 para determinar sistemas de alumbrado sobredimensionados o ineficientes.

Con respecto a la interpretación de los datos, se observa como el voltaje en el punto 1 se concentra entre 105,9 y 111,26 voltios, siendo este menor al valor estándar de voltaje de 110 voltios, donde los cuales solo 4 de los 22 registros se encuentran en el intervalo de voltaje de 109.28 y 110.6 voltios en el cual es cercano al valor estándar de voltaje de 110 voltios.

$$\text{Media, } \bar{x} = \frac{\sum xifi}{n} = \frac{2386.08}{22} = 108.46$$

Para las medidas de tendencia central la interpretación indica que el promedio de voltaje es de 108,46 voltios.

$$\text{Mediana, } Me = \frac{22}{2} = 11 \rightarrow Me = 105.9 + \frac{11 - 0}{12} * 1.34 \rightarrow Me = 105.9 + 1.23 \rightarrow Me = 107.13$$

El 50% de los registros de voltaje en el punto 1 son menores o iguales a 107.13 voltio, mientras el otro 50% de los registros son mayores al dicho

$$\text{Moda, } Mo = 12 \rightarrow Mo = 105.9 + \frac{12 - 0}{12 - 0 + 12 - 1} * 1.34 \rightarrow Mo = 105.9 + 0.70 \rightarrow Mo = 106.60$$

La mayor frecuencia de los registros de voltaje es de 106.60 voltios.

$$\text{Varianza, } S^2 = \frac{\sum fi(xi - \bar{x})^2}{n - 1} = \frac{110.1029}{22 - 1} = 5.2430$$

$$\text{Desviacion estandar, } S = \sqrt{\frac{\sum fi(xi - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{5.2430} = 2.2898$$

Las variaciones de los voltajes son de 2.28 voltio alrededor de la media, siendo este valor menor al 5% ($110 * 0.05 = 5.5$) de la tolerancia de los fabricantes para el valor del voltaje de los equipos.

$$\text{Coeficiente de variacion, } CV = \frac{S}{\bar{x}} * 100\% = \frac{2.2556}{106.52} * 100\% = 2.12\%$$

Como el coeficiente de variación es de 2.12% menor a 30%, el conjunto de los registros son homogéneos, por lo cual la media aritmética es representativa para el conjunto de datos, al comparar la media de 106.52 voltio con el valor estándar de 110 voltio, se observa como este es menor, pero se encuentra dentro del 5% de tolerancia de los equipos eléctricos, es decir, se encuentra entre 104.5 y 115.5 voltio, por lo cual los valores registrados se encuentran dentro del voltaje de tolerancia para el correcto funcionamiento de los equipo en la red eléctrica. La figura 17 muestra la dispersión obtenida.

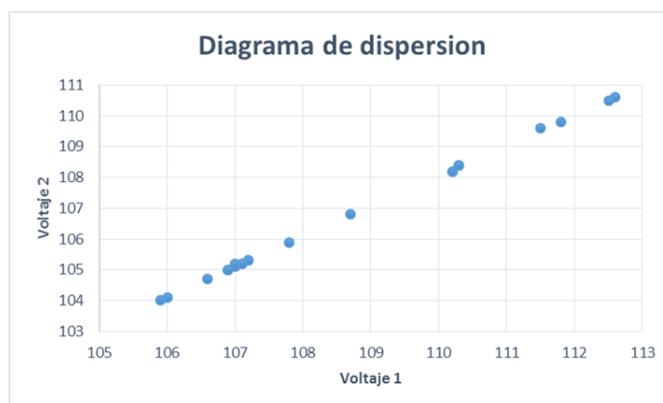


Figura 17. Diagrama de dispersión.
Fuente. Diseño propio.

Se observa una tendencia lineal creciente entre los registros de voltaje, es decir, a medida que aumenta el registro de voltaje en el punto 1, aumenta proporcionalmente el registro de voltaje en el punto 2 Variable independiente (X): Variable dependiente (Y):

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

$$r = \frac{22 * 254682.53 - 2387.8 * 2345.6}{\sqrt{[22 * 259264.38 - (2387.8)^2][22 * 250181.68 - (2345.6)^2]}} = \frac{2191.98}{2192.2813} = 0.9999$$

Se tiene que la correlación entre las variables es directa y casi perfecta, es decir, a medida que el registro de voltaje 1 aumenta el registro de voltaje 2 y 3 aumenta proporcionalmente

$$R^2 = r^2 * 100\% \rightarrow R^2 = (0.9999)^2 * 100\% = 99.97\%$$

El 99.97% de la variabilidad del registro de voltaje en los puntos A,B Y C

$$\text{Pendiente, } b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} =$$

$$b = \frac{22 * 254682.53 - 2387.8 * 2345.6}{22 * 259264.38 - (2387.8)^2} = \frac{2191.98}{2227.52} = 0.9840$$

$$\text{Intersecto, } a = \frac{\sum y - b \sum x}{n}$$

Para el intercepto: cuando el registro de voltaje en el punto 1 se acerca a 0 voltio el valor del registro de voltaje en el punto 2 y 3 se acerca a 67.2465 voltio

Para la pendiente: el registro de voltaje en el punto 2 aumenta a razón de 0.9840 voltio por cada 1 voltio que aumenta en el registro de voltaje en el punto 1 y 2.

En primera instancia, se recopilará y analizará toda la documentación técnica disponible sobre las instalaciones eléctricas del Bloque 4, incluyendo planos eléctricos, diagramas unifilares, especificaciones de equipos, formatos de mantenimiento preventivo y correctivo. Esto permitirá tener un conocimiento detallado sobre las características y configuración real del sistema eléctrico.

Asimismo, se solicitarán los registros históricos de consumo eléctrico mensual del Bloque 4 para los últimos 2-3 años. Con esta data se construirán gráficas de la evolución del consumo, se calcularán indicadores como consumo por metro cuadrado y se identificarán meses críticos de alta demanda. También se analizarán los reportes de mantenimiento preventivo y correctivo de los últimos años para detectar equipos o áreas problemáticas.

De estar disponible, se recopilará información de caracterizaciones de carga eléctrica previas que contengan mediciones de las demandas máximas, curvas de carga diarias, análisis de calidad de potencia, entre otros estudios técnicos realizados.

Esta información secundaria permitirá tener un primer acercamiento a los patrones de consumo eléctrico y posibles deficiencias del sistema. Posteriormente, se realizarán visitas detalladas a las instalaciones eléctricas y equipos del Bloque 4. Mediante inspección visual se identificarán problemas evidentes como cables en mal estado, conexiones inadecuadas, circuitos sobrecargados, luxómetros quemados, motores con vibraciones excesivas. Se prestará especial atención a transformadores, tableros de distribución, cuartos de motores y el alumbrado interior y exterior.

Durante los recorridos también se georeferenciaron todos los equipos y se elaborarán planos As-Built en caso de existir modificaciones respecto a los planos eléctricos originales. Las visitas serán guiadas por personal de mantenimiento eléctrico de la Institución que podrá aportar información relevante de primera mano. Se les aplicarán entrevistas semi-estructuradas para conocer su percepción sobre los problemas existentes y las posibles causas. Posteriormente, se realizarán mediciones eléctricas preliminares en puntos representativos utilizando analizadores de redes. Se medirán al menos las tres fases de los tableros principales y la acometida, registrando parámetros como voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y armónicos. Los resultados permitirán tener un primer diagnóstico de la calidad de la energía suministrada. Con toda la información recopilada y el trabajo de campo realizado se integrará un diagnóstico preliminar, identificando los equipos y áreas críticas en las que se concentrarán los esfuerzos de la auditoría. Se espera detectar problemas como bajo factor de potencia, desequilibrios entre fases, caídas de tensión, presencia de armónicos, baja eficiencia en motores y transformadores, iluminación

ineficiente, entre otros; que serán analizados a profundidad en la siguiente etapa mediante una auditoría detallada.

