

Análisis del mantenimiento predictivo mediante la técnica de termografía en el alimentador 5006

Cristian Ronald Callacondo Acero¹; Julio Fredy Chura Acero²; Omar Chayña Velasquez³; Walter Oswaldo Paredes Pareja⁴; José Quiñonez Choquecota⁵; Wilson Percy Clavetea Meneses⁶; Adhemir Homero Gutiérrez Gallegos⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}National University of the Altiplano Puno, Perú, ccallacondo@est.unap.edu.pe, jchura@unap.edu.pe, ochayna@unap.edu.pe, walterparedes@unap.edu.pe, josequch@unap.edu.pe, wclavetea@unap.edu.pe, agutierrez@unap.edu.pe

Resumen– El propósito de esta investigación fue analizar el estado operativo del alimentador 5006 de la Subestación Eléctrica Juliaca, mediante la aplicación de la termografía infrarroja como herramienta de mantenimiento predictivo, con el propósito de identificar puntos calientes en sus componentes y reducir el riesgo de fallas no programadas. El problema central abordado fue la ausencia de un diagnóstico térmico sistemático que permita detectar oportunamente anomalías térmicas asociadas a sobrecargas, conexiones defectuosas y deterioro de equipos, las cuales afectan la confiabilidad y continuidad del servicio. La metodología empleada se basó en la inspección termográfica en campo, bajo parámetros técnicos establecidos y aplicando la normativa NETA para la clasificación de fallas térmicas. Se evaluaron cincuenta y una estructuras de media tensión del alimentador, registrándose temperaturas ambientales, máximas y de referencia, a partir de las cuales se determinó el delta térmico y el nivel de prioridad de cada anomalía detectada. Los resultados revelaron la presencia de fallas térmicas de diversa severidad, predominando condiciones graves y moderadas, así como la identificación de puntos críticos con diferencias de temperatura superiores a cuarenta grados Celsius, que requieren intervención inmediata. Finalmente, se demostró que la termografía infrarroja constituye una herramienta eficaz para el mantenimiento predictivo, al permitir la identificación temprana de condiciones anómalas no detectables mediante inspecciones visuales convencionales, contribuyendo a decisiones técnicas oportunas y a la priorización de acciones correctivas. Asimismo, fortalece la confiabilidad operativa del alimentador y optimiza recursos de mantenimiento institucionales.

Keywords– Alimentador, Mantenimiento Predictivo, Puntos Calientes, Servicio Eléctrico, Termografía.

I. INTRODUCCIÓN

La continuidad y confiabilidad del servicio eléctrico constituyen aspectos fundamentales para el desarrollo social, económico e industrial de una región. En los sistemas de distribución eléctrica, los alimentadores de media tensión desempeñan un papel crítico, ya que cualquier falla en sus componentes puede generar interrupciones no programadas, pérdidas económicas y riesgos para la seguridad del personal y de la infraestructura. En este contexto, resulta importante implementar estrategias de mantenimiento que permitan anticipar las fallas, optimizar recursos y garantizar una operación segura y eficiente de las instalaciones eléctricas.

El mantenimiento predictivo se ha posicionado como una de las metodologías de mayor efectividad para la gestión de activos eléctricos, debido a su capacidad para evaluar el estado real de los equipos en operación y detectar condiciones anómalas antes de que evolucionen hacia fallas severas. Dentro de estas técnicas, la termografía infrarroja se destaca por ser un método no destructivo, sin contacto y de rápida aplicación, que permite identificar variaciones anormales de temperatura asociadas a sobrecargas, conexiones defectuosas, desequilibrios de fases y deterioro de materiales. Estas anomalías térmicas, comúnmente conocidas como puntos calientes, son indicadores tempranos de posibles fallas eléctricas y mecánicas.

En la Subestación Eléctrica Juliaca, específicamente en el alimentador 5006, se han presentado condiciones operativas que requieren un análisis técnico detallado, debido a la ausencia de un diagnóstico térmico sistemático que permita evaluar el estado de sus componentes y priorizar acciones de mantenimiento. Esta situación incrementa el riesgo de fallas no programadas, afecta la confiabilidad del sistema de distribución y limita la toma de decisiones oportunas basadas en información técnica objetiva.

Por ello, la presente investigación propone la aplicación de la termografía infrarroja como herramienta de mantenimiento predictivo para analizar el estado operativo del alimentador 5006 de la Subestación Eléctrica Juliaca. Mediante la identificación y clasificación de anomalías térmicas conforme a la normativa NETA, se busca proporcionar información técnica confiable que permita establecer prioridades de intervención, reducir el riesgo de fallas, optimizar los recursos de mantenimiento y fortalecer la confiabilidad y seguridad del sistema de distribución eléctrica. La investigación aporta además un soporte técnico-metodológico que puede ser replicado en otros alimentadores y subestaciones con características similares, contribuyendo a la mejora continua de la gestión del mantenimiento en sistemas eléctricos de potencia.

II. MARCO TEÓRICO

A. Generalidades del mantenimiento

El mantenimiento es tan antiguo como la existencia de la humanidad, se sabe que el hombre desde sus principios practicaba el mantenimiento, aunque no de forma lógica y ordenada, posteriormente, con la creación de los talleres se inició con el mantenimiento reparativo y correctivo, el cual tomó mayor importancia durante la segunda guerra mundial donde se tuvo la necesidad de implantar técnicas para prevenir las fallas de los equipos, es así que se estableció el mantenimiento preventivo como una actividad paralela al control de calidad y la producción. La importancia del mantenimiento nace porque todo equipo se deteriora por diversas causas: desgaste normal, por operación y condiciones físicas como temperatura, presión o vibraciones; desgaste anormal, por mala operación, descuido o sobrecarga y deterioro accidental, por causas imprevisibles como accidentes o fenómenos naturales [1].

