

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

*PROYECTO:*

*Optimización de Filtros de Armónicos mediante Enfriamiento por Inmersión con TMC-1230: Gestión Térmica y Recuperación Energética*

ÁREA DE CONOCIMIENTO:

*Área Eléctrica.*

REALIZADO POR:

*Royer Dario Rodríguez Mora.*

*II SEMESTRE 2025*



***Carrera evaluada y acreditada por:***

*Agencia de Acreditación de programas de Ingeniería y de Arquitectura.*

**Profesor Guía**

*Ing. Juan Francisco Piedra Segura*

**Asesor Industrial**

*Ing. Juan Pablo Duque Echeverri*

**Profesor Lector**

*Ing. Óscar Monge Ruiz*

**Integrante Jurado**

*Ing. Rodolfo Elizondo Hernández*

## **Datos personales.**

*Nombre completo: Royer Dario Rodríguez Mora*

*Número de cédula: 6 0455 0978*

*Número de carné: 2017000377*

*Números de teléfono: 84986774*

*Correos electrónicos: rodriguez mora@estudiantec y*

*rodriguez moraroyer@gmail.com*

*Dirección exacta de domicilio: San José, Desamparados, Frente a Megasuper en San Antonio.*

## **Datos de la empresa.**

*Nombre: Apame*

*Actividad Principal: Consultoría eléctrica y de energía.*

*Dirección: Edificios Dolmen, de la Pops de Curridabat 500 m S y 110 m O,  
Curridabat, San José.*

*Contacto: info@apamedesign.com*

*Teléfono: +506 4001 7898*

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con su esfuerzo, amor incondicional y ejemplo de perseverancia han sido el pilar fundamental en cada paso de mi formación. Gracias por brindarme la oportunidad de crecer, por la confianza que me han brindado, y por sostenerme con su apoyo incondicional durante todos estos años de formación.

A mis colegas de universidad, con quienes compartí años de aprendizaje, desafíos y logros. Más que compañeros, fueron una red de apoyo, inspiración y motivación constante. Agradezco cada conversación, cada trabajo en equipo y cada momento que hizo este camino más significativo. Este logro es también de ustedes.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la capacidad, las oportunidades y la fortaleza necesarias para avanzar a lo largo de este camino, guiándome en cada etapa hasta alcanzar este logro.

A mis padres, gracias por ser mi base y mi mayor fuente de apoyo. Por su amor, su comprensión, su paciencia infinita y por creer en mí. Gracias por brindarme las herramientas para crecer, por sus consejos, por su tiempo y por acompañarme siempre con dedicación incondicional.

Al Ing. Juan Pablo Duque, por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo en APAME, por su disposición constante, por facilitarme los recursos necesarios y por compartir conmigo su conocimiento, compromiso y guía durante todo el proceso de la práctica profesional.

Al Ing. Juan Francisco Piedra, por su tutoría, por sus aportes valiosos, su guía técnica y por los consejos que enriquecieron significativamente el desarrollo de este proyecto.

A toda mi familia, por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de estos años, por su fe en mí y por permitirme crecer tanto a nivel personal como profesional.

Y a todas las personas que de una u otra forma formaron parte de este proceso, que me acompañaron, guiaron o alentaron durante mi formación universitaria, les expreso mi más profundo agradecimiento.

## Resumen

Los corrientes y voltajes armónicos en sistemas eléctricos modernos provocan distorsiones de voltaje y contribuyen a las pérdidas de energía por calor, aumentan las pérdidas térmicas en los componentes. Este fenómeno puede causar sobrecalentamiento, disminuir la vida útil de los equipos y afectar negativamente la eficiencia energética y la estabilidad operativa de los sistemas industriales. La necesidad de una gestión térmica eficaz se vuelve crítica, especialmente ante niveles de distorsión armónica que superan los límites recomendados por normativas como IEEE 519-2014.

Este proyecto propone el uso de enfriamiento por inmersión con el fluido dieléctrico TMC-1230 como alternativa tecnológica para mejorar la disipación térmica en filtros de armónicos. Además de mitigar el sobrecalentamiento, se plantea explorar el potencial de recuperación de energía calorífica disipada, con miras a su posible aprovechamiento energético. La metodología incluyó análisis teóricos, simulaciones eléctricas en el software ETAP y una implementación experimental con una fuente térmica sumergida en TMC-1230, evaluando el comportamiento térmico y el intercambio de calor.

Los resultados permitieron validar la viabilidad técnica del sistema, identificar limitaciones y establecer bases para futuras mejoras. El proyecto contribuye al desarrollo de soluciones innovadoras en gestión térmica, promoviendo una mayor eficiencia energética, sostenibilidad y confiabilidad en sistemas eléctricos industriales expuestos a altos niveles de distorsión armónica.

## **Abstract**

Harmonic currents and voltages in modern electrical systems cause voltage distortions and contribute to energy losses due to heat, increasing thermal stress on components. This phenomenon can lead to overheating, reduced equipment lifespan, and negatively affect energy efficiency and operational stability in industrial systems. The need for effective thermal management becomes critical, especially in scenarios where harmonic distortion levels exceed the limits recommended by standards such as IEEE 519-2014.

This project proposes the use of immersion cooling with the dielectric fluid TMC-1230 as a technological alternative to improve thermal dissipation in harmonic filters. In addition to mitigating overheating, it explores the potential for recovering dissipated heat energy, aiming for its possible energetic reuse. The methodology included theoretical analysis, electrical simulations using ETAP software, and an experimental implementation with a thermal source immersed in TMC-1230, evaluating its thermal behavior and heat exchange capacity.

The results allowed for validation of the system's technical feasibility, identification of limitations, and establishment of a foundation for future improvements. The project contributes to the development of innovative thermal management solutions, promoting greater energy efficiency, sustainability, and reliability in industrial electrical systems exposed to high levels of harmonic distortion.

# Índice

Datos de la empresa.....	3
Dedicatoria .....	4
Agradecimientos .....	5
Resumen .....	6
Abstract .....	7
Introducción.....	13
Reseña de la empresa.....	14
Antecedentes: .....	15
Antecedentes Teóricos .....	15
Antecedentes Experimentales. ....	16
Establecimiento de objetivos .....	20
Alcance .....	21
Marco Teórico .....	24
1. Introducción a los armónicos y su impacto en sistemas eléctricos .....	24
2. Relevancia y necesidad de la mitigación de armónicos.....	24
3. Fuentes de calentamiento en bobinas inductivas y necesidad de refrigeración .....	25
4. Revisión de métodos de refrigeración tradicionales y sus limitaciones.....	27
5. Descripción general del TMC-1230 .....	28
6. Análisis del riesgo .....	31
7. Propiedades térmicas y aplicaciones del líquido dieléctrico TMC-1230.....	33
8. Refrigeración por inmersión con TMC-1230.....	35
9. Comparación con otros métodos y beneficios adicionales .....	37
10. Recuperación de Energía Calórica y su Aplicación en Procesos Industriales .....	38
11. Innovación, sostenibilidad e impacto del proyecto .....	41
12. Contexto técnico y tendencias complementarias .....	41
13. Limitaciones y áreas por explorar.....	42
14. Herramientas.....	43
Metodología .....	46
Análisis y Cálculos .....	46
Simulaciones .....	48
Implementación Experimental.....	48
Análisis de Resultados .....	50
Evaluación de Viabilidad .....	51
Análisis y Cálculos.....	52
Explicación del esquema experimental para las pruebas prácticas .....	57

Cálculo de la temperatura de equilibrio de las bobinas al estar sumergidas en TMC-1230 .....	62
Cálculo de la temperatura de equilibrio en las bobinas del compresor de 350 HP, sin enfriamiento líquido.....	63
Cálculo de la temperatura de equilibrio en las bobinas del compresor de 350 HP, con la implementación del enfriamiento líquido.....	67
Implementación experimental y resultados.....	72
Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del TMC-1230.....	79
Cálculo de la energía recuperada en el diseño experimental.....	82
Cálculo de la energía recuperada para los filtros de armónicos.....	83
Análisis del Impacto Térmico en la Impedancia del Filtro LC.....	86
Simulación en ETAP.....	89
Análisis de resultados.....	93
Viabilidad técnica.....	96
Conclusiones.....	100
Recomendaciones.....	101
Referencias.....	103
Apéndice.....	107
Anexos.....	109

## Índice de Figuras

Ilustración 1. Onda sin contenido armónico. (Arcila, 2010) .....	15
Ilustración 2. Onda con contenido armónico. (Arcila, 2010) .....	15
Ilustración 3. Distorsión armónica de corriente en compresores, sin filtros. ....	53
Ilustración 4. Distorsión armónica de corriente en compresores, con filtros instalados. ....	53
Ilustración 5. Comportamiento del THD V previo a la instalación del filtro.....	55
Ilustración 6. Comportamiento del THD I previo a la instalación del filtro. ....	55
Ilustración 7. Comportamiento del THD V posterior a la instalación del filtro. ....	56
Ilustración 8. Comportamiento del THD I posterior a la instalación del filtro.....	56
Ilustración 9. Bobinas Inductivas de Filtro de Armónicos. ....	66
Ilustración 10. Termografía en Bobinas Inductivas de filtro de armónicos.....	66
Ilustración 11. temperatura de equilibrio alcanzada en °C para diferentes valores de coeficiente h en W/m <sup>2</sup> ·K. ....	70
Ilustración 12. Croquis del esquema experimental. ....	71
Ilustración 13. Componentes del Modelo Experimental Para Pruebas. ....	72
Ilustración 14. Mediciones de Temperatura a la Fuente de Calor en Aire. ....	74
Ilustración 15. Temperatura de equilibrio de los bombillos al aire, para diferentes cargas. ..	75
Ilustración 16. Circuito Sumergido en TMC-1230. ....	76
Ilustración 17. Temperatura de equilibrio en contenedores primario y secundario para diferentes cargas. ....	77
Ilustración 18. Carga Sumergida Aumentada: Presencia de burbujas.....	78
Ilustración 19.....	79
Ilustración 20. Cotas Para Aproximación de Área Superficial .....	79
Ilustración 21. Diagrama Unifilar .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Ilustración 22. Filtro Para Compresor 1 en ETAP .....	91
Ilustración 23. Filtro Para Compresor 1 en ETAP .....	91
Ilustración 24. Forma de Onda .....	92
Ilustración 25. Porcentaje de THD Compresores 1 & 6.....	93
Ilustración 26. Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección vs Corriente.....	94
Ilustración 27. Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección vs Temperatura.....	95

## Índice de Tablas

Tabla 1. Desviación entre debiera y realidad.....	19
Tabla 2. Datos Eléctricos Operativos .....	52
Tabla 3. Mediciones de THD previas a la instalación de los filtros. ....	54
Tabla 4. Mediciones de THD previas a la instalación del filtro. ....	55
Tabla 5. Valores de potencia aparente, THD V y THD A previos a la instalación del filtro. ..	57
Tabla 6. Valores de potencia aparente, THD V y THD A posteriores a la instalación del filtro. .....	57
Tabla 7. Marcadores de la Imagen Principal.....	67
Tabla 8. Temperatura de equilibrio en función del coeficiente de convección.....	69
Tabla 9. Temperatura de equilibrio de los bombillos al aire, para diferentes cargas.....	75
Tabla 10. Temperatura de equilibrio en contenedores primario y secundario para diferentes cargas.....	77
Tabla 11. Coeficiente de transferencia de calor calculado para diversos valores de corriente y temperatura de equilibrio alcanzada. ....	81
Tabla 12. Perdidas por efecto Joule para diferentes valores de corriente. ....	82
Tabla 13. Potencia Recuperada .....	83
Tabla 14. Porcentaje Calculado de Energía Recuperada .....	83
Tabla 15. Tabla para Interpolación de Temperatura de Equilibrio. ....	84

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 1	59
Ecuación 2	60
Ecuación 3	60
Ecuación 4	60
Ecuación 5	61
Ecuación 6	61
Ecuación 7	63
Ecuación 8	80
Ecuación 9	81
Ecuación 10	81
Ecuación 11	85
Ecuación 12	87
Ecuación 13	88
Ecuación 14	88

## **Introducción.**

En los sistemas eléctricos modernos, la presencia de armónicos representa un desafío considerable debido a su impacto negativo en la eficiencia energética y la vida útil de los equipos. Estos armónicos, generados principalmente por cargas no lineales, distorsionan las ondas de corriente y voltaje, ocasionando pérdidas de energía, sobrecalentamiento y una disminución en la confiabilidad de los sistemas. La mitigación de estos efectos es crucial para garantizar la calidad de la energía y la estabilidad en la operación de dispositivos eléctricos, especialmente en entornos industriales donde las demandas energéticas son elevadas.

El presente proyecto analiza la viabilidad de implementar el líquido dieléctrico TMC-1230 en un filtro de armónicos, con el objetivo principal de evaluar su potencial para la recuperación de energía a través de una disipación de calor más eficiente. A diferencia de los métodos convencionales de disipación por aire, se espera que el TMC-1230 actúe como un medio de transferencia térmica que permita aprovechar el calor generado por los componentes para recuperar energía, al mismo tiempo que reduce la temperatura del sistema de manera segura,. Como objetivo secundario, este estudio busca explorar si la incorporación del TMC-1230 puede generar algún cambio positivo en el filtrado de armónicos, mejorando el rendimiento general del sistema.

Este proyecto investiga la reutilización de la energía calórica disipada, introduciendo un enfoque sostenible para aprovechar las pérdidas generadas por corrientes armónicas. La investigación se alinea con normativas de calidad de energía, como la IEEE 519-2014, y contribuye al cumplimiento de estándares industriales. Además, propone reducir costos mediante la recuperación de esta energía térmica, que de otro modo se desperdiciaría. Al abordar los desafíos técnicos relacionados con los armónicos y el sobrecalentamiento, el proyecto impulsa una innovación en la gestión energética de sistemas eléctricos.