Para la etapa de auditoría detallada se realizarán mediciones eléctricas exhaustivas en los equipos y áreas identificadas como críticas en la fase de diagnóstico preliminar, con el fin de cuantificar variables como la demanda de potencia, el consumo de energía, los indicadores de eficiencia y la calidad de la energía suministrada.

Se instalarán analizadores de redes en los tableros principales y secundarios para registrar la demanda máxima diaria y obtener la curva de carga horaria durante una semana representativa. Con esto se determinarán los horarios y días de mayor consumo. Asimismo, se medirá la energía consumida (kWh) por cada tablero mediante la integración de las curvas de carga para conocer la contribución de cada circuito al consumo total.

Una vez realizadas las mediciones y la auditoría detallada, se procederá al análisis de los resultados obtenidos para identificar oportunidades de mejora y formular recomendaciones específicas. Inicialmente se evaluarán los indicadores energéticos calculados como consumo por metro cuadrado, consumo por equipo, factor de carga, factor de potencia, eficiencia de motores y transformadores, niveles de iluminancia, entre otros. Estos indicadores se compararán con benchmarks o referentes de eficiencia energética correspondientes a instalaciones similares, considerando las mejores prácticas y estándares como ISO 50001.

Las desviaciones respecto a los valores referentes permitirán identificar los sistemas y equipos con peor desempeño, en los cuales se deberá enfocar la optimización. Se realizará un análisis técnico-económico para cada equipo o área problemática a fin de determinar las medidas de eficiencia energética más viables desde el punto de vista de costo-beneficio. Por ejemplo, para motores de baja eficiencia se evaluará la conveniencia de reemplazarlos por motores premium de alta eficiencia IE3 o IE4, considerando el ahorro de energía proyectado y el costo de los nuevos motores. De igual manera, en sistemas de iluminación sobredimensionados se calculará el retorno de la inversión de implementar lámparas LED, sensores de ocupación y reguladores de intensidad lumínica.

Con las medidas identificadas, se procederá a estimar su impacto energético y económico. Se calculará la reducción potencial de consumo eléctrico en kWh/año y los ahorros económicos considerando la tarifa promedio de la institución. Asimismo, dado que la energía proviene principalmente de fuentes térmicas, se cuantificará la disminución de emisiones de gases efecto invernadero utilizando los factores de emisión del sistema interconectado nacional. Posteriormente se elaborará un plan de ejecución que incluirá para cada medida la descripción técnica, los responsables, las inversiones requeridas, los indicadores de seguimiento, y un cronograma de implementación priorizado según costo-beneficio.

La fase de seguimiento y evaluación es fundamental para verificar la efectividad de las medidas de eficiencia energética implementadas, cuantificar los ahorros y realizar ajustes para la mejora continua. Una vez ejecutado el plan de optimización energética formulado tras la auditoría, se realizará una comparación antes-después de los indicadores energéticos calculados inicialmente. Por ejemplo, se compararán los nuevos valores de consumo por metro cuadrado, consumo por equipo, rendimiento de motores, factores de potencia, etc., respecto a los obtenidos en la línea base.

Esto permitirá comprobar que los indicadores mejoren efectivamente tras la implementación de las recomendaciones. Cualquier desviación deberá analizarse para determinar sus causas y tomar acciones correctivas. Asimismo, para confirmar los ahorros energéticos estimados, se realizará una medición y verificación rigurosa del nuevo consumo eléctrico (kWh) de las áreas intervenidas. Se utilizarán metodologías internacionales como el Protocolo de Medida y Verificación de Eficiencia Energética Internacional (IPMVP). Los resultados validarán las proyecciones y demostrarán la utilidad de las medidas adoptadas. Toda información será registrada para replicar las mediciones periódicamente.

Respecto al cumplimiento de metas y cronogramas, se evaluará el grado de avance de cada iniciativa mediante reuniones periódicas de seguimiento con los responsables. Cualquier desviación deberá justificarse y tomar acciones para recuperar el tiempo planeado. Al finalizar la ejecución, se compararán las metas de ahorro energético y económico planteadas inicialmente

contra los resultados efectivamente obtenidos. Esto verificará el éxito global del proyecto. Finalmente, con los aprendizajes se elaborará un plan de gestión energética a largo plazo, realizando auditorías de seguimiento anualmente. Se documentarán oportunidades de mejora continua y se ajustarán los planes de acción para mantener la optimización como un proceso vivo. Las nuevas mediciones servirán también para detectar desviaciones y tomar acciones correctivas de manera oportuna. De esta manera, la fase de seguimiento y evaluación resulta indispensable para verificar los beneficios concretos de la optimización energética, retroalimentar las iniciativas implementadas y asegurar la sostenibilidad de los resultados al incorporar la eficiencia energética como una actividad permanente en la gestión de la institución.

7. Conclusiones

Para la etapa de auditoría detallada se realizarán mediciones eléctricas exhaustivas en los equipos y áreas identificadas como críticas en la fase de diagnóstico preliminar, con el fin de cuantificar variables como la demanda de potencia, el consumo de energía, los indicadores de eficiencia y la calidad de la energía suministrada.

Para evaluar la calidad de potencia se medirán parámetros como contenido armónico, severidad de armónicos individuales y total (THD), fluctuaciones de tensión, desequilibrios, factor de potencia y otros durante al menos 72 horas continuas. Se utilizarán analizadores de calidad de energía según la norma IEC 61000-4-30.

Los resultados determinarán si existen problemas en la onda de voltaje que estén afectando el desempeño de equipos sensibles. Mediante termografía infrarroja se inspeccionarán las conexiones eléctricas, identificando puntos calientes por alto impedancia de contacto que generan pérdidas técnicas. Las imágenes térmicas mostrarán la distribución de temperatura, permitiendo diagnosticar problemas en aislamientos, empalmes inadecuados y conductores sobrecargados.

8. Recomendaciones

A los motores eléctricos se les realizarán pruebas de eficiencia siguiendo los protocolos del código IEEE 112 para determinar las pérdidas en el hierro y cobre, el deslizamiento, el rendimiento y los kilovatios consumidos en vacío y bajo carga.

En transformadores se medirá la corriente y potencia de excitación, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas joule en devanados y se calculará el rendimiento.

Mediante luxómetros se auditarán niveles de iluminancia en distintas áreas comparándolos con los valores recomendados en la norma ISO 8995 para determinar sistemas de alumbrado sobredimensionados o ineficientes. En este punto se hace la descripción pormenorizada de las conclusiones del trabajo de grado.