El mantenimiento abarca todas las actividades realizadas de manera organizada para conservar los equipos, herramientas e instalaciones de una empresa en condiciones seguras, efectivas y económicas. Su importancia crece con el avance tecnológico, ya que las instalaciones modernas son más complejas y su paralización genera grandes pérdidas económicas. El mantenimiento asegura la continuidad operativa del sistema productivo, protege las inversiones y garantiza la calidad y seguridad del servicio, siendo más costoso no mantener un equipo que hacerlo adecuadamente. El objetivo general del mantenimiento es preservar los activos del sistema productivo en condiciones óptimas de operación, costos compatibles y con el mejor rendimiento. Para ello, se busca mantener los equipos en buenas condiciones operacionales, asegurar un funcionamiento seguro durante la mayor parte del tiempo, optimizar el desempeño del talento humano y minimizar los costos de producción. Todo plan de mantenimiento debe incluir objetivos claros, sistemas de planeación y control, una adecuada gestión de recursos y un sistema informativo eficiente, impulsando además la conciencia organizacional sobre los beneficios del mantenimiento en la seguridad, la productividad y la protección del medio ambiente [1].

B. Tipos de mantenimiento

El autor [1], asegura que en el mantenimiento industrial solo existen dos formas o tipos de hacer mantenimiento:

1) Mantenimiento Reactivo: Son las actividades que se realizan cuando por una falla, se requiere recuperar la función principal de los sistemas, equipos, máquinas e instalaciones, son acciones correctivas. Existen varias formas de mantenimiento reactivo, por ejemplo, las más comunes son el mantenimiento reparativo, mantenimiento de emergencia, mantenimiento correctivo y mantenimiento reconstructivo.

2) Mantenimiento Proactivo: Es lo opuesto al mantenimiento reactivo ya que se anticipan a la ocurrencia de las fallas, son acciones preventivas y predictivas que a través de inspecciones se realizan para prevenir fallas. Entre las diferentes formas de mantenimiento proactivo destacan el mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, mantenimiento detectivo, y mantenimiento mejorativo.

Dentro de todas las metodologías existentes, sobresalen tres, las cuales se han establecido como los sistemas básicos de hacer mantenimiento:

- Mantenimiento Correctivo: El mantenimiento correctivo comprende todas las acciones destinadas a reparar equipos, máquinas o instalaciones después de que han fallado y dejado de prestar el servicio para el que fueron diseñados. Su finalidad es restablecer de manera inmediata la operación, por lo que sus intervenciones no pueden programarse y se gestionan normalmente mediante reportes de emergencia como “máquina fuera de servicio”. Aunque suele considerarse el tipo de mantenimiento más sencillo porque no requiere planificación previa, en la práctica demanda un esfuerzo significativo, muchas veces en horarios no habituales, y puede generar tiempos de parada y pérdidas de producción elevadas.
- Mantenimiento Preventivo: consiste en ejecutar actividades programadas en equipos que aún están en funcionamiento, con el objetivo de asegurar su operación eficiente, económica y segura, evitando fallas y paros imprevistos. Incluye dos acciones fundamentales: inspecciones periódicas para detectar condiciones que puedan provocar fallas y la conservación o reparación temprana de los componentes que muestran deterioro incipiente. Su implementación requiere la participación de todos los niveles de la organización, así como un conocimiento profundo del sistema productivo, sus equipos y la metodología del programa. Este tipo de mantenimiento debe aplicarse de manera gradual, etapa por etapa, asegurando que las tareas programadas se realicen con rigor y honestidad.
- Mantenimiento Predictivo: También conocido como Mantenimiento Basado en Condición, ha aumentado significativamente en las últimas décadas debido al avance tecnológico, la necesidad de minimizar paros no productivos y el alto costo de los equipos modernos. Este enfoque consiste en detectar fallas antes de que ocurran, sin detener la operación, mediante el uso de equipos de diagnóstico y ensayos no destructivos. Entre

las técnicas más empleadas están el análisis de vibraciones, la termografía infrarroja, el ultrasonido, los análisis de lubricantes, entre otros. Su fundamento es que un equipo en buenas condiciones no debe ser intervenido innecesariamente, y que los síntomas permiten anticipar fallas.

C. Termografía

La termografía es un método no invasivo que permite identificar y analizar los patrones de calor emitidos por un cuerpo u objeto, haciendo visible la radiación infrarroja que el ojo humano no puede percibir. Este procedimiento de medición sin contacto posibilita registrar temperaturas en puntos o superficies, facilitando la detección de pérdidas térmicas, fuentes de calor y posibles anomalías en máquinas, estructuras o edificaciones. La precisión del termograma depende del grado de emisión del material analizado y, actualmente, existen dos sistemas principales para medir la temperatura mediante esta técnica [2].

D. Termografía infrarroja

Dentro del mantenimiento eléctrico e industrial, el análisis termográfico es un elemento fundamental para el mantenimiento de los componentes de un sistema, es así que, la cámara infrarroja (IR) se emplea en el mantenimiento predictivo, desde sistemas eléctricos, mecánicos, en procesos industriales, en la medicina, en veterinaria, así como la predicción de defectos internos en materiales. A pesar de los altos costos de los equipos de infrarrojo, éstos poseen mayor alcance que los equipos empleados en las técnicas de ultrasonido y radiografía. [3]

La termografía es una herramienta basada en el estudio de la temperatura de las instalaciones y equipos de una empresa sin interrumpir su ciclo de producción. Todos los objetos tienen una información térmica, imperceptible a simple vista pero que se pone de manifiesto mediante las cámaras termográficas. [4]

Los autores [5], afirman que la termografía infrarroja, aunque no es una tecnología reciente, ha tenido un notable crecimiento debido a que permite realizar mediciones de temperatura sin contacto, basadas en la radiación térmica, y gracias al desarrollo de equipos portátiles, económicos y fáciles de usar. Según la norma ASTM E1316, esta técnica consiste en representar la temperatura real o sus variaciones sobre la superficie de un objeto mediante la detección de radiación infrarroja, generando un termograma que muestra la distribución térmica de todos los componentes del sistema. Su gran ventaja es que puede aplicarse a distancia, en equipos en funcionamiento y en entornos peligrosos, sin interrumpir la producción.