## **Reseña de la empresa.**

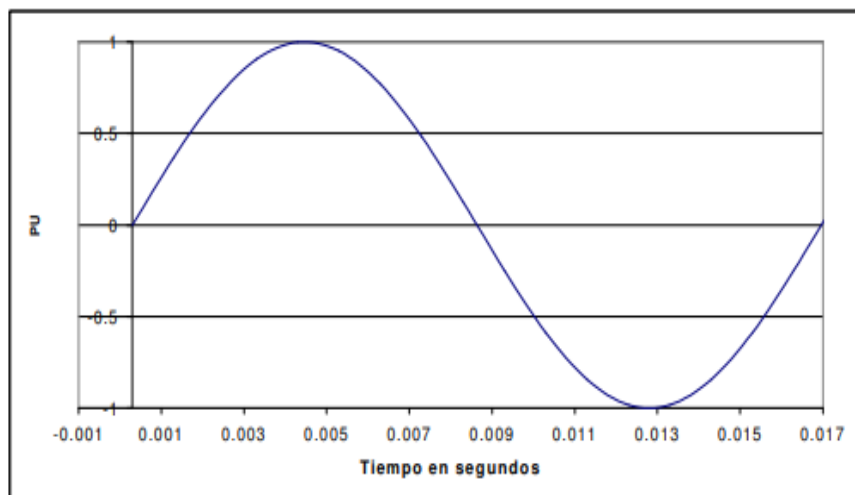
APAME es una empresa costarricense ubicada en El Prado, Curridabat, San José, 11801. Se especializa en el desarrollo de soluciones energéticas innovadoras mediante la integración de arquitectura, ingeniería electromecánica y energía, con un enfoque en generar un impacto global sostenible. La empresa se dedica al diseño y construcción de proyectos para el sector inmobiliario, ofreciendo un acompañamiento integral a sus clientes durante todo el ciclo de vida de cada proyecto, desde la conceptualización hasta la ejecución. APAME destaca por su compromiso con la eficiencia energética y la calidad de energía, promoviendo soluciones que optimicen el uso de recursos y cumplan con estándares internacionales, como la norma IEEE 519-2014 sobre control de armónicos. En este contexto, el presente proyecto se alinea con la visión de APAME al explorar la recuperación de energía calórica en sistemas eléctricos mediante el uso de líquidos dieléctricos, buscando contribuir a la sostenibilidad y la innovación tecnológica que la empresa impulsa en sus iniciativas.

## Antecedentes:

### Antecedentes Teóricos

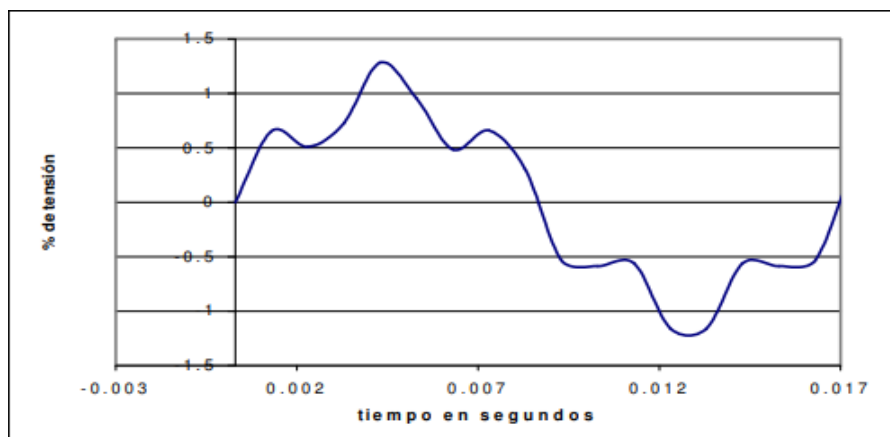
Es fundamental definir la calidad de la onda de tensión, que idealmente debe ser sinusoidal con amplitud y frecuencia constantes (e.g., 60 Hz, 1 pu), como se muestra en la Ilustración 1. Onda sin contenido armónico (Arcila, 2010).

*Ilustración 1. Onda sin contenido armónico. (Arcila, 2010)*



Cuando una onda periódica pierde su forma sinusoidal, contiene armónicos, múltiplos de la frecuencia fundamental, lo que altera su valor pico o RMS y puede afectar el funcionamiento de los equipos conectados. Este fenómeno se observa en la Ilustración 2. Onda con contenido armónico (Arcila, 2010), donde se muestra la distorsión de la onda.

*Ilustración 2. Onda con contenido armónico. (Arcila, 2010)*



Los armónicos han estado presentes en los sistemas eléctricos desde hace tiempo, pero su impacto ha aumentado debido al uso de bancos de capacitores, que pueden amplificar la distorsión armónica total (THD) por resonancia, y a los convertidores de potencia, que introducen armónicos por su comportamiento no lineal, afectando la calidad de la energía (Wakileh, 2019).

La electrónica de estado sólido ha incrementado la sensibilidad de los dispositivos a la calidad de energía, alterando las ondas sinusoidales diseñadas para sistemas convencionales (Wakileh, 2019).

Los armónicos causan fallas y pérdidas de eficiencia; la norma IEEE Std 519-2014 sugiere un THD inferior al 8%. Métodos como filtros, con reactor y capacitor en serie conectados a la carga, ayudan a mitigarlos (Daniel J, 2021).

El uso de líquidos dieléctricos como TMC-1230 ofrece una solución innovadora de enfriamiento, reduciendo la resistencia térmica y usando el calor latente de vaporización para mejorar la disipación de calor y eficiencia energética (Englert González, 2020).

### **Antecedentes Experimentales.**

Englert González expone experimentos realizados en sistemas de refrigeración por inmersión para procesadores y otros dispositivos, utilizando el líquido dieléctrico Novec 649. En el montaje experimental, dispositivos electrónicos como procesadores y resistencias se sumergen en este líquido que, al alcanzar su temperatura de ebullición de 49°C, cambia a vapor y, a través de un proceso de condensación en un recipiente sellado, se mantiene dentro del sistema sin pérdidas. La experimentación muestra que la temperatura de los dispositivos puede mantenerse estable sin alcanzar el punto crítico de sobrecalentamiento, permitiendo su operación continua y confiable. Además, los ensayos comparativos con la refrigeración por aire revelan que el uso de Novec 649 mejora significativamente la eficiencia térmica del sistema y minimiza las fluctuaciones de temperatura, lo que previene la activación de

mecanismos de protección térmica en los procesadores, maximizando así su rendimiento. (Englert González, 2020).

Asimismo, como otro caso experimental relevante para este proyecto, el documento técnico de 3M sobre refrigeración por inmersión proporciona una base sólida sobre la efectividad de los fluidos Novec para la disipación de calor en centros de datos, un principio que inspira el uso del líquido dieléctrico TMC-1230 en nuestro sistema de enfriamiento para filtros de corrientes armónicas. Estos líquidos dieléctricos, al igual que el TMC-1230, ofrecen un medio de transferencia de calor altamente eficiente y seguro para componentes electrónicos sumergidos, eliminando riesgos de cortocircuitos. La optimización de la transferencia térmica sin necesidad de ventiladores o sistemas complejos de enfriamiento, como se observa con los fluidos Novec, es un enfoque que se replica en nuestro diseño, mejorando significativamente la eficiencia energética y reduciendo la infraestructura de enfriamiento requerida, un aspecto clave para la estabilidad operativa de los filtros de armónicos en sistemas eléctricos industriales.

Los fluidos Novec se utilizan en configuraciones de inmersión de fase simple o doble; en la refrigeración de fase doble, el fluido se convierte en vapor al absorber calor y luego se condensa, facilitando una transferencia de calor mucho mayor, un mecanismo similar al que empleamos con el TMC-1230 para aprovechar su calor latente de vaporización y mantener temperaturas estables en los componentes del filtro. Este sistema también ha demostrado beneficios ambientales al evitar el uso de agua para enfriamiento y reducir el impacto ambiental, un objetivo que nuestro proyecto comparte al buscar soluciones sostenibles mediante la recuperación de energía térmica disipada (Electronics Materials, 2020). Planteamiento del problema.

En los sistemas eléctricos modernos, los armónicos generados por cargas no lineales, como inversores, rectificadores y equipos electrónicos de potencia representan un desafío crítico al incrementar las pérdidas energéticas y el calor en los componentes, además del daño de quipos eléctricos. En los filtros de armónicos, las distorsiones armónicas aumentan las pérdidas por efecto Joule ( $P = I^2 * R$ ) y las pérdidas magnéticas (histéresis y corrientes parásitas) en elementos inductivos, elevando las temperaturas de las bobinas a niveles que comprometen su durabilidad

y la estabilidad operativa del sistema. Por ejemplo, Sixel et al. (s.f.) reportan temperaturas de hasta 171 °C en inductores sin refrigeración líquida, lo que puede reflejarse en un deterioro acelerado de los componentes y pérdidas económicas para las empresas. Además, muchos sistemas industriales presentan una distorsión armónica total (THD V) superior al 10% o 15%, excediendo el límite recomendado del 8% por la norma IEEE 519-2014, lo que resulta en mayores costos operativos y un aumento en el consumo energético (Carnovale et al., 2021; Mahela et al., 2021). La gestión térmica efectiva se vuelve crucial para mitigar estos efectos y garantizar la confiabilidad de los sistemas eléctricos.

La relevancia técnica de este proyecto radica en explorar la optimización de filtros de armónicos mediante tecnologías avanzadas de gestión térmica, utilizando el líquido dieléctrico TMC-1230, seleccionado tras la discontinuación del Novec-1230 por 3M. Con un punto de ebullición de 49.2 °C y un calor latente de vaporización de 88 kJ/kg, se plantea la hipótesis de que el TMC-1230 podría mejorar la disipación de calor en los filtros, reduciendo las temperaturas de los componentes y facilitando la recuperación de energía calórica para su reutilización. Esta investigación parte de la observación de los desafíos térmicos asociados al calor generado por los armónicos y busca responder si un sistema de enfriamiento por inmersión con un medio dieléctrico puede optimizar la estabilidad térmica y la eficiencia energética global. Además, se explora si esta tecnología pudiera influir positivamente en el desempeño del filtrado, evaluando variables clave como la temperatura de los componentes y el THD, afectados por factores como el efecto piel, la frecuencia de operación y las condiciones de carga (Almutairi & Hadjiloucas, 2019; Rahman et al., 2024). Desde una perspectiva social y ambiental, se espera que una mayor eficiencia energética reduzca los costos operativos para empresas y usuarios, así como el desperdicio de energía y las emisiones asociadas, alineándose con objetivos de sostenibilidad (Pambudi et al., 2022; Hnayno et al., 2023).

Tabla 1. Desviación entre debiera y realidad.

Dato suministrado	Referencia Bibliográfica	Debiera (Condiciones Ideales)	Realidad (Condiciones Observadas)	Desviación
Distorsión Armónica Total (THD)	IEEE 519-2014; Carnovale et al. (2021)	THD < 8% para garantizar calidad de energía y minimizar pérdidas térmicas	THD entre 9.91% y 10.19% en compresores trifásicos; hasta 15% en sistemas industriales	Incremento del 98% al 200% sobre el límite ideal, aumentando pérdidas y riesgos de fallo.
Temperatura de bobinas inductivas	Sixel et al. (s.f.); Ristic-Smith & Rogers (2024)	<< 155 °C (límite térmico del cobre esmaltado, *valor standard, varía con el tipo de alambre*) con refrigeración adecuada	Picos de 171 °C en inductores sin refrigeración líquida, y según carga	Se ha alcanzado hasta +10% sobre el límite. Con enfriamiento líquido: reducción efectiva al 32-39% de sus valores normales.
Pérdidas por efecto Joule (P = I²R)	Romero Daza (2020); Delette et al. (2022)	Mínimas, con resistencia efectiva estable y THD < 8%	Aumentan con THD > 10% y efecto piel a frecuencias >1 kHz (Rac/Rdc hasta 2x mayor)	Pérdidas térmicas hasta 2x mayores en CA por efecto piel y armónicos
Coefficiente de transferencia de calor	Doran (2019); Ravalli (2022)	Un coeficiente de transferencia de calor muy alto. Que optimice la función del filtro.	25 W/m²·K por convección natural con aire.	Enfriamiento por convección natural del aire: 2-40x menos eficiente que en sistemas de inmersión monofásico, con un coeficiente de transferencia de calor de 50-1000 W/m²·K
Consumo energético.	Pambudi et al. (2022)	Mínimo, con sistemas pasivos o de bajo consumo	Hasta 38% del consumo total en centros de datos y -13 °C menos, con enfriamiento líquido.	Inmersión con TMC-1230 reduce consumo energético y mejora sostenibilidad

Fuente: Propia, elaborada en Excel.

## **Establecimiento de objetivos**

**Objetivo General:** Analizar la viabilidad de implementar enfriamiento líquido en un filtro de armónicos para la reducción de pérdidas de energía y posible mejora de la eficiencia en la mitigación de armónicos en sistemas eléctricos.

### **Objetivos Específicos:**

1. Investigar las propiedades térmicas del líquido TMC-1230 referentes a la disipación de calor, para su aplicación en componentes inductivos.
2. Desarrollar un modelo de enfriamiento en un filtro de armónicos que integre componentes inductivos y capacitivos con enfriamiento líquido, validando experimentalmente la compatibilidad del enfriamiento líquido con los componentes del filtro en un entorno controlado.
3. Evaluar la reducción del THD por medio de simulaciones, antes y después de la implementación del enfriamiento líquido en el filtro de armónicos.
4. Evaluar la transferencia de energía térmica al sistema de enfriamiento, cuantificando mediante un modelo matemático el porcentaje de recuperación posible bajo las condiciones operativas de los filtros de armónicos.

## Alcance

El alcance de este proyecto se enmarca en un enfoque técnico y experimental, ya que su propósito va más allá de observar el comportamiento térmico del filtro y el impacto del enfriamiento líquido en el sistema de mitigación de armónicos. Busca comprender en profundidad cómo y por qué el uso del líquido dieléctrico TMC-1230 (seleccionado como sustituto del Novec-1230 tras su discontinuación por 3M) influye en la disipación de calor, con un enfoque específico en los componentes inductivos del filtro de armónicos, y cómo esto contribuye a la reducción de corrientes armónicas en sistemas eléctricos. Más allá de describir estos efectos, el trabajo se centra en analizar los mecanismos subyacentes a la interacción térmica del TMC-1230 con dichos componentes bajo condiciones operativas reales, evaluando sus propiedades físicas y térmicas. Este proyecto enfatiza la investigación orientada a mejorar la eficiencia térmica y energética del sistema.

El estudio abarca un análisis detallado de los mecanismos de disipación térmica que proporciona el TMC-1230 en los componentes del filtro de armónicos, con un enfoque particular en los elementos inductivos, como bobinas de cobre y núcleos de ferrita, y, en menor medida, en los elementos capacitivos que conforman el sistema de filtrado. Esto implica investigar cómo este fluido, con un punto de ebullición de 49.2 °C y un calor latente de vaporización de 88 kJ/kg (TMC Industries, Inc., s.f.-a), facilita la transferencia de calor, estabilizando las temperaturas de las bobinas bajo cargas térmicas elevadas (e.g., 20 A), en contraste con picos de hasta 171 °C reportados en inductores sin refrigeración líquida (Sixel et al., s.f.; Ristic-Smith & Rogers, 2024). Este proceso reduce la sobrecarga térmica en el sistema, lo que es clave para mantener una baja impedancia en el filtro, permitiendo captar y mitigar eficazmente las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales (Romero Daza, 2020; Nazari et al., 2019). Se analiza cómo la baja viscosidad del TMC-1230 (0.524 cP a 25 °C) y su tensión superficial de 13.6 mN/m favorecen la convección y la formación de burbujas pequeñas durante la ebullición nucleada, optimizando la transferencia de calor en superficies metálicas, según lo documentado por Liang y Mudawar (2019).