9. Referencias bibliográficas

- Capehart, B.L. (2022). *Guide to energy management*. Lilburn, GA: Fairmont Press.
- García, R. (2011). La eficiencia energética: una opción válida para el desarrollo sustentable en México. *Energía a debate*, 57, 67-82.
- Gómez, M. (2010). Auditorías energéticas en el sector universitario: estudio de viabilidad. *Revista Técnica de Ingeniería*, 32(4), 234-242.
- International Energy Agency (2021). *Energy Efficiency 2021*. Paris: IEA.
- IDAE (2011). *Guía técnica de eficiencia energética en iluminación*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- IPCC (2014). *Climate change 2014: mitigation of climate change*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Kaabe, S. (2021). Beneficios de la eficiencia energética para mitigar el cambio climático. *Cuadernos de Sostenibilidad y Patrimonio Natural*, 28, 15-24.
- Ministerio de Minas y Energía (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*. Bogotá: Imprenta Nacional.
- Organización Latinoamericana de Energía (2012). *Energía eficiente en América Latina y el Caribe: avances y desafíos del último quinquenio*. Quito: OLADE.
- Rahman, S. & Khondaker, A. (2012). Mitigation measures to reduce greenhouse gas emissions and enhance carbon capture and storage in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2446–2460.
- Rodríguez, F. & Casas, W. (2018). Auditoría energética a la instalación eléctrica de un edificio universitario. *Respuestas*, 23(1), 74-87.
- Thumann, A. & Younger, W. J. (2022). *Handbook of energy audits*. Lilburn, GA: Fairmont Press.
- Universidad de Antioquia (2010). *Lineamientos de construcción sostenible para el diseño y construcción de proyectos de la Universidad de Antioquia*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Vera, I. & Langlois, L. (2007). Energy indicators for sustainable development. *Energy*, 32(6), 875-882.

Wang, B., Xia, X. & Zhang, J. (2014). A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings. *Energy and Buildings*, 77, 227-236.

Capenhart, B.L. (2022). *Guide to energy management*. Lilburn, GA: Fairmont Press.

García, R. (2011). La eficiencia energética: una opción válida para el desarrollo sustentable en México. *Energía a debate*, 57, 67-82.

Gómez, M. (2010). Auditorías energéticas en el sector universitario: estudio de viabilidad. *Revista Técnica de Ingeniería*, 32(4), 234-242.

International Energy Agency (2021). *Energy Efficiency 2021*. Paris: IEA.

IDAE (2011). *Guía técnica de eficiencia energética en iluminación*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

IPCC (2014). *Climate change 2014: mitigation of climate change*. New York, NY: Cambridge University Press.

Kaabe, S. (2021). Beneficios de la eficiencia energética para mitigar el cambio climático. *Cuadernos de Sostenibilidad y Patrimonio Natural*, 28, 15-24.

Ministerio de Minas y Energía (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*. Bogotá: Imprenta Nacional.

Organización Latinoamericana de Energía (2012). *Energía eficiente en América Latina y el Caribe: avances y desafíos del último quinquenio*. Quito: OLADE.

Rahman, S. & Khondaker, A. (2012). Mitigation measures to reduce greenhouse gas emissions and enhance carbon capture and storage in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2446–2460.

Rodríguez, F. & Casas, W. (2018). Auditoría energética a la instalación eléctrica de un edificio universitario. *Respuestas*, 23(1), 74-87.

Thumann, A. & Younger, W. J. (2022). *Handbook of energy audits*. Lilburn, GA: Fairmont Press.

Universidad de Antioquia (2010). *Lineamientos de construcción sostenible para el diseño y construcción de proyectos de la Universidad de Antioquia*. Medellín: Universidad de Antioquia.

Vera, I. & Langlois, L. (2007). Energy indicators for sustainable development. *Energy*, 32(6), 875-882.

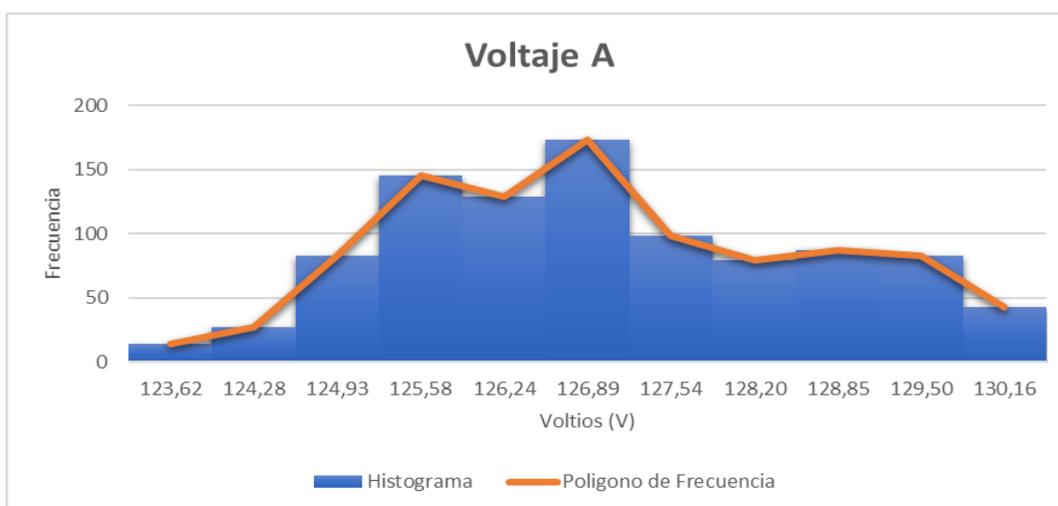
Wang, B., Xia, X. & Zhang, J. (2014). A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings. *Energy and Buildings*, 77, 227-236.

10. Anexos

Voltaje Fase A.

| Voltaje A | | Media | 127,037234 |
|------------|---------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 2,57 |
| Maximo | 130,483 | | |
| Minimo | 123,295 | Desviacion | 1,60459177 |
| Rango | 7,188 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,65 | | |

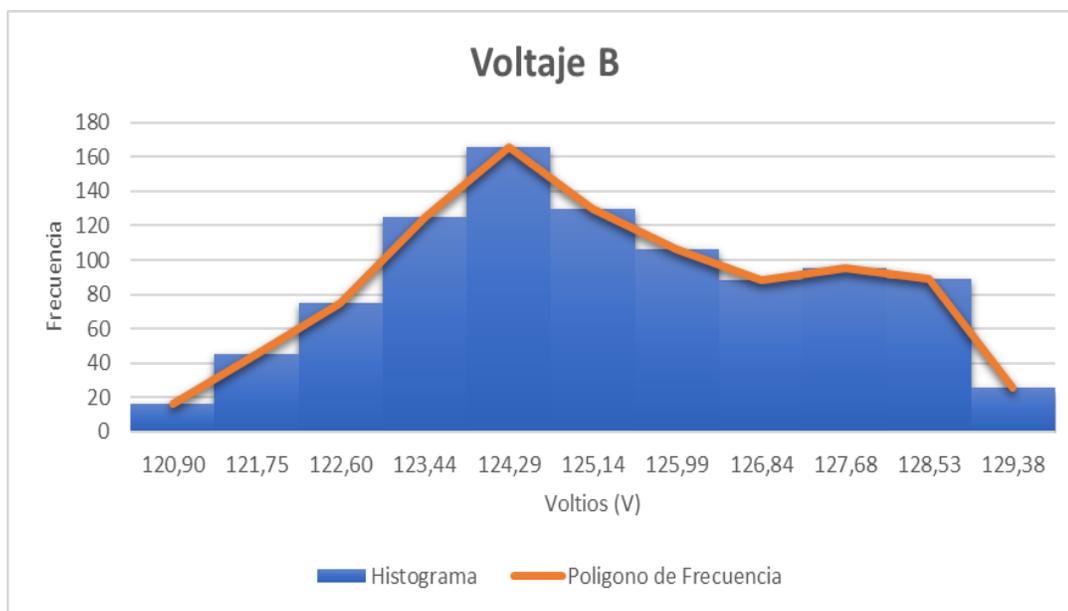
| Voltaje A | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|-----------------|--------|------------|-----|------------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 123,3 - 123,95 | 123,62 | 14 | 14 | 1730,70 | -3,42 | 11,67 | 163,32 |
| 123,95 - 124,6 | 124,28 | 27 | 41 | 3355,43 | -2,76 | 7,63 | 205,98 |
| 124,6 - 125,26 | 124,93 | 83 | 124 | 10369,08 | -2,11 | 4,45 | 369,03 |
| 125,26 - 125,91 | 125,58 | 145 | 269 | 18209,40 | -1,46 | 2,12 | 307,03 |
| 125,91 - 126,56 | 126,24 | 129 | 398 | 16284,39 | -0,80 | 0,64 | 82,91 |
| 126,56 - 127,22 | 126,89 | 173 | 571 | 21951,80 | -0,15 | 0,02 | 3,80 |
| 127,22 - 127,87 | 127,54 | 98 | 669 | 12499,16 | 0,51 | 0,26 | 25,01 |
| 127,87 - 128,52 | 128,20 | 79 | 748 | 10127,48 | 1,16 | 1,34 | 106,06 |
| 128,52 - 129,18 | 128,85 | 87 | 835 | 11209,89 | 1,81 | 3,28 | 285,69 |
| 129,18 - 129,83 | 129,50 | 83 | 918 | 10748,73 | 2,47 | 6,08 | 504,57 |
| 129,83 - 130,48 | 130,16 | 43 | 961 | 5596,72 | 3,12 | 9,73 | 418,32 |
| Total | | 961 | | 122082,78 | | | 2471,73 |