Además, puede emplearse mediante dos métodos: técnica activa y técnica pasiva, la termografía activa requiere una fuente externa de energía que genere un flujo de calor en el objeto, permitiendo detectar defectos internos a través de patrones anómalos de temperatura en su superficie; mientras que la termografía pasiva aprovecha el calor que el propio objeto produce o disipa durante su funcionamiento, de modo que las variaciones térmicas naturales revelan posibles irregularidades sin necesidad de una estimulación adicional.

E. Principio de la termografía

El principio de la termografía infrarroja se basa en la radiación térmica que todos los cuerpos emiten cuando su temperatura es mayor al cero absoluto.

Todos los cuerpos cuya temperatura es superior al cero absoluto (0 K o -273°C) emiten radiación térmica, aunque esta no puede ser percibida por el ojo humano. La intensidad de dicha radiación se encuentra directamente relacionada con la temperatura del objeto y puede ser cuantificada mediante la ley fundamental de emisión térmica, expresada por la ecuación 1. [4]

$$E = \varepsilon \sigma T_e^4 \quad (1)$$

Donde:

E: Emisividad

σ : Constante de Stefan Boltzmann

T_e^4 : Temperatura del objeto medida en K

A medida que la temperatura de un cuerpo aumenta, también lo hace la intensidad de la radiación infrarroja que emite. Las leyes físicas que sustentan este principio son:

- Ley de Planck: Describe la distribución espectral de la radiación emitida por un cuerpo.
- Ley de Stefan-Boltzmann: Establece que la energía total emitida por unidad de superficie es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta.
- Ley de desplazamiento de Wien: Indica que la longitud de onda de máxima emisión se desplaza hacia el infrarrojo cuando la temperatura aumenta.

Una cámara termográfica utiliza sensores especializados (micro bolómetros u otros detectores IR) que registran la radiación emitida por las superficies del objeto. Estos sensores transforman la energía infrarroja en señales eléctricas. Posteriormente, las señales captadas son procesadas digitalmente para producir una imagen térmica o termograma, en la cual cada color representa un intervalo de temperatura. Esto permite visualizar diferencias térmicas mínimas que pueden indicar condiciones anómalas, defectos o fallas

incipientes. Es así que, la lectura del termograma nos permite identificar:

- Zonas de sobrecalentamiento
- Áreas con pérdidas de energía
- Fallas eléctricas o mecánicas
- Anomalías estructurales, entre otros.

En conclusión, la energía térmica emitida por un objeto permite determinar la temperatura que posee, dado que un cuerpo a mayor temperatura libera una cantidad superior de radiación infrarroja. Aunque esta radiación no es perceptible para el ojo humano, los avances tecnológicos han permitido desarrollar equipos capaces de captarla y convertirla en imágenes visibles, facilitando así la evaluación térmica de diferentes objetos [4].

F. Elementos de un sistema de termografía

Una de las cualidades más destacadas de los sistemas termográficos es su capacidad para medir la temperatura a distancia; para lograrlo, los sensores recopilan todos los datos necesarios y luego estos son procesados digitalmente mediante algoritmos que generan la imagen térmica final. [5]

A partir de este funcionamiento, se identifican tres componentes esenciales en un sistema termográfico:

- Fuente de radiación u objeto, que incluye tanto el elemento principal a evaluar como todo lo que se encuentra dentro del campo de visión del sensor.
- Trayectoria de transmisión, es decir, el medio por el cual se desplazan las ondas electromagnéticas determinando las bandas del espectro que pueden transmitirse.
- Sensor y subsistema de procesamiento, que constituyen la parte clave del sistema, ya que la calidad de los resultados depende en gran medida de su selección. En el mantenimiento predictivo, las cámaras infrarrojas son las más utilizadas por las múltiples ventajas que ofrecen.

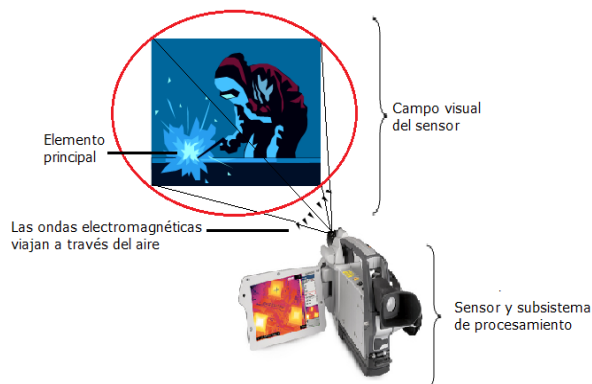


Fig. 1 Elementos de un sistema de termografía. Tomado de [5]. Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo (p. 85)

G. Componentes de una cámara termográfica

El funcionamiento de una cámara termográfica se basa en captar la radiación infrarroja que emite un objeto, transformarla en señales eléctricas y procesarlas digitalmente para generar una imagen térmica visible en pantalla. Este principio permite realizar mediciones de temperatura sin contacto, facilitando el monitoreo térmico y la identificación de anomalías. Estructuralmente, una cámara termográfica integra tres componentes esenciales:

- Receptor óptico, conformado por el lente, el diafragma y los filtros, que permiten la entrada, regulación y selección de la radiación infrarroja. Los lentes, fabricados con materiales como silicio o germanio, están diseñados para transmitir radiación IR, mientras que el diafragma controla la cantidad de energía que ingresa y los filtros eliminan longitudes de onda no deseadas.
- Detector infrarrojo, generalmente un micro bolómetro, convierte la radiación en señales eléctricas mediante variaciones de resistencia provocadas por cambios térmicos.
- Microprocesador y la electrónica de control, procesan y calibran estas señales usando referencias internas de cuerpos negros, garantizando una medición precisa y estable.