Otro aspecto fundamental del alcance es la evaluación de la capacidad del TMC-1230 para disipar el calor generado por las pérdidas resistivas ( $P = I^2R$ ) y

magnéticas (histéresis y corrientes parásitas) en las bobinas, que se incrementan bajo la influencia de armónicos y el efecto piel a frecuencias elevadas (Delette et al., 2022). La investigación analizará cómo este fluido el cual tiene una resistencia dieléctrica de 48 kV y estabilidad térmica, asegura un desempeño confiable en entornos eléctricos sin riesgos de cortocircuitos o degradación del material (TMC Industries, Inc., s.f.-a). Además, se estudiará su interacción con los materiales de las bobinas, como el cobre, y su efecto en la reducción de gradientes térmicos, comparándolo con métodos tradicionales como la convección natural con aire, con coeficiente de transferencia de calor de  $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , o con convección forzada por aire, que ofrece coeficientes de transferencia de calor de  $25\text{-}250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , frente a los  $2,500\text{-}100,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  alcanzados por el uso del enfriamiento líquido de dos fases, o coeficientes de  $50\text{-}1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  alcanzados en sistemas de inmersión monofásicos (Doran, 2019; Ravalli, 2022).

Un componente innovador del proyecto será el análisis de opciones para almacenar y reutilizar el calor disipado por el TMC-1230, por ejemplo, evaluando métodos como la transferencia a sistemas de calefacción auxiliar, como precalentado de componentes, basados en la cuantificación de la energía térmica generada por las pérdidas en las bobinas bajo condiciones de alta carga. Aprovechar esta energía calórica podría contribuir a la sostenibilidad del sistema de filtrado de armónicos, reduciendo el desperdicio energético y alineándose con tendencias observadas en aplicaciones como centros de datos, donde la inmersión en fluidos dieléctricos disminuye el consumo energético hasta en un 38% (Pambudi et al., 2022). Aunque esta posibilidad está en una etapa preliminar, el proyecto analizará su viabilidad conceptual como un valor agregado del uso del TMC-1230, considerando su capacidad calorífica específica de  $1.013 \text{ kJ/kg}\cdot\text{C}$  y su presión de vapor de  $41 \text{ kPa}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (TMC Industries, Inc., s.f.-a).

El proyecto también abarca el análisis del impacto del TMC-1230 en la eficiencia global del filtro de armónicos, evaluando cómo la estabilización térmica contribuye a mantener un THD por debajo del 5%, conforme al estándar IEEE 519-2014, frente a valores reales de  $9.91\text{-}10.19\%$  en sistemas sin refrigeración optimizada (Carnovale et al., 2021; Mahela et al., 2021). Esto incluye estudiar cómo la reducción de la temperatura de las bobinas mejora la conductividad eléctrica y reduce las

pérdidas por efecto piel, un fenómeno que incrementa la resistencia efectiva ( $R_{ac}/R_{dc}$ ) a frecuencias altas (Romero Daza, 2020; Delette et al., 2022).

Finalmente, esta investigación busca contribuir al conocimiento actual explorando la combinación de mitigación de armónicos con tecnologías de enfriamiento avanzadas en sistemas eléctricos industriales. Aunque la literatura destaca la eficacia de filtros activos y pasivos para reducir el THD (Nazari et al., 2019) y el potencial de fluidos dieléctricos como el Novec o el TMC-1230 en aplicaciones de electrónica de potencia (Han et al., 2022; Ristic-Smith & Rogers, 2024), no existen estudios exhaustivos que integren ambos enfoques en el contexto de filtros de armónicos. Al analizar los beneficios del TMC-1230, como su capacidad para disipar flujos de calor de hasta  $1000 \text{ W/cm}^2$  frente a  $1 \text{ W/cm}^2$  del aire forzado (Ravalli, 2022), y sus posibles limitaciones, como el costo del fluido, la complejidad del diseño de sistemas de inmersión (sellado, manejo de presión) y los requisitos de mantenimiento (TMC Industries, Inc., s.f.-a), el proyecto pretende establecer una base técnica sólida para futuras investigaciones o aplicaciones prácticas. Los resultados esperados no solo contribuirán al diseño de sistemas de filtrado más eficientes y sostenibles, sino que también podrían escalarse a entornos industriales donde la estabilidad, la calidad de la energía y la reducción de costos operativos son prioritarios (Lumbreras et al., 2020; Yang & Hsu, 2023).

## **Marco Teórico**

### **1. Introducción a los armónicos y su impacto en sistemas eléctricos**

En los sistemas eléctricos modernos, los armónicos representan un desafío considerable debido al aumento de cargas no lineales, como inversores, rectificadores y equipos electrónicos de potencia, que introducen distorsiones en las ondas de corriente y voltaje en puntos clave, como el punto de acoplamiento común (Al-Shetwi et al., 2020). Según Romero Daza (2020), los armónicos generados por estas cargas incrementan las pérdidas por efecto Joule ( $P = I^2R$ ) en conductores y provocan un aumento en las pérdidas magnéticas, como las de histéresis y corrientes parásitas, en componentes como transformadores, motores de inducción y bobinas inductivas de filtros de armónicos. Estas pérdidas térmicas afectan negativamente la eficiencia de los componentes eléctricos, elevando las temperaturas y reduciendo su vida útil.

El estándar IEEE 519-2014 limita la distorsión armónica total (THD) a menos del 5% en corriente para garantizar la calidad de la energía y minimizar las pérdidas térmicas en inductores, contribuyendo así a la estabilidad operativa de los sistemas (IEEE, 2014). Sin embargo, en muchos casos reales, las instalaciones alcanzan valores de THD que exceden este umbral, llegando hasta un 15% o más, lo que incrementa los riesgos de fallos y genera problemas como interferencias en los circuitos de control y sobrecalentamiento de componentes en la distribución (Carnovale et al., 2021; Mahela et al., 2021; Almutairi & Hadjiloucas, 2019). Este calentamiento es particularmente crítico en bobinas inductivas, donde las pérdidas resistivas se intensifican por el efecto piel, un fenómeno que incrementa la resistencia efectiva ( $R_{ac}$ ) a medida que aumenta la frecuencia, concentrando la corriente en la periferia del conductor y reduciendo el área útil de conducción (Delette et al., 2022; Romero Daza, 2020).

### **2. Relevancia y necesidad de la mitigación de armónicos**

La mitigación de armónicos es esencial para asegurar la calidad y estabilidad de la energía en redes eléctricas modernas, especialmente en aplicaciones industriales donde la confiabilidad y el rendimiento son prioritarios (Nazari et al., 2019). La presencia de armónicos mal gestionados genera pérdidas considerables, como se observa en industrias donde el mal desempeño y los frecuentes

mantenimientos elevan los costos operativos (Yang & Hsu, 2023; Mahela et al., 2021). Desde un punto de vista social, mejorar la eficiencia energética mediante la reducción de estas distorsiones contribuye a disminuir los costos para empresas y consumidores, promoviendo un uso responsable de la energía (Lumbreras et al., 2020). Además, desde una perspectiva ambiental, optimizar el sistema reduce el desperdicio de energía y las emisiones asociadas con la generación eléctrica, alineándose con objetivos de sostenibilidad (Hnayno et al., 2023).

La incorporación de filtros activos y pasivos ha demostrado ser altamente efectiva para reducir los armónicos, mejorando la eficiencia energética al disminuir las pérdidas y maximizando el rendimiento global de los sistemas eléctricos (Nazari et al., 2019). Los filtros pasivos, basados en componentes inductivos y capacitivos, y los filtros activos, que compensan dinámicamente las corrientes armónicas, abordan el problema del THD y sus efectos térmicos (Romero Daza, 2020). Sin embargo, el calentamiento de las bobinas bajo condiciones de alta carga sigue siendo un reto significativo. Por ejemplo, Sixel et al. (s.f.) reportan una temperatura máxima de núcleo de 171 °C en un inductor sin refrigeración líquida bajo condiciones de carga térmica significativa, lo que supera el límite térmico típico del cobre esmaltado (155 °C) y evidencia la necesidad de estrategias avanzadas de gestión térmica.

El proyecto se alinea con normativas internacionales como el estándar IEEE 519-2014, que establece límites aceptables para la distorsión armónica, y responde a la necesidad de calidad energética en aplicaciones críticas industriales (Carnovale et al., 2021). Cumplir con estas normativas no solo evita problemas regulatorios y sanciones potenciales, sino que también asegura la estabilidad y eficiencia de los sistemas, lo cual es crucial en entornos de alta demanda (Yang & Hsu, 2023).

### **3. Fuentes de calentamiento en bobinas inductivas y necesidad de refrigeración**

Las bobinas inductivas utilizadas en filtros de armónicos suelen estar fabricadas con alambre de cobre y núcleos de ferrita, materiales seleccionados por su alta conductividad eléctrica y capacidad magnética, respectivamente (Delette et al., 2022). Sin embargo, estos componentes son susceptibles a diversas fuentes de calentamiento. Las pérdidas por efecto Joule en los conductores y las bobinas,

aumentan proporcionalmente al cuadrado de la corriente que circula por ellos. Este efecto se ve agravado a frecuencias elevadas debido al incremento de la resistencia efectiva ocasionado por el efecto piel, un fenómeno bien documentado por Delette et al. (2022) y Al-Hinaai (2024). Estas referencias confirman que la potencia disipada por efecto Joule crece con la corriente, mientras que la resistencia en corriente alterna (CA) se incrementa con la frecuencia, lo que intensifica el calentamiento.

Además, Romero Daza (2020) señala que en transformadores, la presencia de armónicos genera un aumento tanto en las pérdidas resistivas como en las pérdidas magnéticas del núcleo, incluyendo las de histéresis y corrientes parásitas, debido al mayor contenido de frecuencia en el flujo magnético inducido. Este comportamiento es extrapolable a los inductores de filtros de armónicos, como lo complementa Carnovale et al. (2021), que destaca que el calentamiento provocado por armónicos representa un desafío térmico significativo, especialmente en componentes con bobinas. A modo de ejemplo práctico, una bobina de 1 mH con una resistencia de 0.1  $\Omega$  bajo una corriente de 20 A a 50 Hz genera 40 W de calor por efecto Joule. Sin embargo, a una frecuencia de 1 kHz, las pérdidas magnéticas, como las de histéresis y corrientes parásitas, pueden sumar entre 30 y 50 W adicionales, dependiendo de las características del núcleo y el diseño de la bobina (Delette et al., 2022).

En aplicaciones donde las frecuencias de las armónicas, como las de orden bajo a medio (e.g., 180 Hz para la 3<sup>a</sup> armónica y 300 Hz para la 5<sup>a</sup> armónica en un sistema de 60 Hz), afectan el comportamiento de los conductores en el filtrado de armónicos, el efecto piel puede incrementar notablemente la resistencia, generando mayores pérdidas térmicas. Para mitigar este fenómeno, se emplean configuraciones de alambre Litz, que consisten en múltiples hilos finos e individualmente aislados. Según Delette et al. (2022), el diámetro óptimo de estos hilos disminuye con el cuadrado de la profundidad de penetración, que a su vez se reduce a medida que aumenta la frecuencia, asegurando una distribución más uniforme de la corriente dentro del conductor. Romero Daza (2020) complementa esta idea al mostrar cómo la relación entre la resistencia de CA y la de CC ( $R_{ac}/R_{dc}$ ) aumenta con la frecuencia, evidenciando la necesidad de soluciones de diseño avanzadas para minimizar las pérdidas asociadas al efecto piel en componentes con bobinas.

El comportamiento térmico de los inductores bajo condiciones operativas reales representa un factor crítico en el diseño de filtros de armónicos, debido a la generación de calor provocada por la presencia de corrientes armónicas elevadas. Diversos estudios han documentado este fenómeno: por ejemplo, Sixel et al. (s.f.) reportan una temperatura máxima de núcleo de 171 °C en un inductor sin refrigeración líquida, operando bajo condiciones de carga térmica significativa y frecuencia cercana a 1 kHz, lo cual demuestra el potencial de sobrecalentamiento en ausencia de una gestión térmica adecuada. Asimismo, Delette et al. (2022) destacan que las pérdidas en los devanados y núcleos magnéticos (provocadas por el efecto Joule y fenómenos dependientes de la frecuencia como el efecto piel) son fuentes relevantes de generación de calor en componentes magnéticos como los inductores. Este análisis es coherente con lo expuesto por Romero Daza (2020), quien, aunque se enfoca en transformadores, detalla cómo los armónicos incrementan las pérdidas térmicas internas, un principio físico que también aplica a inductores de filtros pasivos en sistemas trifásicos, dada su similitud en el manejo de flujos magnéticos y corrientes distorsionadas. Estas observaciones refuerzan la necesidad de estrategias de refrigeración eficaces en inductores sujetos a condiciones de alta carga eléctrica y distorsión armónica, como las contempladas en este proyecto.

#### **4. Revisión de métodos de refrigeración tradicionales y sus limitaciones**

Los métodos de ventilación por aire, ya sea natural o forzada, presentan limitaciones significativas en aplicaciones de alta potencia como las bobinas de filtros de armónicos. Según Rahman et al. (2024), la convección natural tiene la menor capacidad de disipación térmica, siendo adecuada solo para dispositivos de baja potencia, mientras que Ravalli (2022) indica que la convección forzada con ventiladores alcanza coeficientes moderados (25-250 W/m<sup>2</sup>·K) y es útil solo cuando el flujo de calor no supera 1 W/cm<sup>2</sup>. Estas limitaciones contrastan con la necesidad de disipar cargas térmicas intensas en filtros de armónicos, donde las bobinas enfrentan condiciones de alta densidad de potencia.

En contraste, las fuentes revisadas resaltan las limitaciones de la refrigeración pasiva tradicional basada en disipadores o convección natural. Rahman et al. (2024) diferencian entre métodos pasivos y activos, señalando que los primeros son

insuficientes para mantener temperaturas seguras en dispositivos de alta potencia, promoviendo soluciones como el enfriamiento líquido. Además, Ravalli (2022) indica que, mientras el enfriamiento por aire forzado disipa alrededor de 1 W/cm<sup>2</sup> con una diferencia térmica de 60 °C, la incapacidad de estos sistemas para manejar flujos de calor más altos los hace inadecuados para aplicaciones industriales avanzadas.