Voltaje Fase B

| Voltaje B | | Media | 125,274069 |
|------------|---------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 4,36 |
| Maximo | 129,802 | Desviacion | 2,08777212 |
| Minimo | 120,478 | | |
| Rango | 9,324 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,85 | | |

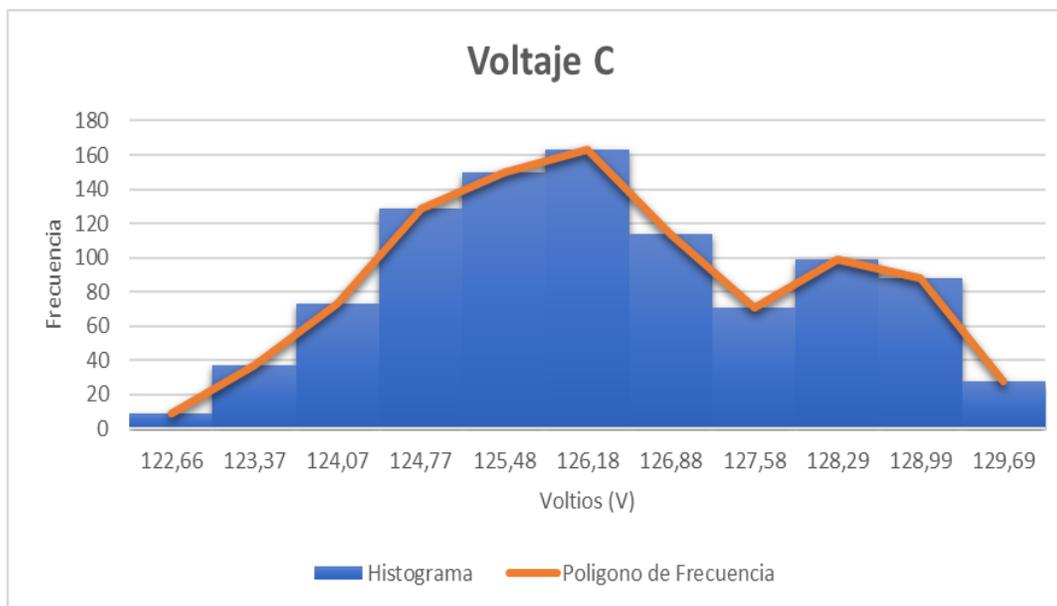
| Voltaje B | x_i | f_i | F_i | $x_i f_i$ | $x_i - \bar{x}$ | $(x_i - \bar{x})^2$ | $f_i (x_i - \bar{x})^2$ |
|-----------------|--------|------------|-------|------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 120,48 - 121,33 | 120,90 | 16 | 16 | 1934,43 | -4,37 | 19,12 | 305,87 |
| 121,33 - 122,17 | 121,75 | 45 | 61 | 5478,73 | -3,52 | 12,42 | 559,03 |
| 122,17 - 123,02 | 122,60 | 75 | 136 | 9194,78 | -2,68 | 7,17 | 537,47 |
| 123,02 - 123,87 | 123,44 | 125 | 261 | 15430,59 | -1,83 | 3,35 | 418,31 |
| 123,87 - 124,72 | 124,29 | 166 | 427 | 20632,53 | -0,98 | 0,96 | 159,98 |
| 124,72 - 125,56 | 125,14 | 130 | 557 | 16268,20 | -0,13 | 0,02 | 2,34 |
| 125,56 - 126,41 | 125,99 | 106 | 663 | 13354,69 | 0,71 | 0,51 | 53,97 |
| 126,41 - 127,26 | 126,84 | 88 | 751 | 11161,50 | 1,56 | 2,44 | 214,49 |
| 127,26 - 128,11 | 127,68 | 95 | 846 | 12129,88 | 2,41 | 5,80 | 551,24 |
| 128,11 - 128,95 | 128,53 | 89 | 935 | 11439,22 | 3,26 | 10,60 | 943,81 |
| 128,95 - 129,8 | 129,38 | 26 | 961 | 3363,83 | 4,10 | 16,84 | 437,94 |
| Total | | 961 | | 120388,38 | | | 4184,44 |



Voltaje Fase C

| Voltaje C | | Media | 126,343094 |
|------------|---------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 2,82333391 |
| Maximo | 130,045 | Desviacion | 1,68027793 |
| Minimo | 122,312 | | |
| Rango | 7,733 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,70 | | |