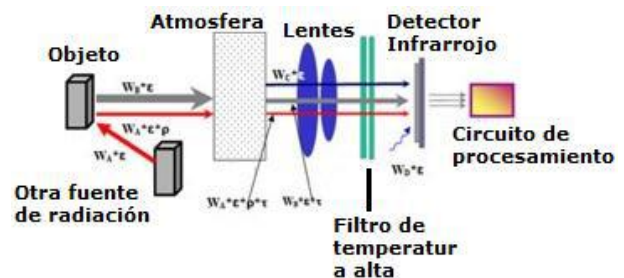


Fig. 2 Partes de una cámara termográfica. Tomado de [4]. Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo (p. 92)

H. Métodos de inspección termográfica

1). Inspección termográfica cualitativa

Corresponden a imágenes termográficas en las que se emplea una escala de colores para representar diferentes rangos de temperatura, lo que permite identificar visualmente los puntos de mayor calentamiento y evaluar la uniformidad térmica del equipo analizado [4].

En la Figura 3 se muestran los termogramas de dos fases de un transformador. En base a la inspección cualitativa se determina que la fase derecha presenta un punto caliente y un gradiente anómalo, mientras que la fase izquierda opera de manera normal.

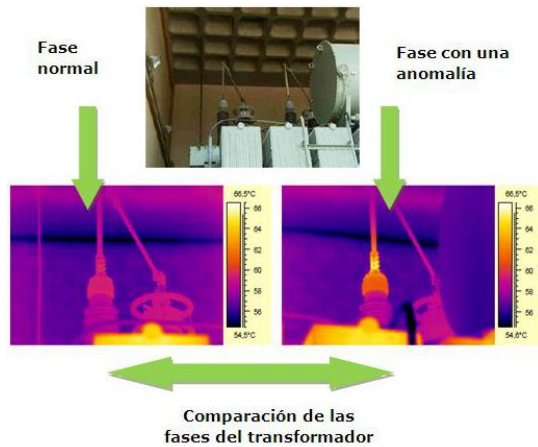


Fig. 3 Termograma analizado con el método cualitativo. Tomado de [5]. Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo (p. 112)

2). Inspección termográfica cuantitativa

Son mediciones precisas de temperatura en los puntos calientes, utilizadas para evaluar la severidad de una anomalía y definir la acción correctiva necesaria para que el equipo retorne a condiciones normales de operación. [4]

En la figura 4 se comparan las temperaturas de cada fase y se observa una diferencia de 6 °C., esto plantea interrogantes sobre la gravedad de la anomalía y la necesidad de reparación. Para tomar decisiones adecuadas, es imprescindible definir criterios de clasificación de fallas.

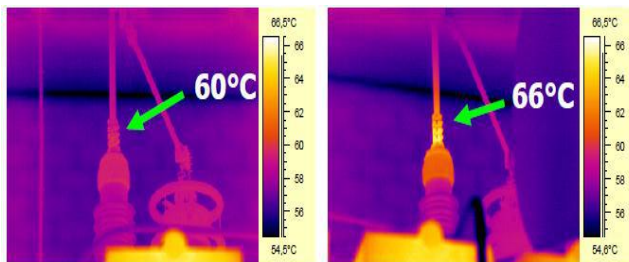


Fig. 4 Termograma analizado con el método cuantitativo. Tomado de [5]. Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo (p. 113)

3). Clasificación de fallas

En la práctica actual, se dispone de diversos criterios emitidos tanto por asociaciones especializadas como por la propia experiencia del termógrafo. Dichos criterios consideran la diferencia térmica observada como parámetro fundamental para evaluar la severidad de una anomalía. En uno de los capítulos de la norma Acceptance Testing Specifications for Power Distribution Equipment and Systems Electric publicada por NETA (International Electric Testing Association), se abordan específicamente las inspecciones eléctricas mediante

termografía infrarroja y se describen los criterios aplicables para su evaluación.

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE FALLAS SEGÚN LAS DIFERENCIAS DE TEMPERATURA SEGÚN NETA

Diferencia de temperatura (ΔT) en base a las comparaciones entre los componentes y el aire ambiente	Diferencia de temperatura (ΔT) en base a las comparaciones entre similares componentes bajo cargas similares	Clasificación	Acción
1°C – 10°C O/A	1°C a 3°C O/S	Posible deficiencia	La deficiencia posible; investigación de órdenes
11°C – 20°C O/A	4°C a 15°C O/S	Probable deficiencia	Indica probable deficiencia; la reparación como el tiempo lo permite
21°C – 40°C O/A	-	Deficiencia	Monitorear hasta que las medidas correctivas se puedan realizar
>40°C O/A	>15°C O/S	Deficiencia mayor	Discrepancia importante: REPARAR INMEDIATAMENTE

Nota. Elaborado en base a [7].