## **5. Descripción general del TMC-1230**

El TMC-1230 es un fluido dieléctrico, su principal uso es la protección contra incendios y se presenta como un reemplazo directo del 3M Novec 1230. Es un agente limpio de extinción de incendios sin agua, no es corrosivo. Estas propiedades lo hacen ideal para la protección de sistemas electrónicos sensibles como centros de datos, salas de servidores y equipos de telecomunicaciones, ya que no causa daños a estos equipos. Además, no deja residuos dañinos, lo que significa que los sistemas protegidos no requieren limpieza y pueden seguir funcionando después de su uso.

Cada envío incluye un Certificado de Análisis de TMC que verifica que el producto ha sido probado para cumplir con los estándares internos de TMC y con las normas NFPA 2001 (edición 2022, sección A.5.1.2.3) de calidad.

Este agente extintor es químicamente idéntico al Novec™ 1230 y se recomienda para la supresión de incendios donde la no inflamabilidad y las preocupaciones ambientales son importantes. Es considerado un sistema de protección contra incendios de agente limpio diseñado para extinguir incendios sin dejar residuos dañinos, lo que lo hace adecuado para entornos sensibles como centros de datos, museos y lugares con equipos electrónicos y documentos valiosos.

El TMC-1230 tiene un excelente perfil ambiental con un Potencial de Calentamiento Global (GWP) inferior a 1 y un Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP) de 0. Su Tiempo de Vida en la Atmósfera (ALT) es de 0.014 años, siendo significativamente menor que el de otros sustitutos de halones fluoroalcanos. Esto lo convierte en una opción más respetuosa con el medio ambiente en comparación con alternativas como HFC-227ea y HFC-236fa, que tienen GWP mucho más altos.

Además de la supresión de incendios, el TMC-1230 también es adecuado para aplicaciones de enfriamiento por inmersión y transferencia de calor, siendo un reemplazo químicamente idéntico para Novec™ 649 en estas aplicaciones donde la no inflamabilidad y las preocupaciones ambientales son importantes. Algunos ejemplos de estas aplicaciones incluyen el enfriamiento de electrónica, centros de datos, motores diésel y transformadores.

El TMC-1230 presenta una buena compatibilidad con diversos materiales como caucho y metal, con poco impacto en una variedad de materiales utilizados.

En cuanto a su identidad química, el TMC-1230 se conoce como Perfluoro(2-metil-3-pentanona), con sinónimos como FK-5-1-12. Su peso molecular es de 316.04 g/mol. Físicamente, es un líquido transparente incoloro con un olor bajo. Su punto de ebullición es de 49.2°C y su punto de congelación es de -108.0°C. Tiene una densidad de 1.6 g/cm<sup>3</sup> y es poco soluble en agua (<0.001% en peso). No tiene punto de inflamación y no se clasifica como inflamable por OSHA o DOT bajo métodos de prueba estándar.

El TMC-1230 es efectivo contra incendios de Clase A, B y C y requiere una concentración de extinción baja, alrededor del 3.5% para clase A y 4.5% para clase B, siendo comparable a la del Halón 1301 y significativamente menor que la de otros sustitutos de halones.

### **Consideraciones para tomar en cuenta al usarse**

Al utilizar el TMC-1230, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

#### **Almacenamiento y Manipulación:**

- Debe almacenarse a temperaturas que no excedan los 38°C/100°F.
- Debe mantenerse alejado de bases fuertes y aminas.
- Es necesario protegerlo de la luz solar y almacenarlo en un lugar bien ventilado.

- Se recomienda almacenar siempre en contenedores del mismo material que el original.
- Se debe utilizar solo en una campana de extracción química.
- Durante la manipulación, se debe evitar fumar, beber y consumir alimentos en el área de trabajo.

### **Seguridad Personal:**

- Generalmente, se debe utilizar equipo de protección, se recomienda el uso de ropa de protección adecuada y botas resistentes a productos químicos.
- Es fundamental el uso de guantes resistentes a productos químicos.
- Se deben utilizar gafas de seguridad para la protección ocular.
- Se debe evitar la inhalación de vapores.
- Es importante lavarse las manos después de su uso.

### **Consideraciones Ambientales:**

- Se debe evitar la liberación al medio ambiente, como lagos, arroyos y alcantarillas.
- En caso de derrame, se debe contener y recoger con material absorbente no combustible y desechar según las regulaciones locales.
- El TMC-1230 puede ser reciclado y reutilizado a través de TMC Industries, lo que ayuda a proteger el medio ambiente y puede reducir los costos de reemplazo. Se puede contactar a TMC Industries para obtener más información sobre la recuperación y el reciclaje.

### **Incompatibilidades:**

El TMC-1230 es incompatible con ácidos fuertes, bases fuertes y agentes oxidantes fuertes.

### **Disposición:**

Para la disposición y el reciclaje, se debe consultar al fabricante/proveedor para obtener información específica.

## **Fuego:**

En caso de incendio, los contenedores cerrados expuestos al fuego deben enfriarse con agua, se deben utilizar equipos de respiración autónoma y ropa protectora para evitar el contacto.

## **6. Análisis del riesgo**

El análisis de riesgo detallado del TMC-1230 se basa en información de seguridad y toxicidad:

- Clasificación de Peligros: El TMC-1230 no está clasificado como peligroso según la Norma de Comunicación de Peligros de OSHA (HCS). No requiere pictogramas de peligro, palabra de advertencia ni declaraciones de peligro.
- Toxicidad Aguda: Los datos de toxicidad aguda indican una baja toxicidad:
  - Oral (LD50): >5000 mg/kg (en base a juicio profesional).
  - Dermal (LD50): >5000 mg/kg (en base a juicio profesional).
  - Inhalación (LC50 en ratas): >1227 mg/L.
  - Corrosión/Irritación Cutánea: Los experimentos en conejos no mostraron ningún efecto adverso observado (no irritante).
  - Lesiones Oculares Graves/Irritación Ocular: Los experimentos en conejos no mostraron ningún efecto adverso observado (no irritante).
  - Sensibilización Respiratoria y Cutánea: No hay datos disponibles o los datos no son suficientes para la clasificación.
  - Mutagenicidad en Células Germinales: No hay datos disponibles o los datos no son suficientes para la clasificación.
  - Carcinogenicidad: No hay datos disponibles o los datos no son suficientes para la clasificación.
  - Toxicidad Reproductiva: En ratas (durante la gestación, NOAEL): 38.7 mg/L, no clasificado como tóxico para la reproducción.

En conejos (durante la gestación, LOAEL): 38.7 mg/L, tóxico para el desarrollo. Sin embargo, la concentración de uso como agente extintor suele ser mucho menor que estos niveles.

- Toxicidad Específica en Órganos Diana (STOT) - Exposición Única: En ratas (inhalación, 2 horas, sistema nervioso central, NOAEL): 100000 ppm, no clasificado.

En perros (inhalación, 17 minutos, sensibilización cardíaca): ningún efecto adverso observado.

- Toxicidad Específica en Órganos Diana (STOT) - Exposición Repetida: En ratas (inhalación, 90 días, diversos órganos, NOAEL): 38.6 mg/L, no clasificado.

- Peligro por Aspiración: No hay datos disponibles o los datos no son suficientes para la clasificación.

- Efectos a largo plazo: No se conocen efectos a largo plazo.

- Estabilidad y Reactividad:

El producto es estable bajo las condiciones de manipulación y almacenamiento recomendadas. No se conocen reacciones peligrosas. Debe evitarse la luz solar y la luz ultravioleta. Es incompatible con ácidos fuertes, bases fuertes y agentes oxidantes fuertes. No se degrada cuando se utiliza según las especificaciones. Sin embargo, en caso de incendio o exposición a altas temperaturas, puede generar productos de descomposición peligrosos como compuestos halogenados y óxidos de carbono.

- Inflamabilidad:

El TMC-1230 no tiene punto de inflamación según las pruebas estándar y no se clasifica como inflamable por OSHA o DOT. Sin embargo, como con casi todos los solventes halogenados, pueden existir límites de inflamabilidad en presencia de una fuente de ignición de alta energía.

- Impacto Ambiental:

Se debe evitar su descarga en sistemas acuáticos. Ofrece la posibilidad de reciclaje y reutilización a través de TMC Industries, lo que reduce los residuos y el impacto ambiental.

- Seguridad para la Ocupación Humana:

Proporciona el mayor margen de seguridad para la ocupación humana de cualquier solución de agente limpio bajo el estándar NFPA 2001. La concentración de extinción del Perfluoro(2-metil-3-pentanona) es significativamente menor que su nivel sin efecto adverso observado (NOAEL), lo que indica un alto margen de seguridad en comparación con otros agentes extintores como el Halón 1301 y el HFC-227ea.

En resumen, el TMC-1230 presenta un perfil de riesgo generalmente bajo, bajo condiciones normales de uso y almacenamiento. Sin embargo, se deben seguir las recomendaciones de manipulación, almacenamiento y seguridad personal para minimizar cualquier posible riesgo.

## **7. Propiedades térmicas y aplicaciones del líquido dieléctrico TMC-1230**

El presente trabajo se centra en el líquido dieléctrico TMC-1230 como sustituto del Novec-1230, discontinuado por 3M, para la disipación de calor en componentes inductivos de un filtro de armónicos. Según el "Technical Data Sheet" de TMC Industries, Inc. (s.f.-a), el TMC-1230 presenta un punto de ebullición de 49.2 °C, un calor latente de vaporización de 88 kJ/kg, una capacidad calorífica específica de 1.013 kJ/kg°C a 25 °C, una viscosidad de 0.524 cP a 25 °C, una presión de vapor de 41 kPa a 25 °C, una tensión superficial de 13.6 mN/m y una resistencia dieléctrica de 48 kV. Estas características lo posicionan como un candidato prometedor para la refrigeración por inmersión debido a las siguientes razones: el bajo punto de ebullición de 49.2 °C permite un cambio de fase eficiente a temperaturas operativas típicas, optimizando la absorción de calor; el calor latente de vaporización de 88 kJ/kg facilita la disipación de grandes cantidades de energía térmica durante la ebullición; la baja viscosidad de 0.524 cP mejora la convección natural y el flujo alrededor de las bobinas; y la tensión superficial de 13.6 mN/m promueve la formación de burbujas

pequeñas durante la ebullición nucleada, incrementando la transferencia de calor en superficies metálicas, como lo documentan Liang y Mudawar (2019). Además, su alta resistencia dieléctrica de 48 kV y estabilidad térmica aseguran compatibilidad con sistemas eléctricos, eliminando riesgos de cortocircuitos o degradación del material en entornos operativos, mientras que la capacidad calorífica específica de 1.013 kJ/kg°C y la presión de vapor de 41 kPa a 25 °C soportan una gestión térmica efectiva en un rango operativo controlado.

El "Safety Data Sheet" (TMC Industries, Inc., s.f.-b) indica que el TMC-1230 no presenta punto de inflamación y tiene una solubilidad en agua inferior al 0.001%, lo que refuerza su seguridad para aplicaciones industriales donde la exposición a condiciones adversas es común. TMC Industries, Inc. (s.f.-a) describe al TMC-1230 como un fluido no inflamable y químicamente estable, adecuado para aplicaciones de enfriamiento tanto monofásico como bifásico en centros de datos, inversores y módulos IGBT, lo que sugiere un potencial significativo para entornos con altas cargas térmicas inducidas por armónicos, como los filtros de armónicos en estudio.

En configuraciones de inmersión adecuadas, la ebullición del fluido actúa como un mecanismo de transferencia de calor altamente eficiente, estabilizando la temperatura de los componentes cercanos a 49.2 °C gracias a su calor latente de vaporización de 88 kJ/kg (TMC Industries, Inc., s.f.-a). Su baja viscosidad de 0.524 cP a 25 °C favorece la convección del fluido en sistemas de inmersión, mientras que su capacidad calorífica específica de 1.013 kJ/kg°C contribuye a estabilizar las temperaturas de los componentes sumergidos. Un aspecto destacado es su baja tensión superficial de 13.6 mN/m, que mejora la ebullición en superficies metálicas como el cobre, según lo documentado por Liang y Mudawar (2019). Este fenómeno permite la formación de burbujas pequeñas que propagan la ebullición nucleada de manera eficiente, optimizando la transferencia de calor.

La literatura respalda el uso de fluidos dieléctricos con capacidad de ebullición en la refrigeración de componentes sometidos a condiciones térmicas exigentes. Por ejemplo, Ristic-Smith y Rogers (2024) analizan la transferencia de calor por ebullición utilizando el Novec 7000, un fluido dieléctrico con un punto de ebullición moderado, en rangos de temperatura de saturación entre 66 °C y 94 °C. Este estudio logró controlar eficientemente la temperatura de interruptores electrónicos, lo que sugiere

que fluidos con características similares, como el TMC-1230, podrían ser igualmente efectivos en aplicaciones relacionadas. Asimismo, Al-Hinaai (2024) y Rao et al. (2019) exploran la aplicación de fluidos como el Novec™ o ésteres sintéticos en transformadores y sistemas de potencia, destacando su viabilidad térmica y dieléctrica.

## **8. Refrigeración por inmersión con TMC-1230**

La refrigeración por inmersión ha sido ampliamente investigada como una solución eficiente para la gestión térmica en centros de datos y electrónica de potencia, destacándose por su capacidad para enfriar directamente componentes con altas densidades de potencia. Estudios como los de Ristic-Smith y Rogers (2024) y Ravalli (2022) analizan configuraciones experimentales con fluidos dieléctricos perfluorados, como los de la serie Novec™ de 3M, reportando flujos de calor crítico del orden de  $43 \text{ W/cm}^2$  en condiciones controladas. En experimentos detallados por Ristic-Smith y Rogers (2024), utilizando inmersión bifásica con fluidos dieléctricos como el Novec 7000, se logró mantener componentes electrónicos por debajo de  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  incluso bajo condiciones de alta carga térmica, con temperaturas de saturación del fluido entre  $66 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $94 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aunque estos resultados se obtuvieron en interruptores electrónicos y no directamente en bobinas, sugieren que un sistema de inmersión bifásica bien diseñado con el TMC-1230 podría mantener las temperaturas de las bobinas por debajo del límite térmico típico del cobre esmaltado ( $155 \text{ }^\circ\text{C}$ ), incluso en condiciones exigentes generadas por armónicos en filtros activos.