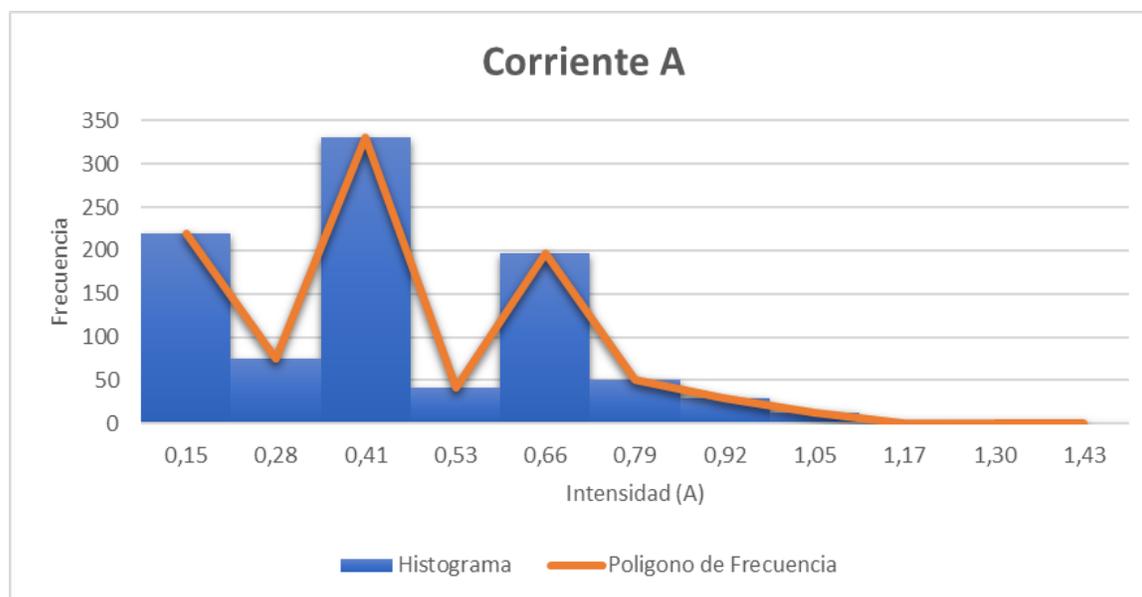
| Voltaje C | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|-----------------|--------|------------|-----|------------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 122,31 - 123,02 | 122,66 | 9 | 9 | 1103,97 | -3,68 | 13,54 | 121,85 |
| 123,02 - 123,72 | 123,37 | 37 | 46 | 4564,56 | -2,98 | 8,86 | 327,82 |
| 123,72 - 124,42 | 124,07 | 73 | 119 | 9057,07 | -2,27 | 5,17 | 377,35 |
| 124,42 - 125,12 | 124,77 | 129 | 248 | 16095,65 | -1,57 | 2,47 | 318,21 |
| 125,12 - 125,83 | 125,48 | 150 | 398 | 18821,33 | -0,87 | 0,75 | 112,91 |
| 125,83 - 126,53 | 126,18 | 163 | 561 | 20567,10 | -0,16 | 0,03 | 4,42 |
| 126,53 - 127,23 | 126,88 | 114 | 675 | 14464,49 | 0,54 | 0,29 | 33,05 |
| 127,23 - 127,94 | 127,58 | 71 | 746 | 9058,50 | 1,24 | 1,54 | 109,42 |
| 127,94 - 128,64 | 128,29 | 99 | 845 | 12700,46 | 1,94 | 3,78 | 374,29 |
| 128,64 - 129,34 | 128,99 | 88 | 933 | 11351,16 | 2,65 | 7,01 | 616,77 |
| 129,34 - 130,05 | 129,69 | 28 | 961 | 3631,42 | 3,35 | 11,23 | 314,31 |
| Total | | 961 | | 121415,71 | | | 2710,40 |



Corriente Fase A

| Corriente A | | Media | 0,44186832 |
|-------------|-------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 0,05256838 |
| Maximo | 1,495 | Desviacion | 0,23 |
| Minimo | 0,085 | | |
| Rango | 1,41 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,13 | | |

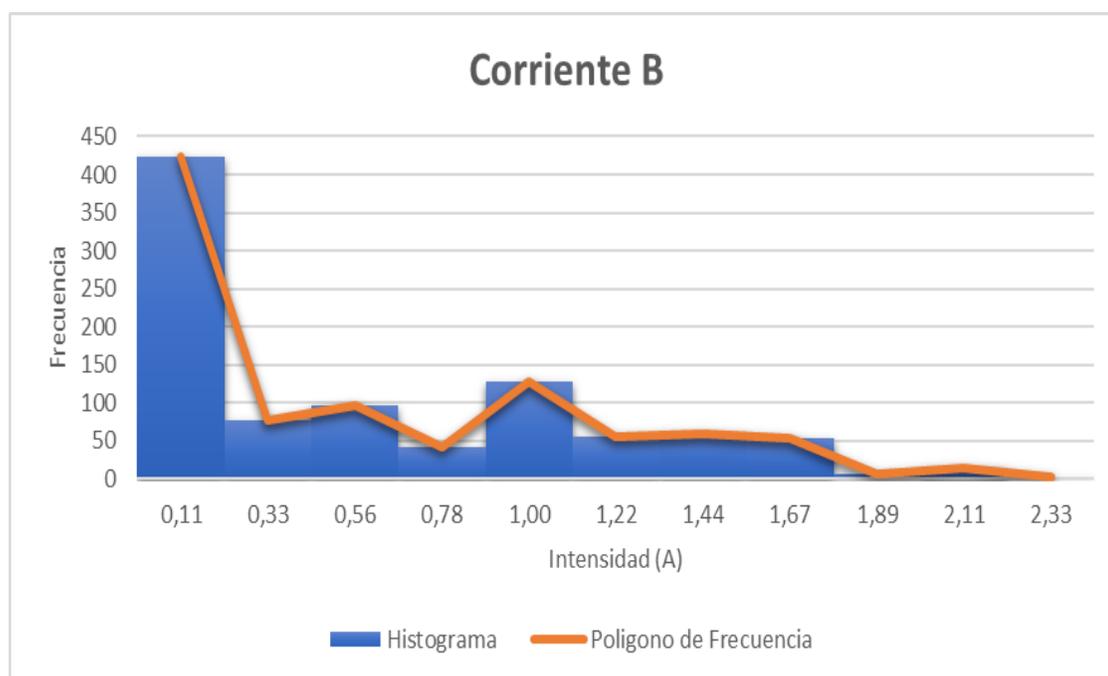
| Corriente A | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|--------------|------|------------|-----|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0,09 - 0,21 | 0,15 | 220 | 220 | 32,80 | -0,29 | 0,09 | 18,86 |
| 0,21 - 0,34 | 0,28 | 75 | 295 | 20,80 | -0,16 | 0,03 | 2,03 |
| 0,34 - 0,47 | 0,41 | 331 | 626 | 134,21 | -0,04 | 0,00 | 0,44 |
| 0,47 - 0,6 | 0,53 | 42 | 668 | 22,41 | 0,09 | 0,01 | 0,35 |
| 0,6 - 0,73 | 0,66 | 197 | 865 | 130,38 | 0,22 | 0,05 | 9,53 |
| 0,73 - 0,85 | 0,79 | 51 | 916 | 40,29 | 0,35 | 0,12 | 6,18 |
| 0,85 - 0,98 | 0,92 | 30 | 946 | 27,55 | 0,48 | 0,23 | 6,81 |
| 0,98 - 1,11 | 1,05 | 13 | 959 | 13,60 | 0,60 | 0,37 | 4,75 |
| 1,11 - 1,24 | 1,17 | 1 | 960 | 1,17 | 0,73 | 0,54 | 0,54 |
| 1,24 - 1,37 | 1,30 | 0 | 960 | 0,00 | 0,86 | 0,74 | 0,00 |
| 1,37 - 1,5 | 1,43 | 1 | 961 | 1,43 | 0,99 | 0,98 | 0,98 |
| Total | | 961 | | 424,64 | | | 50,47 |



Corriente Fase B

| Corriente B | | Media | 0,60512903 |
|-------------|-------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 0,32024333 |
| Maximo | 2,442 | Desviacion | 0,57 |
| Minimo | 0 | | |
| Rango | 2,442 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,22 | | |