III. METODOLOGÍA

A. Lugar de Estudio

El proyecto se localizará en la ciudad de Juliaca, capital de la provincia de San Román, ubicada en el departamento de Puno al sureste de Perú, es la ciudad más grande y poblada del departamento y el principal eje comercial y vial de esta región.

- Latitud y Longitud: Aprox. 15.4997° S de latitud y 70.1333° W de longitud.
- Altitud: Aproximadamente 3,825 metros sobre el nivel del mar.
- Proximidad a otros lugares: La ciudad se encuentra a unos 44 kilómetros al norte de la ciudad de Puno, cuya ciudad está ubicada a orillas del Lago Titicaca.
- Acceso: La ciudad tiene acceso por carretera, además tiene conexiones ferroviarias, y su aeropuerto facilita el acceso aéreo nacional e internacional.

B. Población

El trabajo de investigación tendrá como unidad de análisis al alimentador 5006, perteneciente a la Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad de Puno S.A.A., el cual está conformado por componentes como empalmes, seccionadores, aisladores, conexiones y equipos de protección, que suman 61 puntos de conexión, los cuales son aptos para ser evaluados mediante la técnica de termografía infrarroja.

C. Muestra

Se determinó una muestra de 51 puntos de conexión, las cuales fueron seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional. La selección se realizó considerando criterios técnicos como la accesibilidad física de las estructuras, su estado operativo durante el periodo de inspección, la seguridad para la toma de mediciones termográficas y su representatividad dentro del alimentador.

D. Características metodológicas

1). Enfoque de investigación

El enfoque que se adoptó fue cuantitativo, dado que se trabajó con datos medibles relacionados con temperaturas registradas, número de fallas detectadas, frecuencia de anomalías, entre otros. Este enfoque nos permitió analizar objetivamente los resultados obtenidos a través de herramientas estadísticas y tecnológicas, proporcionando una base sólida para la interpretación de los fenómenos observados [8].

2). Nivel de investigación

El estudio es de nivel descriptivo y explicativo, descriptivo porque caracteriza el estado térmico de los componentes del alimentador 5006; y explicativo debido a que analiza las causas de las anomalías térmicas encontradas, asimismo, propone medidas correctivas.

3). Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que busca resolver un problema práctico mediante la utilización de herramientas tecnológicas, en este caso, se plantea utilizar la termografía infrarroja como técnica de mantenimiento predictivo. Este tipo de investigación tiene como finalidad generar conocimientos orientados a la solución de problemas concretos, mejorando la confiabilidad del alimentador 5006 que abastece cinco zonas de la ciudad de Juliaca [9].

4). Diseño de investigación

Se empleó un diseño no experimental de tipo transeccional descriptivo y explicativo. Esto implica que las variables no fueron manipuladas deliberadamente, sino que se observaron tal como se presentan en su contexto natural. Además, las mediciones se realizaron en un único momento, describiendo el estado térmico del sistema y explicando las causas de posibles fallas relacionadas con el mal estado de los componentes eléctricos [9].

E. Recolección de datos

1). Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para la ejecución de la presente investigación se emplearon y revisaron los siguientes materiales y equipos, los cuales son necesarios para lograr los objetivos planteados:

- Observación y análisis documental
- Revisión de normativas técnicas vigentes
- Cámara termográfica infrarroja EasIR™-9, correctamente calibrada.

Para la obtención de información sobre el registro de interrupciones en la ciudad de Juliaca se acudirá a la empresa Electro Puno S.A.A., y para la toma de imágenes con la cámara termográfica se irá al alimentador 5006 de la ciudad de Juliaca.

2). Procedimiento de recolección de datos

El proceso de recolección de datos se fundamenta en la selección y el análisis de información documental y de campo, obtenida a partir de las siguientes fuentes:

- Demanda de energía eléctrica del alimentador 5006, las características técnicas obtenidas mediante el filtrado de la base de datos del software ArcGIS 10.5, así como los registros de interrupciones del servicio eléctrico en la ciudad de Juliaca.
- Captura de imágenes térmicas (termogramas) del alimentador 5006 de Juliaca, utilizando una cámara termográfica EasIR™-9.
- Se complementará el estudio con la búsqueda y revisión de información especializada, a través de libros, artículos científicos, tesis de grado, catálogos técnicos y páginas web.

3). Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

Para procesar y analizar los datos se utilizaron las siguientes herramientas informáticas que nos ayudaron en su organización y clasificación:

- Cámara termográfica EasIR™-9
- Microsoft Office Excel
- Microsoft office Word
- Software ArcGIS 10.5
- Google Earth

IV. RESULTADOS

La selección del alimentador se hizo en base al registro de reclamos registrados en el sistema SIELSE – Modulo Proc 094 del servicio eléctrico Juliaca, donde se pudo observar que el alimentador 5006 tuvo una alta cantidad de reclamos por falta de servicio en toda la zona.

Las mediciones termográficas se realizaron para 51 estructuras del alimentador 5006 de la ciudad de Juliaca, las cuales fueron seleccionadas mediante el muestreo no probabilístico, la evaluación se realizó utilizando la cámara termográfica EasIR™-9. En la tabla 3 se muestra un resumen de los resultados del reporte de diagnóstico obtenido al medir los puntos de conexión del alimentador 5006.