Los sistemas de enfriamiento por ebullición bifásica, como los que emplean el TMC-1230, ofrecen coeficientes de transferencia de calor significativamente superiores a los métodos tradicionales basados en aire. Según Doran (2019), estos coeficientes pueden variar entre  $2,500$  y  $100,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , en comparación con los  $25$ - $250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  típicos de la convección forzada por aire. Esta diferencia, también reflejada por Liang y Mudawar (2019) y Ravalli (2022), subraya la superioridad de la ebullición bifásica en términos de eficiencia térmica, lo que resulta crucial para aplicaciones como los filtros de armónicos, donde las bobinas enfrentan cargas térmicas intensas. Por ejemplo, en electrónica de potencia, Ristic-Smith y Rogers (2024) reportan que el uso de FC-72 en inmersión permitió duplicar la tasa de

repetición de pulsos en comparación con aceite monofásico y triplicarla respecto al aire forzado, evidenciando una capacidad de enfriamiento significativamente mayor.

Además, en condiciones de ebullición con fluorocarbonos dieléctricos como el FC-72, cuyas propiedades térmicas son comparables a las del TMC-1230, por ejemplo, un punto de ebullición de 56 °C frente a 49.2 °C, un calor latente de vaporización de 88 kJ/kg igual al del TMC-1230, y una tensión superficial de 10 mN/m frente a 13.6 mN/m (3M, s.f.), la baja tensión superficial facilita la formación de burbujas pequeñas. Estas burbujas, al iniciar la ebullición, activan cavidades vecinas, propagando el proceso a lo largo de toda la superficie metálica, según Liang y Mudawar (2019). Este fenómeno resulta particularmente beneficioso en sistemas como los filtros de armónicos, donde una disipación térmica rápida es esencial para evitar el sobrecalentamiento de las bobinas. La transición acelerada desde la convección natural a la ebullición nucleada eficiente reduce drásticamente la temperatura superficial de los componentes, lo que refuerza la idoneidad del TMC-1230 para esta aplicación.

El uso de fluidos dieléctricos perfluorados, como los de la serie Fluorinert™ de 3M, ha sido ampliamente investigado para el enfriamiento por inmersión en aplicaciones de electrónica de potencia, incluyendo inversores utilizados en vehículos eléctricos. Estos fluidos se destacan por su alta rigidez dieléctrica y compatibilidad química, lo que los hace ideales para proporcionar aislamiento eléctrico entre los componentes y el sistema de refrigeración. Ristic-Smith y Rogers (2024) y Ravalli (2022) exploran la viabilidad del enfriamiento por inmersión bifásica con este tipo de fluidos, enfocándose en mejorar el rendimiento térmico mediante técnicas de modificación de superficies para optimizar la transferencia de calor. Aunque no se reportan datos específicos sobre temperaturas de bobinas bajo condiciones de carga definidas, los estudios respaldan el uso de estos fluidos como una solución avanzada para la gestión térmica en inversores de alta densidad de potencia. Dado que el TMC-1230 comparte propiedades térmicas similares, como su punto de ebullición de 49.2 °C y calor latente de 88 kJ/kg, su aplicación en filtros de armónicos en redes industriales resulta comparable y promisorio.

## 9. Comparación con otros métodos y beneficios adicionales

Diversos estudios comparativos muestran que los sistemas de enfriamiento por inmersión con fluidos dieléctricos, como el TMC-1230, superan ampliamente al enfriamiento por aire en términos de disipación térmica. Ravalli (2022) indica que, mientras el enfriamiento por aire forzado disipa alrededor de  $1 \text{ W/cm}^2$  con una diferencia térmica de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , la inmersión con flujo forzado de fluidos dieléctricos puede alcanzar flujos de calor del orden de  $1000 \text{ W/cm}^2$  en configuraciones optimizadas. Esta mejora en la disipación térmica es particularmente relevante para filtros de armónicos, donde la generación de calor por corrientes no lineales puede comprometer el desempeño si no se gestiona adecuadamente.

La refrigeración por inmersión también ofrece ventajas en términos de eficiencia energética. En centros de datos, donde la refrigeración puede representar hasta el 38% del consumo total de energía, Pambudi et al. (2022) reportan que la inmersión en fluidos dieléctricos reduce la temperatura de los componentes hasta  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  por debajo de los niveles alcanzados con enfriamiento convencional, disminuyendo significativamente la demanda energética para mantener condiciones operativas estables. Asimismo, en sistemas bifásicos, la simplificación del diseño y el bajo consumo de componentes pasivos, como condensadores, permiten una operación más eficiente, según Ravalli (2022). Estos beneficios, aunque estudiados en contextos como centros de datos, son aplicables a filtros de armónicos, donde mejorar la eficiencia térmica sin aumentar el consumo energético es clave para soluciones sostenibles.

Complementariamente, Liang y Mudawar (2019) y Ristic-Smith y Rogers (2024) subrayan que, aunque los fluidos dieléctricos poseen propiedades eléctricas favorables, su capacidad de transferencia térmica puede optimizarse con técnicas de modificación de superficies, un aspecto a considerar en el diseño final. En este contexto, el TMC-1230, con su punto de ebullición de  $49.2 \text{ }^\circ\text{C}$  y calor latente de  $88 \text{ kJ/kg}$ , estabiliza temperaturas mediante ebullición superficial, ofreciendo una solución térmica superior para mantener la confiabilidad de las bobinas bajo condiciones operativas exigentes.

Además de las ventajas en la refrigeración y la estabilización térmica, el uso del líquido dieléctrico TMC-1230 abre la posibilidad de recuperar la energía calórica disipada por el filtro de armónicos, un aspecto que no solo mejora la eficiencia energética, sino que también contribuye a la sostenibilidad del sistema. A continuación, se exploran los fundamentos de la recuperación de energía calórica y su aplicación en procesos industriales, incluyendo el uso de intercambiadores de calor, que son clave para el diseño experimental de este proyecto.

## **10. Recuperación de Energía Calórica y su Aplicación en Procesos Industriales**

La creciente demanda energética global y la urgencia de mitigar el impacto ambiental de las fuentes de energía convencionales han impulsado un interés significativo en la recuperación y utilización eficiente de todas las formas de energía disponibles (Chen, Zhang, & Li, 2022). Dentro de este contexto, la energía térmica, omnipresente en diversos procesos naturales e industriales, representa una fuente sustancial que puede ser recuperada y convertida en trabajo útil u otras formas de energía, contribuyendo a la sostenibilidad energética y la reducción de emisiones (Dimitriev, 2023). La recuperación de calor residual se presenta como una necesidad apremiante, ya que diversos procesos industriales generan calor que puede ser aprovechado para aumentar la eficiencia y reducir los costos operativos (García Mogollón, 2019). En el caso de este proyecto, la recuperación de energía calórica generada por un filtro de armónicos mediante el uso del líquido dieléctrico TMC-1230 busca no solo optimizar la gestión térmica, sino también explorar su potencial reutilización, alineándose con estas tendencias de sostenibilidad.

### **Conversión de Energía Térmica en Trabajo Mecánico**

Diversas tecnologías permiten transformar la energía térmica en trabajo mecánico, abriendo oportunidades para su aprovechamiento en aplicaciones industriales. Por ejemplo, los motores térmicos basados en aleaciones con memoria de forma (SMA) aprovechan las transformaciones de fase reversibles inducidas por cambios de temperatura para generar trabajo mecánico, mostrando potencial en la conversión de energía geotérmica (Abubakar & Nuhu, 2024). Asimismo, existen otros convertidores termomecánicos que operan bajo diferentes principios físicos, ampliando las posibilidades de aplicación (Dimitriev, 2023). La recuperación y

conversión de energía térmica en trabajo útil y otras formas de energía son áreas de investigación y desarrollo fundamentales para avanzar hacia un sistema energético más sostenible (Chen et al., 2022; Olympios et al., 2021). Aunque este proyecto no se enfoca en la conversión termomecánica directa, estas tecnologías ofrecen un marco de referencia para explorar cómo el calor recuperado del filtro de armónicos (actualmente considerado una pérdida) podría utilizarse de forma complementaria. Por ejemplo, el sistema de enfriamiento con TMC-1230 podría acoplarse a módulos termoeléctricos o intercambiadores de calor que permitan precalentar fluidos industriales, reducir el consumo energético de otros procesos o alimentar subsistemas de baja demanda energética. Estas ideas no forman parte del diseño central del presente trabajo, pero se mencionan como proyección para estudios futuros orientados a un aprovechamiento energético integral del sistema.

### **Intercambiadores de Calor para la Recuperación de Calor Residual**

El diseño de intercambiadores de calor es fundamental para la recuperación de calor en diversas aplicaciones industriales, ya que permite transferir energía térmica de un medio a otro de manera eficiente. García Alba (2021) presenta un diseño para una planta de relicuefacción de GNL, abordando aspectos cruciales como la transferencia de calor por conducción y convección, y considerando diferentes tipos de intercambiadores, incluyendo los de carcasa y tubos y los compactos (García Alba, 2021). La selección adecuada de materiales también es esencial para garantizar la durabilidad y eficiencia de estos sistemas. Silva Ortega et al. (2018) destacan la ventaja de los intercambiadores de calor en dispositivos termoeléctricos por no tener piezas móviles, lo que reduce el desgaste y los costos de mantenimiento. Para el modelado de estos sistemas, se consideran supuestos importantes, como el comportamiento de los gases de escape como gases ideales (Silva Ortega et al., 2018). La aplicación de estos estudios a motores estacionarios, que manejan potencias de salida mayores que las aplicaciones vehiculares, presenta un alto potencial de recuperación energética (Silva Ortega et al., 2018). En el contexto de este proyecto, se propone un esquema básico de transferencia térmica mediante un tubo de cobre en espiral sumergido en el líquido dieléctrico TMC-1230, con circulación de TMC-1230 en su interior. Aunque esta configuración no corresponde a un intercambiador de calor industrial convencional, se basa en los mismos principios

físicos de conducción y convección estudiados en los trabajos de García Alba (2021) y Silva Ortega et al. (2018). Esta solución experimental permite validar, a pequeña escala, la factibilidad de recuperar parte de la energía térmica disipada por los componentes del filtro, sin necesidad de implementar un sistema complejo en esta etapa. Su simplicidad responde a los alcances y recursos disponibles del proyecto, y sienta las bases para el desarrollo de sistemas más sofisticados en estudios posteriores.

En la industria textil, Samaniego Corella (2020) aborda el diseño de sistemas de recuperación de energía a partir de purgas de calderos, considerando el uso de un tanque flash y un intercambiador de calor para la recuperación de agua y energía (Samaniego Corella, 2020). La implementación de estas tecnologías busca contribuir a un efectivo ahorro de agua y energía dentro de los procesos industriales (Samaniego Corella, 2020). De manera similar, Pérez Rojas (2021) presenta el diseño y construcción de un prototipo para la recuperación de calor residual en un calderín pirotubular, utilizando métodos experimentales y cuantitativos. Las pruebas realizadas en el prototipo demostraron un incremento en la temperatura del aire frío, validando el diseño para la recuperación de calor residual (Pérez Rojas, 2021). Estos ejemplos refuerzan la viabilidad de aplicar conceptos similares en el proyecto actual, donde la recuperación de calor del filtro de armónicos mediante un sistema de convección natural podría escalarse a aplicaciones industriales más amplias.

En general, la recuperación de calor residual no solo tiene un efecto económico al reducir el consumo de energía, sino que también incorpora un impacto positivo en la sociedad al influir directamente sobre el medio ambiente mediante la disminución de emisiones de gases como SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (Pérez Rojas, 2021). La implementación de sistemas de recuperación de calor, como intercambiadores de calor, tanques flash y ciclos combinados, se recomienda para aprovechar el potencial energético del calor residual en diversos procesos industriales (Pérez Rojas, 2021). Este enfoque se alinea con los objetivos del proyecto, que busca justificar un retorno de inversión mediante la reutilización de la energía calórica disipada por el filtro, contribuyendo a la sostenibilidad y la eficiencia energética.

## **11. Innovación, sostenibilidad e impacto del proyecto**

El proyecto introduce una solución experimental basada en el uso del TMC-1230 como medio de enfriamiento líquido por inmersión en filtros de armónicos, con el objetivo de mejorar la disipación térmica sin depender de métodos convencionales activos. Esta estrategia puede contribuir a aumentar la vida útil de los componentes del filtro, reducir fallos y mantener la estabilidad del sistema bajo condiciones de carga no lineal.

Además, el enfoque pasivo y bifásico del sistema de enfriamiento, inspirado en estudios sobre centros de datos y electrónica de potencia, sugiere una posible disminución en el consumo energético y en la necesidad de mantenimiento. Aunque estos beneficios han sido más estudiados en otras aplicaciones, se exploran aquí como una propuesta adaptable al contexto de filtrado de armónicos en sistemas industriales.

Al alinearse con normativas como la IEEE 519-2014 y proponer una alternativa de mitigación y refrigeración combinadas, el proyecto plantea una mejora potencial en eficiencia y confiabilidad, especialmente en entornos de alta demanda eléctrica.

## **12. Contexto técnico y tendencias complementarias**

Desde una perspectiva más amplia, la gestión térmica de convertidores trifásicos en sistemas de electrónica de potencia es un aspecto crítico, especialmente bajo condiciones de alta corriente y frecuencia, donde los inductores pueden estar expuestos a cargas térmicas considerables. Rahman et al. (2024) señalan que la alta densidad de potencia en convertidores modernos ha incrementado la complejidad del control térmico, mientras que Romero Daza (2020) discute cómo las corrientes armónicas elevan las pérdidas térmicas en componentes inductivos de filtros pasivos. Además, Delette et al. (2022) subrayan la importancia de controlar los gradientes térmicos en componentes magnéticos como transformadores, cuyas condiciones de operación comparten similitudes con los inductores en términos de materiales y esfuerzos térmicos.

Adicionalmente, se exploraron materiales alternativos y tendencias emergentes que podrían complementar el uso del TMC-1230. El efecto piel provoca

un aumento en la resistencia efectiva de los conductores, lo que se vuelve especialmente crítico en aplicaciones como filtros de armónicos con conmutación rápida o componentes sujetos a armónicos de alta frecuencia. Para mitigar estas pérdidas, Delette et al. (2022) destacan el uso de múltiples hilos finos aislados, como los empleados en configuraciones de alambre Litz, que permiten que cada hilo tenga un diámetro menor que la profundidad de penetración de la corriente, disminuyendo así la resistencia en corriente alterna (CA). Romero Daza (2020) ilustra cómo esta relación aumenta con la frecuencia, destacando la necesidad de soluciones conductoras especializadas en bobinas de alta frecuencia.