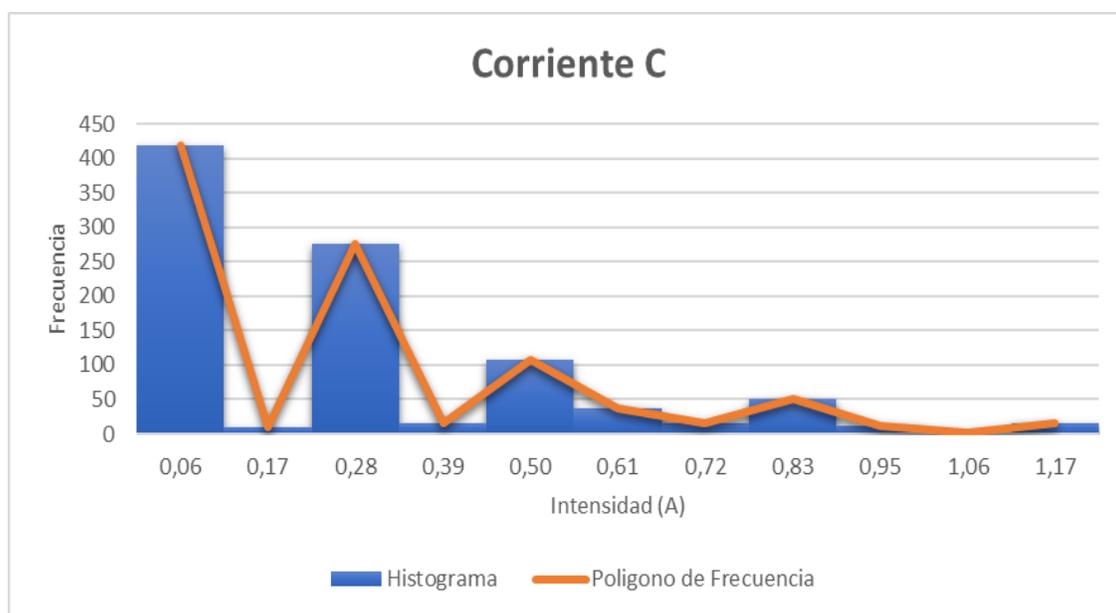
| Corriente B | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|--------------|------|------------|-----|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0 - 0,22 | 0,11 | 424 | 424 | 47,06 | -0,49 | 0,24 | 103,53 |
| 0,22 - 0,44 | 0,33 | 77 | 501 | 25,64 | -0,27 | 0,07 | 5,70 |
| 0,44 - 0,67 | 0,56 | 96 | 597 | 53,28 | -0,05 | 0,00 | 0,24 |
| 0,67 - 0,89 | 0,78 | 41 | 638 | 31,86 | 0,17 | 0,03 | 1,21 |
| 0,89 - 1,11 | 1,00 | 129 | 767 | 128,87 | 0,39 | 0,16 | 20,01 |
| 1,11 - 1,33 | 1,22 | 56 | 823 | 68,38 | 0,62 | 0,38 | 21,24 |
| 1,33 - 1,55 | 1,44 | 60 | 883 | 86,58 | 0,84 | 0,70 | 42,12 |
| 1,55 - 1,78 | 1,67 | 54 | 937 | 89,91 | 1,06 | 1,12 | 60,66 |
| 1,78 - 2 | 1,89 | 6 | 943 | 11,32 | 1,28 | 1,64 | 9,86 |
| 2 - 2,22 | 2,11 | 15 | 958 | 31,64 | 1,50 | 2,26 | 33,92 |
| 2,22 - 2,44 | 2,33 | 3 | 961 | 6,99 | 1,73 | 2,98 | 8,94 |
| Total | | 961 | | 581,53 | | | 307,43 |



Corriente Fase C

| Corriente C | | Media | 0,28096572 |
|-------------|-------|------------|------------|
| Datos | 960 | Varianza | 0,07129775 |
| Maximo | 1,223 | Desviacion | 0,27 |
| Minimo | 0 | | |
| Rango | 1,223 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,11 | | |

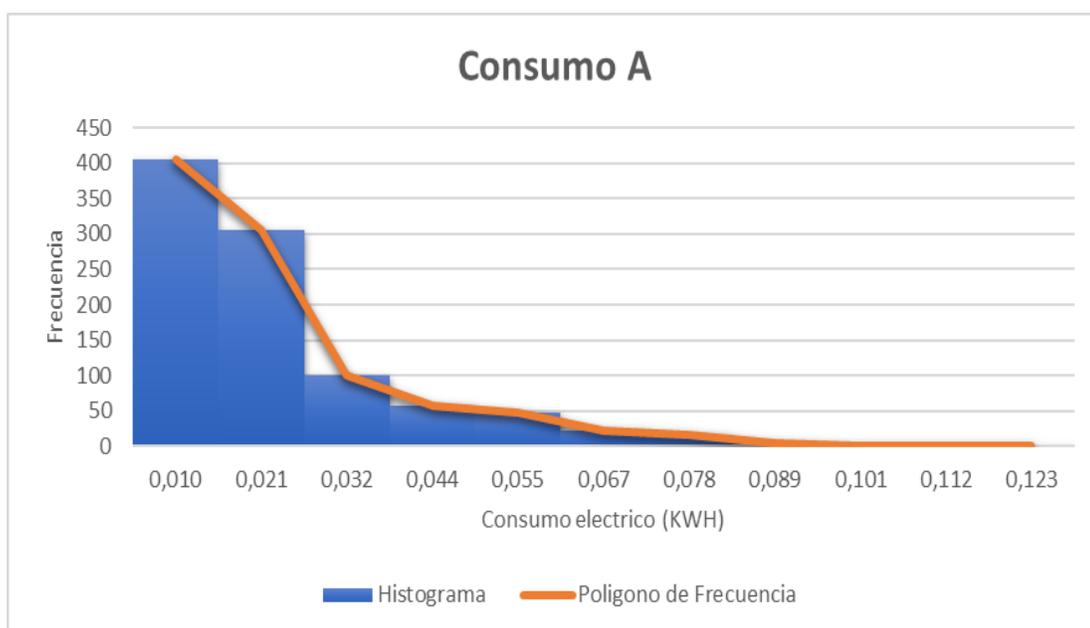
| Corriente C | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|--------------|------|------------|-----|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0 - 0,11 | 0,06 | 418 | 418 | 23,24 | -0,23 | 0,05 | 21,23 |
| 0,11 - 0,22 | 0,17 | 10 | 428 | 1,67 | -0,11 | 0,01 | 0,13 |
| 0,22 - 0,33 | 0,28 | 275 | 703 | 76,44 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,33 - 0,44 | 0,39 | 16 | 719 | 6,23 | 0,11 | 0,01 | 0,19 |
| 0,44 - 0,56 | 0,50 | 108 | 827 | 54,03 | 0,22 | 0,05 | 5,20 |
| 0,56 - 0,67 | 0,61 | 37 | 864 | 22,63 | 0,33 | 0,11 | 4,04 |
| 0,67 - 0,78 | 0,72 | 15 | 879 | 10,84 | 0,44 | 0,20 | 2,93 |
| 0,78 - 0,89 | 0,83 | 51 | 930 | 42,53 | 0,55 | 0,31 | 15,59 |
| 0,89 - 1 | 0,95 | 12 | 942 | 11,34 | 0,66 | 0,44 | 5,29 |
| 1 - 1,11 | 1,06 | 2 | 944 | 2,11 | 0,78 | 0,60 | 1,20 |
| 1,11 - 1,22 | 1,17 | 16 | 960 | 18,68 | 0,89 | 0,79 | 12,57 |
| Total | | 960 | | 269,73 | | | 68,37 |



Consumo Fase A

| Consumo A | | | |
|------------|-------|------------|------------|
| Datos | 961 | Media | 0,02298472 |
| Maximo | 0,129 | Varianza | 0,00029109 |
| Minimo | 0,004 | | |
| Rango | 0,125 | Desviacion | 0,02 |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,01 | | |