TABLE II
RESUMEN DE LOS RESULTADOS SEGÚN LOS REPORTES DE DIAGNÓSTICO

Ítem	Código Estructura a MT	Material de Soporte	Latitud	Longitud	Temperaturas				Prioridad
					T amb °C	T max °C	T ref °C	ΔT (°C)	
1	NMT000 027384	Concreto	-15.508187	-70.120919	10	19.4	16.4	3	Leve
2	NMT000 027380	Concreto	-15.509638	-70.12467	10	38.2	10	28.2	Grave
3	NMT000 027379	Concreto	-15.509695	-70.126062	10	29.4	19	10.4	Moderada
4	NMT000 027377	Concreto	-15.50987	-70.125888	10	33.8	10	23.8	Grave
5	NMT000 027326	Concreto	-15.508598	-70.126487	10	30.2	10	20.2	Moderada
6	NMT000 041306	Concreto	-15.508579	-70.128425	10	33.7	10	23.7	Grave
7	NMT000 038442	Concreto	-15.508442	-70.128573	10	35.3	12.9	22.4	Grave
8	NMT000 041307	Concreto	-15.506367	-70.127336	10	32.5	10	22.5	Grave
9	NMT000 027319	Concreto	-15.506067	-70.127477	10	29.7	23.2	6.5	Leve
10	NMT000 041311	Concreto	-15.50532	-70.127779	10	35.4	13.1	22.3	Grave
11	NMT000 041312	Concreto	-15.505247	-70.127793	9	27.4	9	18.4	Moderada
12	NMT000 027315	Concreto	-15.503229	-70.12858	9	47.8	9	38.8	Grave
13	NMT000 038608	Concreto	-15.503422	-70.129287	9	29.4	19	10.4	Moderada
14	NMT000 038610	Concreto	-15.500863	-70.130369	9	36.8	9	27.8	Grave
15	NMT000 038613	Concreto	-15.500863	-70.130369	9	36	9	27	Grave
16	NMT000 038612	Concreto	-15.501252	-70.131513	9	35.5	9	26.5	Grave
17	NMT000 529488	Concreto	-15.501126	-70.131416	9	31.1	17.4	13.7	Moderada
18	NMT000 027314	Concreto	-15.499618	-70.132296	9	115	11.9	103.1	Critico
19	NMT000 027082	Concreto	-15.499675	-70.132526	9	29.7	9	20.7	Moderada
20	NMT000 027132	Concreto	-15.500546	-70.134193	9	35.8	9	26.8	Grave
21	NMT000 038117	Concreto	-15.50137	-70.133849	9	31.1	10	21.1	Grave
22	NMT000 027306	Concreto	-15.501886	-70.133389	9	37.3	10	27.3	Grave
23	NMT000 027305	Concreto	-15.502397	-70.13314	9	27.4	18.4	9	Leve
24	NMT000 070029	Concreto	-15.502735	-70.133537	10	35.6	11.1	24.5	Grave
25	NMT000 078791	Concreto	-15.503232	-70.134962	9	36.3	9	27.3	Grave
26	NMT000 119094	Concreto	-15.499085	-70.132628	10	34.6	10	24.6	Grave
27	NMT000 078789	Concreto	-15.499073	-70.132561	10	25.2	10	15.2	Moderada
28	NMT001 304405	Concreto	-15.4987	-70.132829	10	36.3	10	26.3	Grave
29	NMT000 027290	Concreto	-15.498354	-70.133072	10	34.6	10	24.6	Grave
30	NMT000 027289	Concreto	-15.498298	-70.133098	10	35.6	11.1	24.5	Grave

Ítem	Código Estructura a MT	Material de Soporte	Latitud	Longitud	Temperaturas				Prioridad
					T amb °C	T max °C	T ref °C	ΔT (°C)	
31	NMT000 027285	Concreto	-15.498408	-70.133263	10	30.5	10	20.5	Moderada
32	NMT000 027131	Concreto	-15.499437	-70.135535	10	51.8	10.8	41	Critico
33	NMT000 150791	Concreto	-15.49932	-70.13561	10	34.3	34.2	0.1	Leve
34	NMT000 165993	Concreto	-15.497959	-70.133304	10	31.3	10	21.3	Grave
35	NMT000 038550	Concreto	-15.497876	-70.133288	10	35.6	10	25.6	Grave
36	NMT000 038551	Concreto	-15.496708	-70.134065	10	34.2	10	24.2	Grave
37	NMT000 027268	Concreto	-15.496712	-70.133979	10	32.9	10	22.9	Grave
38	NMT000 035024	Concreto	-15.495818	-70.134644	10	36.8	10	26.8	Grave
39	NMT000 027194	Concreto	-15.495714	-70.134747	10	33.2	10	23.2	Grave
40	NMT000 027265	Concreto	-15.494549	-70.134503	10	34	10	24	Grave
41	NMT000 027158	Concreto	-15.494207	-70.138016	10	33.6	10	23.6	Grave
42	NMT000 027096	Concreto	-15.494043	-70.137996	10	27.2	17.4	9.8	Leve
43	NMT000 146781	Concreto	-15.494413	-70.140589	10	37.5	10	27.5	Grave
44	NMT000 027259	Concreto	-15.495985	-70.142016	10	34.1	10	24.1	Grave
45	NMT000 027237	Concreto	-15.496985	-70.143933	10	33.9	10	23.9	Grave
46	NMT000 150805	Concreto	-15.498322	-70.146809	10	35.4	10	25.4	Grave
47	NMT000 027119	Concreto	-15.498035	-70.146681	10	27.2	17.4	9.8	Leve
48	NMT000 027211	Concreto	-15.498135	-70.146914	10	29.4	9.3	20.1	Moderada
49	NMT000 027209	Concreto	-15.500046	-70.151604	10	36.6	10	26.6	Grave
50	NMT000 579119	Concreto	-15.50045	-70.152595	10	35.1	10	25.1	Grave
51	NMT000 116297	Concreto	-15.501139	-70.154523	10	50.1	10	40.1	Grave

Nota. Elaboración propia en base a los datos obtenidos de la inspección termográfica de los puntos de conexión del alimentador 5006

La Tabla 2 presenta los resultados de la inspección termográfica infrarroja realizada a 51 puntos de conexión de las estructuras de media tensión del alimentador 5006 de la Subestación Eléctrica Juliaca. Todas las estructuras evaluadas corresponden a soportes de concreto, lo que permite homogeneidad en la comparación térmica y reduce variaciones asociadas al material estructural.