Delette et al. (2022) también mencionan avances en la fabricación de componentes de ferrita sinterizada, destacando técnicas como el moldeo por inyección de polvo, que permiten obtener geometrías complejas con paredes delgadas y cavidades internas. Estas características estructurales pueden favorecer la gestión térmica en aplicaciones de electrónica de potencia, como transformadores, y potencialmente en inductores de filtros de armónicos. Por otro lado, Romero Daza (2020) analiza el uso de reactores en filtros pasivos de armónicos, aunque no detalla las propiedades magnéticas o térmicas específicas de los materiales utilizados en sus núcleos. Aunque las fuentes no proporcionan valores exactos de conductividad térmica ni mencionan explícitamente el uso de ferritas avanzadas en filtros de armónicos de alta densidad energética, los desarrollos señalados sugieren un interés creciente en mejorar el rendimiento térmico de componentes magnéticos para aplicaciones con altas exigencias térmicas.

### **13. Limitaciones y áreas por explorar**

A pesar de las ventajas del TMC-1230, persisten riesgos y áreas por desarrollar. La interacción entre el fluido y las bobinas no incluye aún un análisis exhaustivo de la conductividad térmica de los materiales ni el impacto de la rugosidad o modificación de superficies en la transferencia de calor, aspectos sugeridos como áreas de optimización por Doran (2019) y Ristic-Smith y Rogers (2024). Asimismo, la escalabilidad a condiciones extremas, como filtros de mayor potencia ( $>100$  A) o frecuencias más altas ( $>5$  kHz), requiere un análisis más profundo para garantizar su eficacia en escenarios industriales avanzados, como se plantea por Rahman et al. (2024). Finalmente, no se han analizado aspectos prácticos clave, como el costo del

fluido, la complejidad asociada al diseño de un sistema de inmersión (por ejemplo, sellado y manejo de la presión de vapor a 41 kPa), o los requisitos de mantenimiento, factores esenciales para determinar su implementación en aplicaciones reales (TMC Industries, Inc., s.f.-a).

## 14. Herramientas

### ETAP

El Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) es una herramienta de simulación ampliamente reconocida para el análisis, diseño y operación de sistemas eléctricos, destacándose por su capacidad para modelar y simular redes de potencia con alta precisión. Según Solís-Ortega et al. (2025), ETAP ha sido utilizado para modelar y simular redes de distribución eléctrica en Costa Rica, particularmente en escenarios con alta penetración de generación distribuida (GD), como paneles solares. A continuación, se describen las capacidades de ETAP en simulaciones eléctricas, con énfasis en el modelado de sistemas trifásicos, el cálculo de distorsión armónica total (THD) y el análisis de impedancias, basadas en el mencionado estudio.

### Modelado de Sistemas Trifásicos

ETAP permite modelar sistemas trifásicos, monofásicos y bifásicos con gran detalle, siendo ideal para redes de distribución complejas. Solís-Ortega et al. (2025) detallan que, para modelar una red de media tensión en Costa Rica, ETAP incorporó elementos como barras, nodos, cables, transformadores, cargas dinámicas y estáticas, generadores y dispositivos de protección, cada uno con parámetros específicos. Por ejemplo:

- **Barras y nodos:** Se configuran con información sobre tipo de conexión (trifásica, monofásica o bifásica), conexión de fases, capacidades de cortocircuito y coordenadas georreferenciadas.
- **Cables y líneas de distribución:** Incluyen datos como material del conductor, calibre, impedancia de secuencia y longitud, permitiendo modelar con precisión las características trifásicas.
- **Transformadores:** Se modelan con detalles como tipo de conexión, impedancias de secuencia, relación X/R y número de devanados, soportando configuraciones trifásicas y monofásicas.

## **Cálculo de Distorsión Armónica Total (THD)**

ETAP es conocido por sus módulos de análisis armónico, esenciales en redes con GD debido a los armónicos introducidos por inversores y cargas no lineales. Estos módulos permiten:

- **Cálculo de THD:** Evalúa la distorsión armónica total en tensión y corriente en nodos específicos, identificando el impacto de fuentes no lineales.
- **Modelado de fuentes armónicas:** Configura generadores distribuidos, como paneles solares, con perfiles armónicos basados en estándares (e.g., IEC o IEEE).
- **Mitigación de armónicos:** Facilita el diseño de filtros para cumplir con límites de distorsión, como los de IEEE 519.

En el caso de estudio, con 1343 paneles solares modelados (Solís-Ortega et al., 2025), el análisis de THD sería relevante para evaluar la calidad del suministro, especialmente en la fase C, que mostró mayores sobretensiones. La capacidad de ETAP para integrar datos climáticos (e.g., irradiancia de la NSRDB) en simulaciones de series de tiempo sugiere su potencial para correlacionar generación solar con variaciones armónicas.

## **Análisis de Impedancias**

ETAP destaca en el análisis de impedancias, fundamental para estudiar redes de distribución. Solís-Ortega et al. (2025) explican que ETAP calculó impedancias de secuencia para elementos como cables, líneas, transformadores y generadores.

## **Microsoft Excel**

Microsoft Excel es una herramienta ampliamente reconocida en ingeniería para organizar, procesar y visualizar datos. En el proyecto, Excel se propone como solución para gestionar datos experimentales y simulados, creando tablas estructuradas y gráficas que faciliten el análisis de datos.

## **Capacidades de Excel**

- **Tablas de datos:** Organiza datos en filas y columnas, con soporte para cálculos automáticos (e.g., PROMEDIO, SUMA) y filtrado.

- **Gráficas:** Genera gráficos de dispersión, líneas y barras para visualizar tendencias (e.g., temperatura vs. potencia).
- **Procesamiento:** Permite cálculos estadísticos y matemáticos simples, ideales para datos experimentales.
- **Compatibilidad:** Facilita la importación de datos desde equipos de medición y la exportación de resultados a informes.

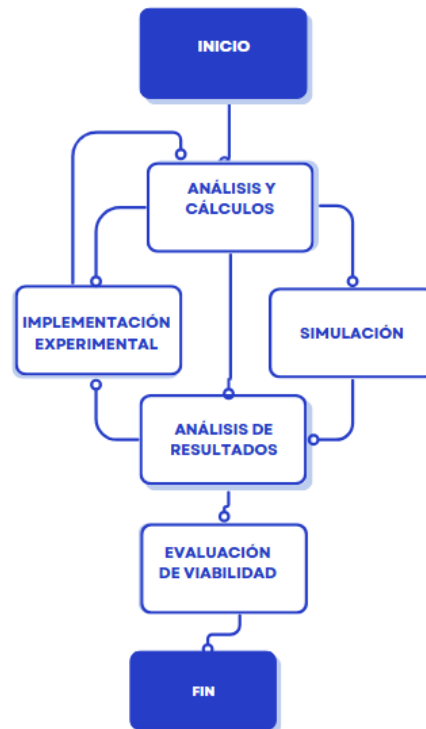
### **Ventajas**

- **Simplicidad:** Interfaz intuitiva para organizar y visualizar datos sin programación avanzada.
- **Flexibilidad:** Maneja datos eléctricos, térmicos y energéticos en un solo entorno.
- **Visualización:** Genera gráficas claras para comunicar resultados a audiencias técnicas.

Excel se propone como una herramienta clave para tabular datos y generar gráficas que ilustran el desempeño del sistema, complementando las simulaciones de ETAP. Su accesibilidad y capacidad de visualización lo hacen ideal para el análisis de resultados en este proyecto, con potencial para integrarse con herramientas como Python en futuras iteraciones para mayor automatización.

## Metodología

Ilustración 3. Diagrama de flujo de la metodología



Fuente: Elaboración propia.

### Análisis y Cálculos

#### Explicación del modelo utilizado en Análisis y Cálculos y su justificación:

En la etapa de Análisis y Cálculos, se emplea un modelo analítico basado en principios fundamentales de termodinámica y electrodinámica para realizar los cálculos preliminares. Este enfoque se estructura a partir de datos operativos reales (corrientes, voltajes, THD) y parámetros obtenidos de tablas del National Electrical Code (NEC), combinados con la temperatura ambiente de Curridabat (20 °C) como referencia. El modelo consiste en calcular la potencia disipada mediante la fórmula  $P = I^2R$ , donde I representa la corriente y R la resistencia del conductor, ajustada como variable dependiente de la temperatura según el coeficiente de temperatura del material. Además, se estima el aumento de temperatura en las bobinas inductivas sin enfriamiento líquido usando el equilibrio térmico  $Q = m c \Delta T$ , considerando la energía térmica generada y la disipación al ambiente. Para incluir el efecto del TMC-1230, se incorporan supuestos de transferencia de calor por convección, estimando la reducción de temperatura basada en las propiedades térmicas del líquido dieléctrico

reportadas en la literatura. Finalmente, se complementa con simulaciones básicas de impedancia efectiva para correlacionar el rendimiento del filtro.

Este modelo se elige por su simplicidad y adecuación al contexto del proyecto, permitiendo estimaciones iniciales con datos disponibles sin requerir software especializado en esta fase. La justificación radica en que los cálculos se basan en mediciones reales y estándares industriales (NEC), asegurando precisión y relevancia para un sistema trifásico. Además, la incorporación de simulaciones de impedancia sirve como puente hacia las etapas posteriores de simulación y pruebas experimentales, facilitando una transición lógica en la metodología. Este enfoque analítico resulta suficiente para establecer las bases térmicas y eléctricas necesarias antes de avanzar a diseños y pruebas más detallados.

### **Actividades**

#### **1. Recopilación de datos reales:**

- Se recopilarán datos operativos de cargas trifásicas, como corrientes, voltajes, y mediciones de niveles de distorsión armónica total (THD).
- Se consultarán tablas del National Electrical Code (NEC) para obtener valores de resistencias de conductores y capacidades de corriente según calibre. Estos datos serán usados en cálculos venideros. Estas tablas se incluirán en los anexos.
- Se buscarán datos de temperatura ambiente promedio en Curridabat (20 °C, según anexo), que servirán como referencia para cálculos térmicos.

#### **2. Cálculos preliminares:**

- Cálculo de la potencia disipada, y su relación con la temperatura del conductor. Algunos puntos relevantes son: Energía térmica generada, aumento de temperatura, disipación de calor y equilibrio térmico, resistencia variable del conductor.
- Estimar el aumento de temperatura en las bobinas inductivas, sin enfriamiento líquido.
- Estimar el comportamiento de la temperatura en las bobinas inductivas al estar sumergidas en el líquido.

- Complementar con simulaciones para correlacionar la impedancia con el rendimiento del filtro.

### **3. Diseño del esquema de pruebas:**

- Diseñar un montaje experimental para evaluar la disipación térmica del líquido dieléctrico TMC-1230 en comparación con el enfriamiento por aire, utilizando bombillos incandescentes como fuente de calor.
- Definir las variables a medir.
- Especificar el procedimiento para realizar las pruebas.

## **Simulaciones**

### **Objetivo de la simulación**

Modelar el comportamiento eléctrico del filtro de armónicos con y sin las condiciones que aporta el enfriamiento líquido, evaluando el THD A.

### **Actividades**

#### **Simulación eléctrica:**

- Utilizar el software ETAP para modelar el sistema trifásico.
- Simular corrientes armónicas generadas en el sistema.
- Evaluar el THD tras implementar un filtro pasivo de armónicos en un sistema con cargas afectadas por corrientes armónicas.
- Iterar las mediciones de armónicos, ajustando valores de inductancia y capacitancia del filtro, y así poder observar su comportamiento.

## **Implementación Experimental**

### **Objetivo**

Construir y probar un prototipo de enfriamiento por inmersión y transferencia de calor, para las pruebas relacionadas a la disipación y recuperación de energía.

## Actividades

### Montaje del sistema experimental:

- Implementar el esquema experimental:
  - Bombillos incandescentes: Se utilizará un circuito compuesto por tres bombillos incandescentes conectados en paralelo, los cuales funcionarán como la carga principal. Esta carga será controlada mediante un dimer, lo que permitirá regular la potencia térmica generada. Este montaje es útil porque los bombillos actúan como una fuente de calor controlable, lo cual resulta adecuado para analizar el comportamiento térmico del sistema. Además, permite establecer una analogía con las bobinas de un filtro de armónicos, que son los principales generadores de calor en esa aplicación. Variables como el área de contacto, la temperatura y otros parámetros relevantes podrán registrarse para efectos comparativos y de modelado.
    - Dimer: Este dimer controlará los valores de carga del sistema, con los que podemos regular la corriente y la temperatura de la fuente de calor (Los tres bombillos)
    - TMC-1230: Líquido dieléctrico en el cual se sumergirá la fuente de calor en un contenedor de vidrio aislado térmicamente.
    - Manguera/Tubo en espiral: Actúa como intercambiador de calor, hecha con un tubo de cobre de media pulgada, y con longitud de 2.4 m.
    - Contenedor secundario con agua: Enfría el TMC-1230 por convección natural y contiene 6 litros de agua. Este contenedor también está aislado.
- Asegurar el cumplimiento de las medidas de seguridad y condiciones a las que debe estar el sistema.

### 2. Pruebas experimentales:

- **Medición de temperatura:** Se realizarán mediciones de temperatura en los bombillos con el uso de un termómetro, las primeras pruebas se realizarán con los bombillos expuestos al aire libre, y para

diferentes valores de corriente controlados por medio del dimer. Posteriormente se harán nuevamente las mediciones de temperatura en los bombillos una vez estos se encuentren sumergidos en TMC-1230 en el contenedor 1, e igualmente se evaluará para diferentes valores de corriente controlados con el dimer.

- **Pruebas de recuperación de calor:** Registrar el comportamiento de la temperatura del agua en el contenedor secundario. Estos datos se toman cada vez que el sistema ha alcanzado la temperatura de equilibrio

### 3. **Seguridad y manejo:**

- Seguir las recomendaciones de seguridad del TMC-1230: usar guantes, gafas, y usar mascarilla para evitar inhalación de vapores.
- Prevenir derrames y almacenar el fluido según las indicaciones de TMC Industries.

## **Análisis de Resultados**

El objetivo de este análisis es procesar los datos de cálculos, simulaciones y pruebas experimentales para evaluar la efectividad del uso del enfriamiento líquido, de acuerdo con los objetivos del proyecto.

### **Actividades**

#### 1. **Análisis eléctrico:**

- Comparar el THD medido en las pruebas experimentales con filtros instalados en los compresores, con los valores obtenidos mediante simulación. El objetivo es evaluar la reducción de la distorsión armónica considerando cómo varía la impedancia del filtro como resultado del aumento de temperatura, según los cálculos matemáticos realizados sobre dicha dependencia térmica.
- Analizar la correlación entre la temperatura de las bobinas y la impedancia, usando los datos experimentales y la ecuación de resistencia variable.