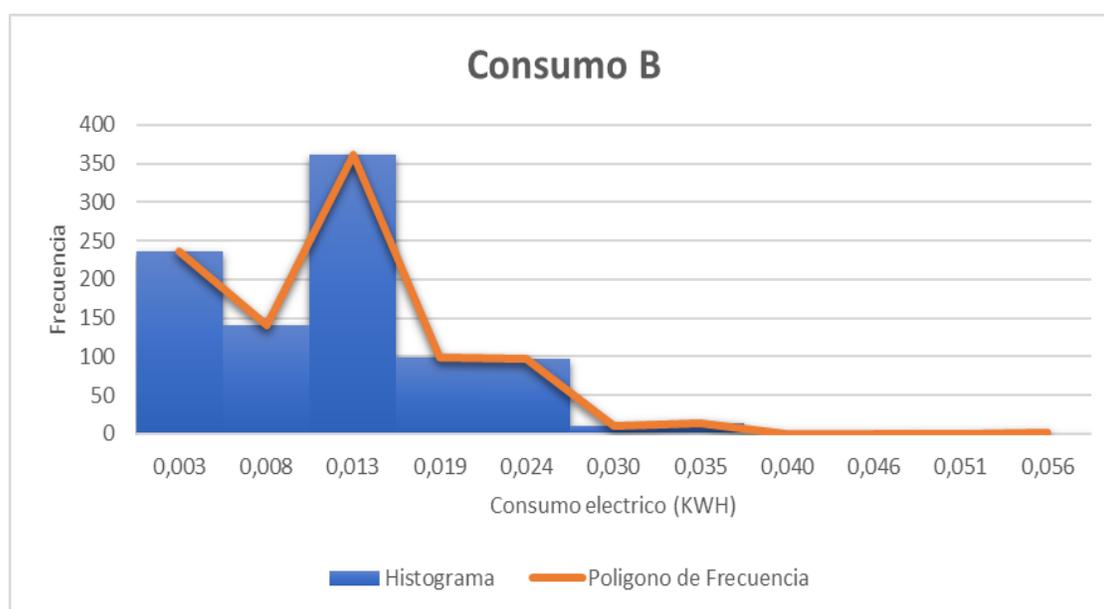
| Consumo A | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|---------------|-------|------------|-----|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0,004 - 0,015 | 0,010 | 405 | 405 | 3,921 | -0,013 | 0,000 | 0,072 |
| 0,015 - 0,027 | 0,021 | 305 | 710 | 6,419 | -0,002 | 0,000 | 0,001 |
| 0,027 - 0,038 | 0,032 | 101 | 811 | 3,273 | 0,009 | 0,000 | 0,009 |
| 0,038 - 0,049 | 0,044 | 58 | 869 | 2,539 | 0,021 | 0,000 | 0,025 |
| 0,049 - 0,061 | 0,055 | 48 | 917 | 2,647 | 0,032 | 0,001 | 0,050 |
| 0,061 - 0,072 | 0,067 | 21 | 938 | 1,397 | 0,044 | 0,002 | 0,040 |
| 0,072 - 0,084 | 0,078 | 17 | 955 | 1,324 | 0,055 | 0,003 | 0,051 |
| 0,084 - 0,095 | 0,089 | 5 | 960 | 0,446 | 0,066 | 0,004 | 0,022 |
| 0,095 - 0,106 | 0,101 | 0 | 960 | 0,000 | 0,078 | 0,006 | 0,000 |
| 0,106 - 0,118 | 0,112 | 0 | 960 | 0,000 | 0,089 | 0,008 | 0,000 |
| 0,118 - 0,129 | 0,123 | 1 | 961 | 0,123 | 0,100 | 0,010 | 0,010 |
| Total | | 961 | | 22,088 | | | 0,279 |



Consumo Fase B

| Consumo B | | Media | 0,01217992 |
|------------|-------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 5,7345E-05 |
| Maximo | 0,059 | Desviacion | 0,01 |
| Minimo | 0 | | |
| Rango | 0,059 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,01 | | |

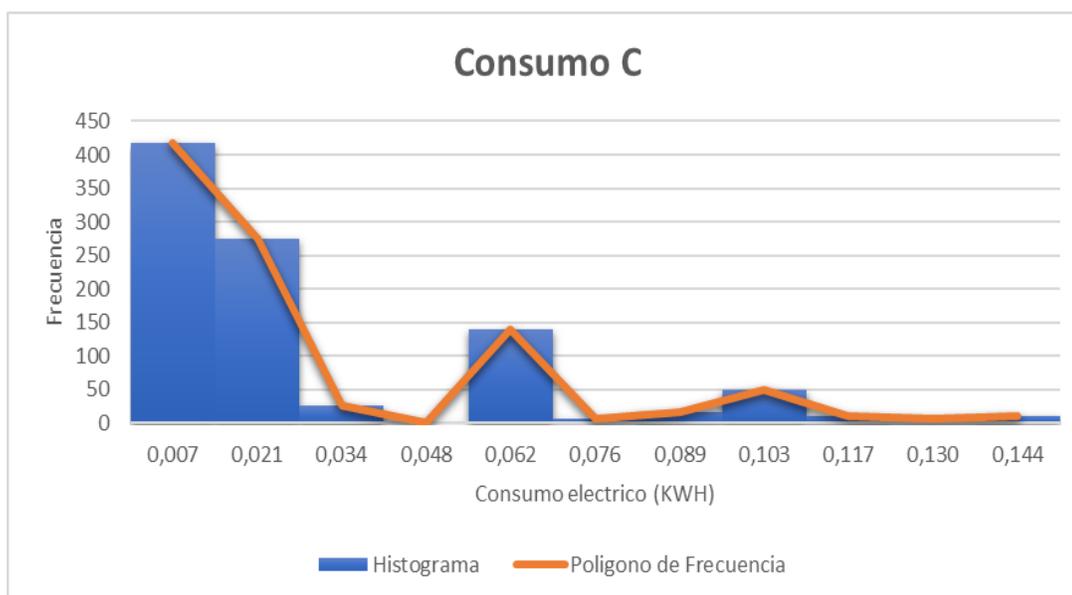
| Consumo B | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|---------------|-------|------------|-----|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0 - 0,005 | 0,003 | 236 | 236 | 0,633 | -0,009 | 0,000 | 0,021 |
| 0,005 - 0,011 | 0,008 | 140 | 376 | 1,126 | -0,004 | 0,000 | 0,002 |
| 0,011 - 0,016 | 0,013 | 361 | 737 | 4,841 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 0,016 - 0,021 | 0,019 | 99 | 836 | 1,859 | 0,007 | 0,000 | 0,004 |
| 0,021 - 0,027 | 0,024 | 98 | 934 | 2,365 | 0,012 | 0,000 | 0,014 |
| 0,027 - 0,032 | 0,030 | 11 | 945 | 0,325 | 0,017 | 0,000 | 0,003 |
| 0,032 - 0,038 | 0,035 | 14 | 959 | 0,488 | 0,023 | 0,001 | 0,007 |
| 0,038 - 0,043 | 0,040 | 0 | 959 | 0,000 | 0,028 | 0,001 | 0,000 |
| 0,043 - 0,048 | 0,046 | 0 | 959 | 0,000 | 0,033 | 0,001 | 0,000 |
| 0,048 - 0,054 | 0,051 | 0 | 959 | 0,000 | 0,039 | 0,002 | 0,000 |
| 0,054 - 0,059 | 0,056 | 1 | 960 | 0,056 | 0,044 | 0,002 | 0,002 |
| Total | | 960 | | 11,693 | | | 0,055 |



Consumo Fase C

| Consumo C | | Media | 0,03007573 |
|------------|-------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 0,00106177 |
| Maximo | 0,151 | | |
| Minimo | 0 | Desviacion | 0,03 |
| Rango | 0,151 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,01 | | |