Las mediciones fueron realizadas considerando la temperatura ambiente (Tamb), la temperatura máxima registrada (Tmax), la temperatura de referencia (Tref) y el diferencial térmico (ΔT), parámetro fundamental para la clasificación de severidad térmica conforme a los criterios

establecidos por NETA. Del total de 51 puntos de conexión de estructuras de media tensión evaluadas en el alimentador 5006 de la S.E. Juliaca, se realizó un resumen estadístico de la distribución de severidad térmica que se muestra a continuación:

TABLE III
RESUMEN ESTADÍSTICO POR SEVERIDAD TÉRMICA

Severidad térmica	Número de Estructuras	Porcentaje (%)
Leve	6	11.76 %
Moderada	9	17.65 %
Grave	34	66.67 %
Crítica	2	3.92 %
Total	51	100 %

Nota. Elaboración propia en base a los datos obtenidos de la inspección termográfica de los puntos de conexión del alimentador 5006

El análisis estadístico evidencia que:

- El 3.92 % correspondiente a condición crítica confirma la existencia de riesgo elevado de falla inminente, justificando acciones inmediatas de mantenimiento para evitar interrupciones del servicio o daños mayores.
- La condición grave, con un 66.67 %, es claramente predominante, lo que indica la presencia de sobrecalentamientos significativos asociados a fallas activas como conexiones defectuosas, incremento de resistencia eléctrica o sobrecargas operativas.
- El 17.65 % en condición moderada representa fallas incipientes que, de no ser atendidas oportunamente, podrían evolucionar hacia estados de mayor severidad.
- Solo el 11.76 % de las estructuras se encuentran en condición leve, consideradas dentro de un comportamiento térmico aceptable, aunque sujetas a seguimiento.

Primero, durante la ejecución del trabajo de campo se establecieron y aplicaron parámetros técnicos definidos, tales como: inspección en horario nocturno (18:00 a 21:00 h), registro de temperatura ambiente, temperatura máxima y temperatura de referencia, así como el cálculo de la diferencia térmica (ΔT). Asimismo, se adoptaron los criterios de severidad térmica de la normativa NETA, permitiendo clasificar las anomalías en niveles leve, moderado, grave y crítico. La aplicación consistente de estos parámetros garantizó la confiabilidad de las mediciones y la comparabilidad de los resultados obtenidos en todas las estructuras evaluadas.

Segundo, la inspección termográfica permitió identificar fallas térmicas en un número significativo de estructuras del alimentador. De las 51 estructuras analizadas, se detectaron 34

en condición grave y 2 en condición crítica, asociadas principalmente a sobrecalentamientos anómalos en componentes eléctricos. Destacan estructuras con diferencias térmicas superiores a 40 °C, e incluso un caso con ΔT mayor a 100 °C, lo que evidencia fallas severas que podrían derivar en interrupciones no programadas. Estos resultados confirman la efectividad de la termografía infrarroja para detectar fallas que no son visibles mediante inspección convencional.

Tercero, a partir de la clasificación de severidad obtenida, se establecieron prioridades de intervención para cada estructura evaluada. Las anomalías clasificadas como críticas requieren atención inmediata, incluyendo revisión de conexiones, redistribución de cargas o reemplazo de componentes deteriorados. Las fallas graves deben ser programadas en el corto plazo dentro del plan de mantenimiento correctivo, mientras que las condiciones moderadas y leves requieren seguimiento y monitoreo periódico. De este modo, los resultados obtenidos permiten definir medidas de control técnicas basadas en el nivel de riesgo, optimizando recursos y fortaleciendo la confiabilidad operativa del alimentador 5006.

En general, la inspección termográfica realizada a 51 estructuras de media tensión del alimentador 5006, determinó que el estado operativo del alimentador presenta un alto nivel de compromiso térmico, evidenciado por la presencia de múltiples puntos calientes en componentes eléctricos críticos. Los resultados muestran que el 66,67 % de las estructuras evaluadas presentan condición grave y el 3,92 % condición crítica, con diferencias de temperatura (ΔT) superiores a los límites recomendados por la normativa NETA. Esto confirma que el alimentador requiere acciones correctivas prioritarias y que la termografía infrarroja permitió identificar de manera precisa zonas con riesgo elevado de falla, validando su aplicación como herramienta de mantenimiento predictivo.

V. DISCUSIÓN

A partir de la inspección termográfica del alimentador 5006 de la Subestación Eléctrica Juliaca se evidenció un estado operativo con presencia significativa de anomalías térmicas de diversa severidad. Del total de 51 puntos de conexión evaluados, se identificó un predominio de condiciones clasificadas como graves, este comportamiento térmico indica la existencia de incrementos anómalos de resistencia en puntos específicos del sistema, asociados principalmente a conexiones defectuosas, deterioro de componentes conductores y posibles condiciones de sobrecarga, lo cual compromete la confiabilidad operativa del alimentador.