#### 2. **Análisis térmico:**

- Calcular la eficiencia de disipación térmica del TMC-1230, comparando las temperaturas alcanzadas.
- Evaluar la energía térmica recuperada en el contenedor de agua, estimando su potencial para aplicaciones industriales (por ejemplo, precalentamiento de fluidos).

### 3. **Procesamiento estadístico:**

- Aplicar análisis estadístico (media, desviación estándar) a los datos de temperatura y THD para garantizar la fiabilidad de los resultados.

### 4. **Documentación:**

- Elaborar gráficos y tablas comparativas que muestren el comportamiento de THD, temperatura, y energía recuperada.
- Incluir un análisis cualitativo sobre la sostenibilidad y los beneficios ambientales del sistema.

## **Evaluación de Viabilidad**

### **Objetivo**

Determinar la viabilidad técnica y financiera del enfriamiento líquido en un filtro de armónicos, justificando su implementación en entornos industriales.

### **Actividades**

#### 1. **Viabilidad técnica:**

- Evaluar la escalabilidad del sistema para corrientes > 100 A, identificando limitaciones (por ejemplo, manejo de presión de vapor del TMC-1230).
- Comparar el rendimiento del filtro con estándares industriales (IEEE 519-2014) y con métodos tradicionales de enfriamiento.

## Recomendaciones:

Proponer mejoras al diseño, como optimización de superficies para la ebullición nucleada o integración de intercambiadores de calor más eficientes, uso de la ebullición bifásica.

## Análisis y Cálculos

### Datos operativos

A continuación, se detallan los datos eléctricos operativos utilizados para la comprobación del desempeño de los filtros de corrientes armónicas instalados en un sistema de compresores con variadores de frecuencia de 350 HP. Estos datos fueron obtenidos de los estudios técnicos realizados por la empresa APAME, como parte de una solución implementada el año 2024 ante la presencia de altos niveles de distorsión armónica en el sistema. En dicho proceso, se presentaron fallas en equipos electrónicos posiblemente asociadas a la calidad de energía; por ello, se realizaron mediciones de variables eléctricas, incluyendo espectros armónicos de tensión y corriente, así como simulaciones y análisis que permitieron identificar como principales generadores de armónicos a dos compresores con variadores de frecuencia. A partir de estos estudios se elaboraron análisis, estudios de calidad, y reportes técnicos que incluyeron tabulaciones y mediciones. Muchos de estos datos se muestran a continuación, y son de gran importancia para tener un marco de referencia real.

*Tabla 2. Datos Eléctricos Operativos*

<b>Equipo:</b>	<b>Variador Siemens SINAMICS G130</b>	<b>Filtro Pasivo MTE Matrix AP</b>
Tensión:	480 V, 3F	480 V, 3F
Motor HP:	350 HP	400 HP
Corriente máxima:	492 A	482 A*
Frecuencia base:	60 Hz	60 Hz
Tipo de variador:	Rectificador de 6 pulsos	Rectificador de 6 pulsos

Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

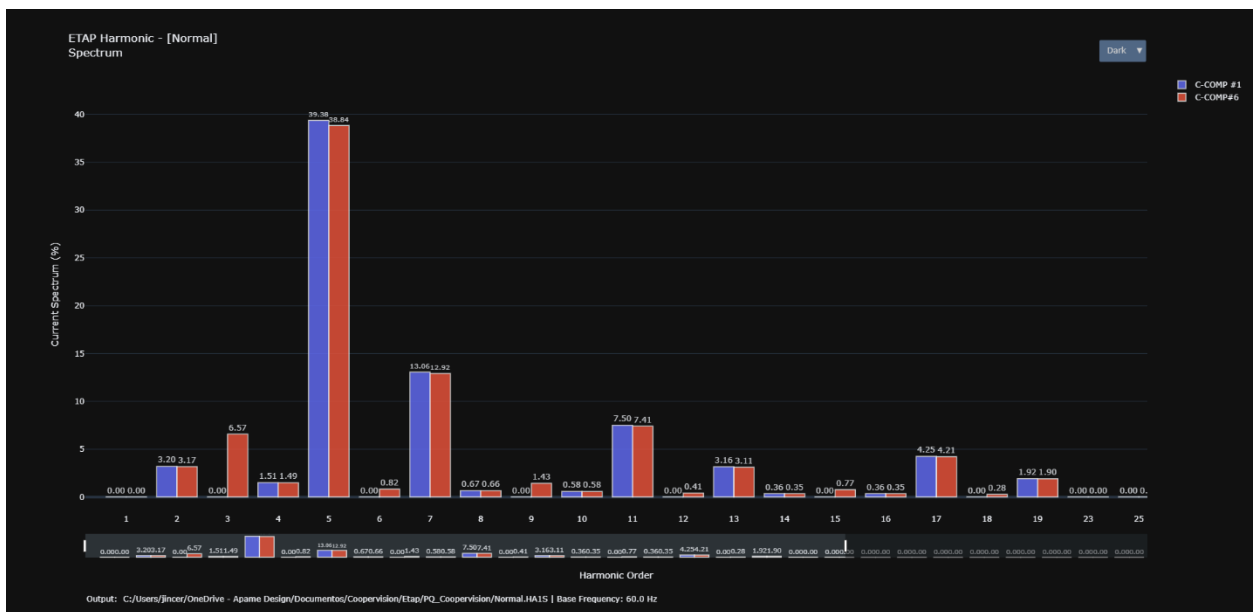
\*La corriente máxima del filtro es levemente superior a la corriente máxima indicada por la placa del compresor. De las mediciones realizadas, se determinó que la corriente máxima consumida por los compresores de acuerdo con la operación actual es de 302 A.

**Comparativa de las condiciones de distorsión armónica en corriente y tensión, anterior y posterior a la instalación de los filtros Matrix en los compresores (Información obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.)**

<b>Tipo de sistema</b>	Trifásico, conexión en estrella 277/480V.
<b>Parámetros medidos</b>	Potencia, Distorsión Armónica en Tensión y Corriente.
<b>Equipo medición</b>	Power Quality Analyzer FLUKE 435

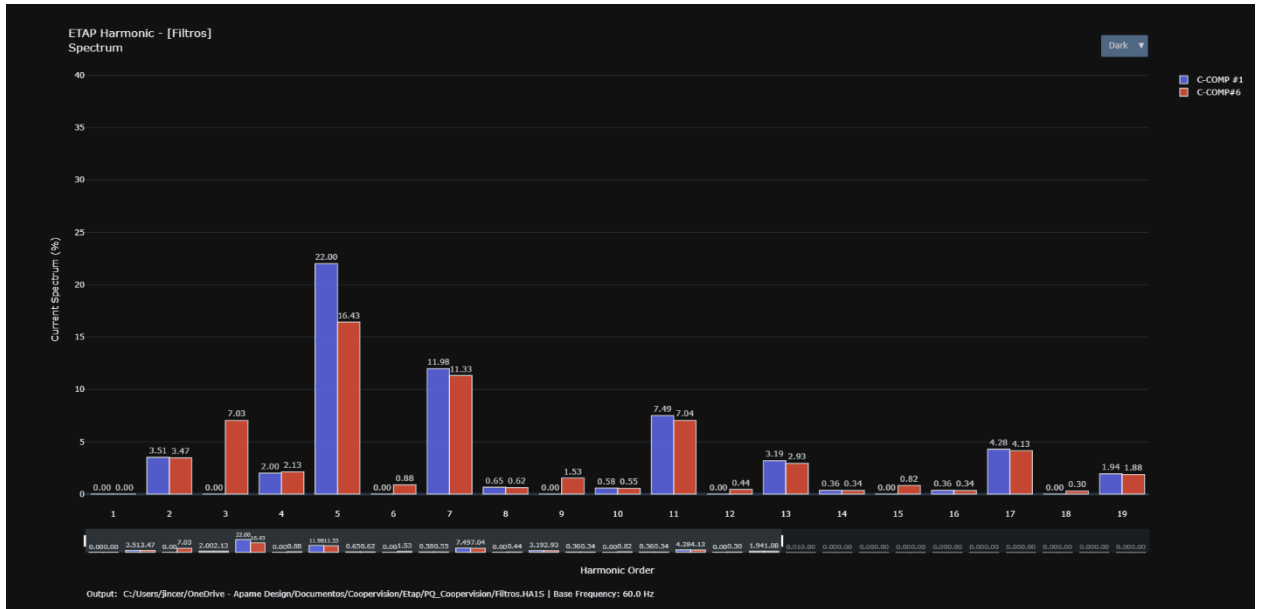
**Resultados de simulaciones**

*Ilustración 4. Distorsión armónica de corriente en compresores, sin filtros.*



Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

*Ilustración 5. Distorsión armónica de corriente en compresores, con filtros instalados.*



Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

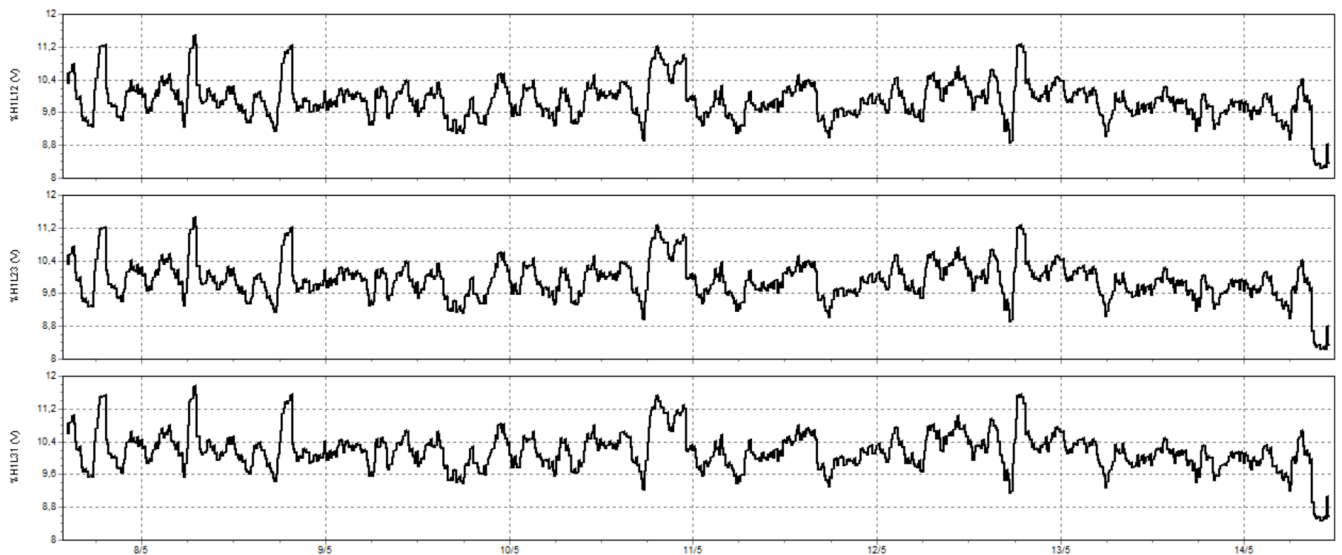
Los siguientes resultados corresponden al promedio de los periodos completos de medición:

Tabla 3. Mediciones de THD previas a la instalación de los filtros.

Indicador	Potencia Aparente KVA	THD V L1	THD V L2	THD V L3	THD A L1	THD A L2	THD A L3
Promedio 10m	130,10	9,91%	9,94%	10,19%	47,21%	44,24%	45,60%
Máximo Promedio 10m	259,70	11,48%	11,46%	11,76%	61,17%	59,05%	61,75%

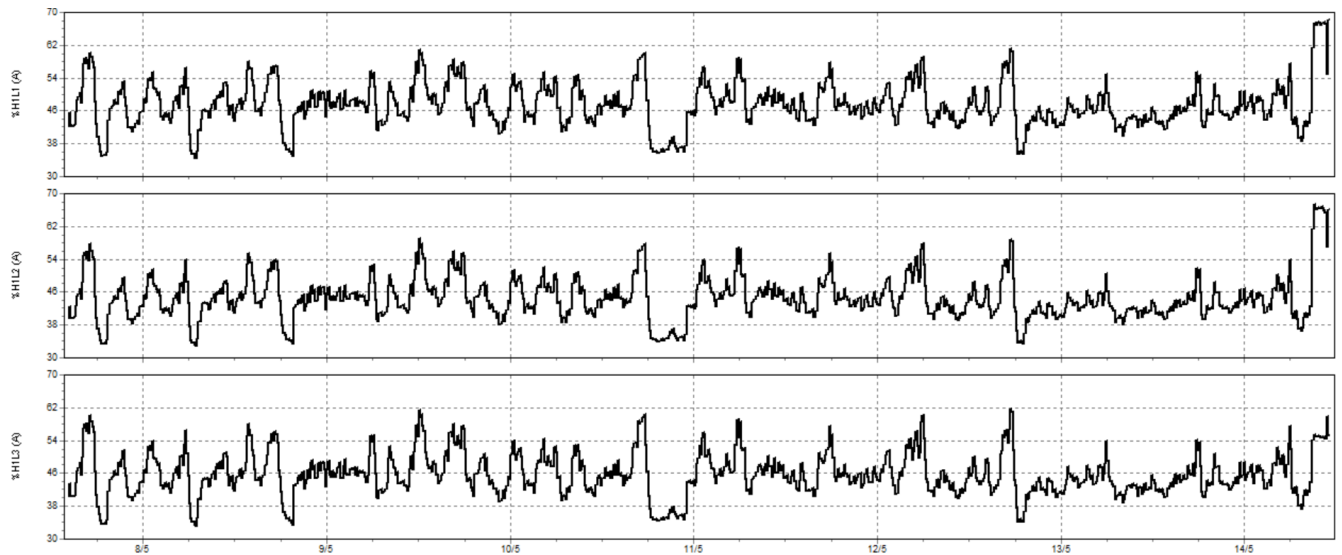
Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

Ilustración 6. Comportamiento del THD V previo a la instalación del filtro.



Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

Ilustración 7. Comportamiento del THD I previo a la instalación del filtro.