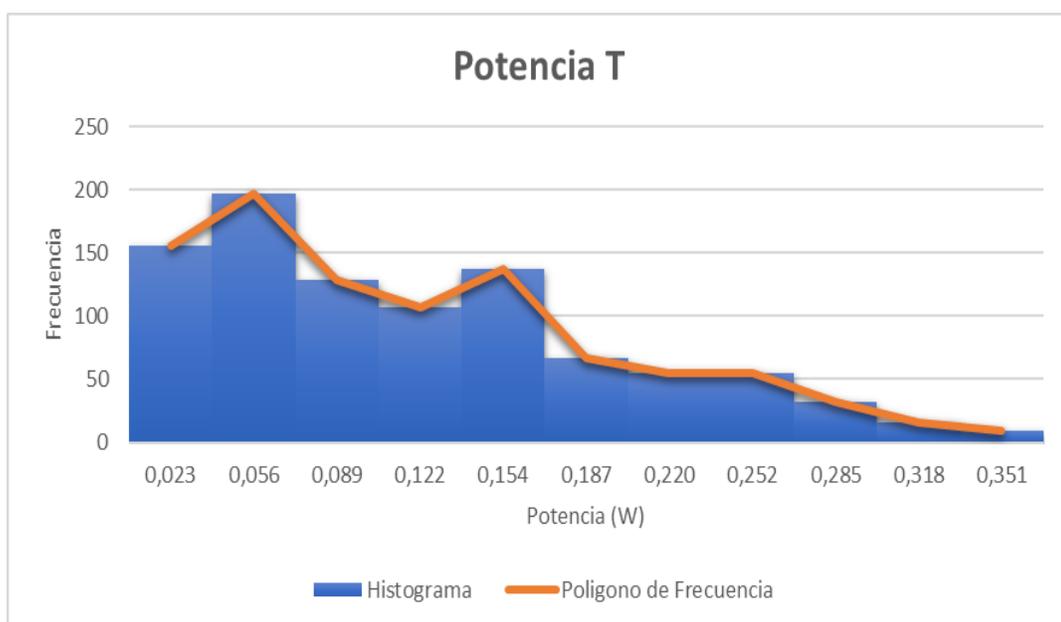
| Consumo C | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | fi (xi - \bar{x}) ² |
|---------------|-------|------------|-----|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0 - 0,014 | 0,007 | 418 | 418 | 2,869 | -0,023 | 0,001 | 0,225 |
| 0,014 - 0,027 | 0,021 | 275 | 693 | 5,663 | -0,009 | 0,000 | 0,025 |
| 0,027 - 0,041 | 0,034 | 27 | 720 | 0,927 | 0,004 | 0,000 | 0,000 |
| 0,041 - 0,055 | 0,048 | 0 | 720 | 0,000 | 0,018 | 0,000 | 0,000 |
| 0,055 - 0,069 | 0,062 | 140 | 860 | 8,648 | 0,032 | 0,001 | 0,141 |
| 0,069 - 0,082 | 0,076 | 6 | 866 | 0,453 | 0,045 | 0,002 | 0,012 |
| 0,082 - 0,096 | 0,089 | 17 | 883 | 1,517 | 0,059 | 0,003 | 0,059 |
| 0,096 - 0,11 | 0,103 | 49 | 932 | 5,045 | 0,073 | 0,005 | 0,260 |
| 0,11 - 0,124 | 0,117 | 11 | 943 | 1,284 | 0,087 | 0,008 | 0,083 |
| 0,124 - 0,137 | 0,130 | 7 | 950 | 0,913 | 0,100 | 0,010 | 0,070 |
| 0,137 - 0,151 | 0,144 | 11 | 961 | 1,586 | 0,114 | 0,013 | 0,143 |
| Total | | 961 | | 28,903 | | | 1,019 |



Potencia Total

| Potencia T | | | |
|------------|-------|------------|------------|
| Datos | 961 | Media | 0,12103931 |
| Maximo | 0,367 | Varianza | 0,00660574 |
| Minimo | 0,007 | Desviacion | 0,08 |
| Rango | 0,36 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,03 | | |

| Potencia T | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | $\sum_{i=1}^n fi (xi - \bar{x})^2$ |
|---------------|-------|------------|-----|----------------|----------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 0,007 - 0,04 | 0,023 | 156 | 156 | 3,645 | -0,098 | 0,010 | 1,488 |
| 0,04 - 0,072 | 0,056 | 197 | 353 | 11,050 | -0,065 | 0,004 | 0,831 |
| 0,072 - 0,105 | 0,089 | 129 | 482 | 11,458 | -0,032 | 0,001 | 0,134 |
| 0,105 - 0,138 | 0,122 | 107 | 589 | 13,005 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |
| 0,138 - 0,171 | 0,154 | 138 | 727 | 21,290 | 0,033 | 0,001 | 0,152 |
| 0,171 - 0,203 | 0,187 | 67 | 794 | 12,529 | 0,066 | 0,004 | 0,292 |
| 0,203 - 0,236 | 0,220 | 55 | 849 | 12,085 | 0,099 | 0,010 | 0,536 |
| 0,236 - 0,269 | 0,252 | 55 | 904 | 13,885 | 0,131 | 0,017 | 0,950 |
| 0,269 - 0,302 | 0,285 | 32 | 936 | 9,126 | 0,164 | 0,027 | 0,862 |
| 0,302 - 0,334 | 0,318 | 16 | 952 | 5,087 | 0,197 | 0,039 | 0,620 |
| 0,334 - 0,368 | 0,351 | 9 | 961 | 3,160 | 0,230 | 0,053 | 0,477 |
| Total | | 961 | | 116,319 | | | 6,342 |



Consumo Total

| Consumo Total | | Media | 0,02337698 |
|---------------|-------|------------|------------|
| Datos | 961 | Varianza | 0,00057543 |
| Maximo | 0,135 | Desviacion | 0,02 |
| Minimo | 0 | | |
| Rango | 0,135 | | |
| Intervalos | 11 | | |
| Amplitud | 0,01 | | |

| Consumo T | xi | fi | Fi | xi fi | xi - \bar{x} | (xi - \bar{x}) ² | xi - \bar{x}) ² |
|---------------|-------|------------|-----|---------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 0 - 0,012 | 0,006 | 487 | 487 | 2,988 | -0,017 | 0,000 | 0,145 |
| 0,012 - 0,025 | 0,018 | 193 | 680 | 3,553 | -0,005 | 0,000 | 0,005 |
| 0,025 - 0,037 | 0,031 | 48 | 728 | 1,473 | 0,007 | 0,000 | 0,003 |
| 0,037 - 0,049 | 0,043 | 45 | 773 | 1,933 | 0,020 | 0,000 | 0,017 |
| 0,049 - 0,061 | 0,055 | 79 | 852 | 4,363 | 0,032 | 0,001 | 0,080 |
| 0,061 - 0,074 | 0,068 | 68 | 920 | 4,590 | 0,044 | 0,002 | 0,132 |
| 0,074 - 0,086 | 0,080 | 25 | 945 | 1,994 | 0,056 | 0,003 | 0,080 |
| 0,086 - 0,098 | 0,092 | 10 | 955 | 0,920 | 0,069 | 0,005 | 0,047 |
| 0,098 - 0,11 | 0,104 | 5 | 960 | 0,522 | 0,081 | 0,007 | 0,033 |
| 0,11 - 0,123 | 0,117 | 0 | 960 | 0,000 | 0,093 | 0,009 | 0,000 |
| 0,123 - 0,135 | 0,129 | 1 | 961 | 0,129 | 0,106 | 0,011 | 0,011 |
| Total | | 961 | | 22,465 | | | 0,552 |