Desde el punto de vista técnico, los resultados obtenidos confirman lo mencionado por [2], quien afirma que la termografía permite identificar y analizar los patrones de calor

emitidos por objetos o cuerpos, facilitando la detección de pérdidas térmicas y posibles anomalías en estructuras, maquinas o edificaciones. Además, estos resultados se asemejan a los obtenidos por [10], [11] y [12], los cuales a su vez confirman la utilidad de la termografía como herramienta predictiva, recomendando aplicar este tipo de análisis en alimentadores de media tensión ya que estos demandan una supervisión continua. Asimismo, la clasificación de las anomalías según la normativa NETA permitió establecer niveles claros de severidad y prioridad de intervención, confirmando que las estructuras con mayores deltas térmicos representan un riesgo elevado de fallas no programadas. La alta proporción de fallas graves y críticas pone en evidencia la necesidad de fortalecer los programas de mantenimiento predictivo, ya que estas condiciones no siempre son detectables mediante inspecciones visuales convencionales y pueden evolucionar rápidamente hacia fallas catastróficas si no se corrigen oportunamente.

VI. CONCLUSIONES

El análisis termográfico infrarrojo aplicado al alimentador 5006 de la Subestación Juliaca permitió evaluar de manera efectiva el estado operativo de las estructuras y componentes de media tensión, identificándose un elevado número de puntos calientes que evidencian condiciones térmicas anómalas. Los resultados confirman que la termografía infrarroja es una herramienta confiable y adecuada para el mantenimiento predictivo, al facilitar la detección temprana de fallas que no son visibles mediante inspecciones convencionales.

Se estableció que parámetros como la temperatura ambiente, temperatura máxima del componente, temperatura de referencia, diferencia térmica (ΔT), emisividad del material y condiciones de carga son determinantes para una correcta interpretación de los termogramas. La adecuada consideración de estos parámetros permitió clasificar con precisión la severidad de las anomalías térmicas conforme a los criterios de la norma NETA. A partir del análisis de 51 puntos de conexión de las estructuras de media tensión, se determinó que el 70.59 % de los puntos evaluados presentan condiciones térmicas graves o críticas, lo que evidencia la presencia de fallas activas asociadas principalmente a conexiones defectuosas, envejecimiento de componentes, incremento de resistencia de contacto y posibles sobrecargas. Esta situación refleja un estado operativo comprometido del alimentador. El análisis termográfico permitió definir de manera objetiva las medidas de control necesarias, estableciendo prioridades de intervención basadas en la severidad térmica. La aplicación de estas medidas contribuye a optimizar la planificación del mantenimiento, reducir costos por fallas no programadas y mejorar la confiabilidad del sistema de distribución eléctrica.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica por la sólida formación académica recibida durante mi etapa universitaria. De manera especial, agradezco a mi asesor de tesis, por su orientación, apoyo constante, paciencia y valiosos aportes académicos que hicieron posible la realización y término del presente trabajo investigativo. Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que facilitaron la información, el apoyo técnico y los recursos necesarios para la ejecución de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] García, O. Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial: Principios Fundamentales (Ediciones de la U). Biblioteca Banco de la República, 2012.
- [2] Poma, S. Uso de la termografía en el programa de mantenimiento de la subestación de distribución esperanza – unidad administradora Chungar – Volcán. 2012, <http://hdl.handle.net/20.500.12894/2972>
- [3] Llor, W., Quiroz, L., & Llosas, Y. Análisis termográfico y su incidencia en los indicadores de mantenimiento de redes y equipos para la S/E Portoviejo #1, Unidad de Negocios Manabí. Revista Científica, 7(3), 848–876. 2021, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8229741>
- [4] Olarte, W., Botero, M., & Cañón, B. Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo [Universidad Tecnológica de Pereira]. En Scientia Et Technica (Vol. 16, Número 48). 2011.
- [5] Neita, L., & Peña, E. Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo [Universidad Pontificia Bolivariana]. 2011, <http://hdl.handle.net/20.500.11912/1561>
- [6] Meldic. (s/f). Cámara Termográfica EasIRTM-9 . Meldic Instrumentación. Recuperado el 9 de diciembre de 2025, de https://www.meldic.cl/images/pdf/areaaindustrial/termografia/ft_easir9.pdf
- [7] International Electrical Testing Association INC. Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems. 1999, <https://es.scribd.com/document/277393342/148833819-NETA-ATS-1999>
- [8] Balestrini, M. Como se elabora el Proyecto de Investigación (7a ed.). Consultores Asociados.2006.
- [9] Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. Metodología de la Investigación (6a ed.). McGraw Hill. 2014.
- [10] López-García, D., Segovia, F., Rodríguez-Rivero, J., Ramírez, J., Pérez, D., Serrano, R., & Górriz, J. M. Automatic detection of operation temperature anomalies for power electric transformers using thermal imaging. 2024, https://doi.org/10.1007/978-3-031-61137-7_22
- [11] Domínguez, D., Sánchez, G., & Cudco, J. Detección de puntos calientes en módulo de instalaciones eléctricas para el laboratorio de control. Revista Social Fronteriza, 3(5), 180–191. 2023, [https://doi.org/10.59814/resofro.2023.3\(5\)180-191](https://doi.org/10.59814/resofro.2023.3(5)180-191)
- [12] Quispe, J. Metodología de mantenimiento predictivo para el diagnóstico de motores eléctricos mediante termografía infrarroja [Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/29745>, 2020.
- [13] J. Fredy Chura Acero et al., “Thermal Monitoring of LiFePO₄ Lithium Battery System for the Use of an Electric Boat with Recharging Based on Photovoltaic Systems,” in Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2025, no. 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.1498.
- [14] N. J. Beltrán Castañón, F. Chura Acero, J. Ramos Cutipa, O. Chayña Velásquez, H. Shuta Lloclla, and E. Cruz Ticona, “A Low-Cost Wireless Monitoring System for Photovoltaic Systems: Performance Analysis and Potential Application in Direct-Current Nanogrids,” Energies, vol. 18, no. 9, 2025, doi: 10.3390/en18092279.