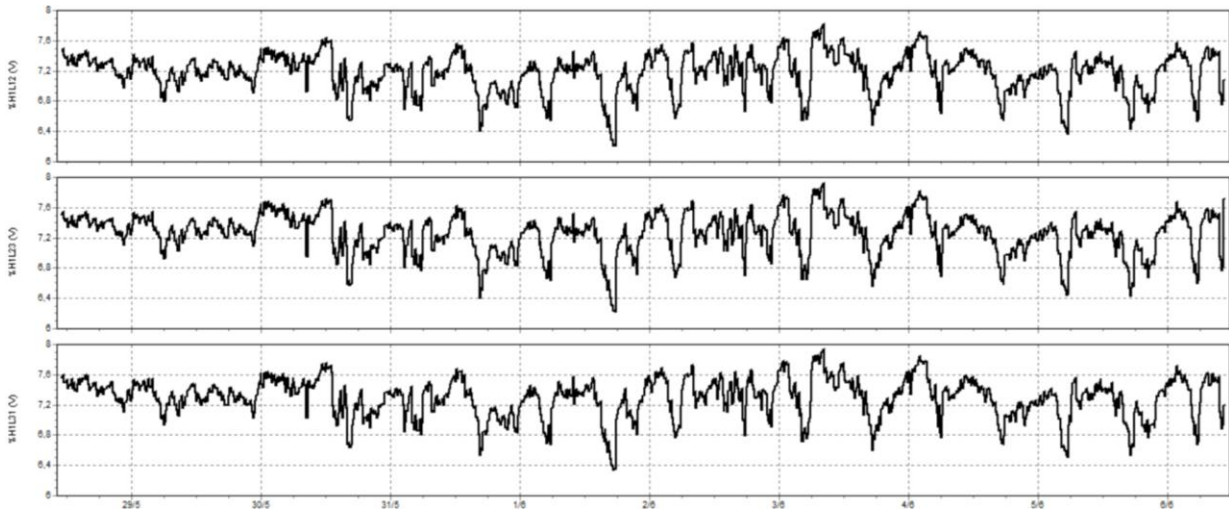
Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

Tabla 4. Mediciones de THD previas a la instalación del filtro.

Indicador	Potencia Aparente KVA	THD V L1	THD V L2	THD V L3	THD A L1	THD A L2	THD A L3
Promedio 10m	194,6	7,17%	7,25%	7,29%	20,32%	18,36%	20,74%
Máximo Promedio 10m	322,4	7,82%	7,92%	7,94%	41,46%	39,57%	42,12%

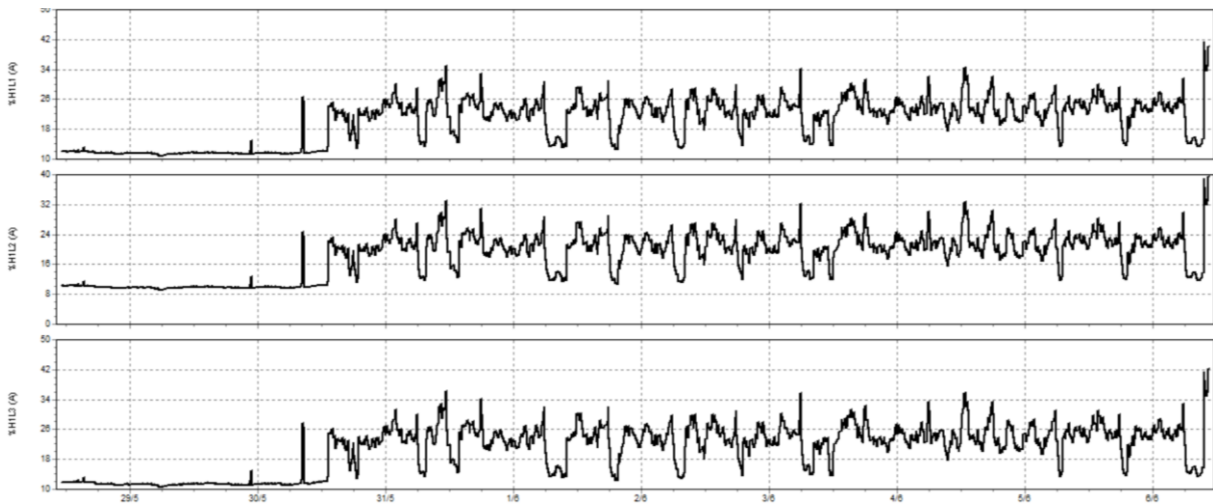
Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

*Ilustración 8. Comportamiento del THD V posterior a la instalación del filtro.*



Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

*Ilustración 9. Comportamiento del THD I posterior a la instalación del filtro.*



Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

Además, de estos periodos de medición se toman tres intervalos en los que el compresor se encontraba operando en la misma condición de carga, para realizar la comparación del desempeño con mayor objetividad:

*Tabla 5. Valores de potencia aparente, THD V y THD A previos a la instalación del filtro.*

Indicador	Potencia Aparente KVA	THD V L1	THD V L2	THD V L3	THD A L1	THD A L2	THD A L3
	89,0	9,14%	9,17%	9,39%	54,32%	50,02%	53,26%
<b>Promedio 10m</b>	107,8	9,47%	9,49%	9,73%	50,86%	46,86%	48,76%
	249,0	11,20%	11,17%	11,47%	35,63%	33,72%	34,27%

Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

*Tabla 6. Valores de potencia aparente, THD V y THD A posteriores a la instalación del filtro.*

Indicador	Potencia Aparente KVA	THD V L1	THD V L2	THD V L3	THD A L1	THD A L2	THD A L3
	89,4	7,08%	7,20%	7,25%	34,11%	32,27%	35,65%
<b>Promedio 10m</b>	107,8	6,61%	6,65%	6,73%	28,97%	27,10%	29,95%
	249,4	7,41%	7,49%	7,55%	14,29%	12,51%	14,44%

Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

### **Explicación del esquema experimental para las pruebas prácticas**

El esquema experimental diseñado para este Trabajo Final de Graduación tiene como propósito evaluar el comportamiento térmico del líquido dieléctrico TMC-1230 como medio de disipación de calor en aplicaciones eléctricas. Uno de los objetivos principales es determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección (h) del TMC-1230, utilizando una fuente de calor controlada que simula las condiciones térmicas generadas por las bobinas de un filtro de armónicos en operación. Para ello, se implementa un sistema de inmersión con enfriamiento secundario por agua, basado en convección natural. A través de este experimento, también se busca establecer una relación entre las temperaturas de equilibrio alcanzadas en los contenedores primario y secundario, con el fin de estimar la energía térmica transferida y analizar su potencial aprovechamiento. A continuación, se describe de manera detallada y estructurada:

#### **Componentes del sistema**

- **Fuente de calor controlada:**

Tres bombillos incandescentes de 100 W conectados en paralelo,

controlados por un dimer para regular la potencia y la generación de calor, actuando como la carga principal del sistema.

- **Contenedor principal con TMC-1230:**

Un contenedor de vidrio térmicamente aislado que contiene el líquido dieléctrico TMC-1230, en el cual se sumergen completamente los bombillos incandescentes para absorber el calor generado.

- **Tubo de cobre en espiral:**

Un tubo de cobre de 0.5 pulgadas de diámetro y 2.4 m de longitud, dispuesto en forma de espiral dentro de un contenedor secundario. Este tubo transporta el TMC-1230 caliente desde el contenedor principal, actuando como intercambiador de calor. Se seleccionó el tubo de cobre gracias a su alta capacidad de transferir calor. Su conductividad térmica es de 401 W/mK (Anexo 10).

- **Contenedor secundario con agua:**

Un contenedor térmicamente aislado con 6 litros de agua a temperatura ambiente, donde el tubo en espiral permite la transferencia de calor del TMC-1230 al agua por convección natural, enfriando el líquido dieléctrico antes de su retorno al contenedor principal.

- **Aislante térmico:** Con el objetivo de minimizar las pérdidas de calor y energía, ambos contenedores, primario y secundario, serán sellados por los lados y por abajo con espuma expansiva (Poliuretano) la cual funciona como aislante ya que tiene una conductividad térmica de 0.022-0.028 W/mK (Anexo 11).

## Principio de funcionamiento

El sistema opera mediante un ciclo térmico impulsado por convección natural:

- Los bombillos incandescentes, al operar con la potencia controlada por el dimer, generan calor debido a la conversión de energía eléctrica en energía térmica.
- El TMC-1230, en contacto directo con los bombillos dentro del contenedor principal, absorbe este calor, aumentando su temperatura y reduciendo su densidad.
- El TMC-1230 calentado asciende por convección natural y fluye hacia el tubo de cobre conectado al contenedor principal.
- A través del tubo en espiral, ubicado dentro del contenedor secundario, el TMC-1230 caliente transfiere su energía térmica al agua circundante, que se encuentra a una temperatura inicial más baja (20 °C, según datos de Curridabat).
- Una vez enfriado, el TMC-1230, ahora más denso, regresa al contenedor principal a través del tubo, completando el ciclo y manteniendo un flujo continuo sin necesidad de bombas o componentes mecánicos adicionales.

## Relación entre temperatura y potencia disipada.

### Potencia disipada (Watts):

La potencia disipada por el efecto Joule se calcula como:

*Ecuación 1* 
$$P = I^2 * R$$

Donde:

- P es la potencia en watts,
- I es la corriente (amperios),
- R es la resistencia (ohmios).

\* 1 W = 1 J/s.

### **Energía térmica generada:**

La energía térmica total Q generada durante un tiempo t en segundos es:

*Ecuación 2* 
$$Q = P * t = I^2 * R * t$$

Esta energía térmica es la que eleva la temperatura del conductor.

### **Aumento de temperatura:**

La temperatura alcanzada por el conductor depende de su capacidad de absorber y disipar esta energía térmica. La relación entre la energía térmica Q y el cambio de temperatura Delta T se describe mediante la ecuación de calor específico:

*Ecuación 3* 
$$Q = m * c * \Delta T$$

Donde:

- m es la masa del conductor (en kg),
- c es la capacidad calorífica específica del material (en J/kg·°C),
- ΔT es el cambio de temperatura (en °C).

Combinando las ecuaciones (2) y (3) se plantea:

$$I^2 * R * t = m * c * \Delta T$$

Por medio del uso de propiedades matemáticas, se logra despejar el cambio de temperatura, y obtenemos la siguiente expresión:

*Ecuación 4* 
$$\Delta T = \frac{I^2 * R * t}{m * c}$$

Esto muestra que el aumento de temperatura es directamente proporcional a la potencia disipada ( $I^2 * R$ ) y al tiempo, e inversamente proporcional a la masa y la capacidad calorífica del conductor.

### Factores adicionales:

**Disipación de calor:** En un sistema real, la temperatura del conductor alcanza un equilibrio térmico cuando la potencia generada por el efecto Joule ( $P = I^2 R$ ) iguala la potencia disipada al entorno, principalmente por convección (y radiación, aunque la ignoraremos por ahora para simplificar, ya que la radiación suele ser menos significativa a temperaturas moderadas).

Ecuación 5 
$$Q_{conveccion} = h * A_s * (T_S - T_{\infty}) \quad (\zetaengel, 2007).$$

Donde:

- $Q_{conveccion}$  es la potencia disipada por convección (en watts).
- $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección (en  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).
- $A_s$  es el área superficial del conductor (en  $m^2$ ).
- $T_S$  es la temperatura de la superficie del conductor (en  $^\circ C$ ).
- $T_{\infty}$  ambiente es la temperatura de la corriente libre (en  $^\circ C$ ).

**Resistencia variable:** La resistencia  $R$  del conductor puede aumentar con la temperatura (debido al coeficiente de temperatura del material, como el cobre), lo que afecta la potencia disipada.

Ecuación 6 
$$R = R_{ref} [1 + \alpha (T - T_{ref})] \quad (Kuphaldt, 2022)$$

Donde:

- $\alpha$  = Coeficiente de temperatura de resistencia para el material del conductor.
- $R$  = Resistencia del conductor a la temperatura  $T$ .
- $R_{ref}$  = Resistencia del conductor a la temperatura de referencia  $T_{ref}$ , usualmente 20 grados Celsius.
- $T$  = Temperatura del conductor en grados Celsius.
- $T_{ref}$  = Temperatura de referencia a la que el coeficiente de temperatura está especificado para el material del conductor.

**Entorno:** Si el conductor está en un medio con enfriamiento, como es en este caso por el uso del líquido TMC-1230, la temperatura final será menor que en un entorno aislado.

### Ejemplo simplificado

Se supone un conductor de cobre (capacidad calorífica  $c = 385 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ) con una masa  $m = 0.1 \text{ kg}$ , una resistencia  $R = 0.1 \Omega$ , y una corriente  $I = 20 \text{ A}$ . La potencia disipada es:

$$P = I^2 * R = (20)^2 * 0.1 = 40 \text{ W}$$

Si esta potencia se aplica durante  $t = 60 \text{ s}$ , la energía térmica generada es:

$$Q = P * t = 40 \text{ W} * 60 \text{ s} = 2400 \text{ J}$$

Sin disipación de calor (caso ideal), el aumento de temperatura sería:

$$\Delta T = \frac{Q}{m*c} = \frac{2400 \text{ J}}{0.1 \text{ kg} * 385 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}} = 62.34 \text{ }^\circ\text{C}$$

### Cálculo de la temperatura de equilibrio de las bobinas al estar sumergidas en TMC-1230

Considerando la Ley de Newton del enfriamiento como

$$Q_{conveccion} = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

La potencia disipada por efecto Joule

$$P = I^2 * R$$

Y la resistencia variable del conductor

$$R = R_{ref} [1 + \alpha (T - T_{ref})]$$

Tenemos que:

$$I^2 * R_{ref} [1 + \alpha (T - T_{ref})] = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

Podemos partir de que  $T = T_s$ , ya que ambos hacen referencia a la temperatura del conductor.

$$I^2 * R_{ref} [1 + \alpha (T - T_{ref})] = h * A_s * (T - T_{\infty})$$

Si siguiendo una secuencia de despeje de ecuaciones, despejamos T:

$$I^2 * R_{ref} + I^2 * R_{ref} * \alpha * T - I^2 * R_{ref} * \alpha * T_{ref} = h * A_s * T - h * A_s * T_{\infty}$$

$$I^2 R_{ref} * \alpha * T - h * A_s * T = -h * A_s * T_{\infty} - I^2 * R_{ref} + I^2 * R_{ref} * \alpha * T_{ref}$$

Ecuación 7

$$T = \frac{-h * A_s * T_{\infty} - I^2 * R_{ref} + I^2 * R_{ref} * \alpha * T_{ref}}{I^2 * R_{ref} * \alpha - h * A_s}$$

De esta manera tenemos la función de la temperatura de equilibrio que alcanzan las bobinas en el entorno en que se encuentren, donde:

- I es la corriente (amperios).
- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección (en W/m<sup>2</sup>·°C).
- A<sub>s</sub> es el área superficial del conductor (en m<sup>2</sup>).
- T<sub>∞</sub> ambiente es la temperatura de la corriente libre (en °C).
- α = Coeficiente de temperatura de resistencia para el material del conductor.
- R<sub>ref</sub> = Resistencia del conductor a la temperatura de referencia T<sub>ref</sub>
- T<sub>ref</sub> = Temperatura de referencia a la que el coeficiente de temperatura está especificado para el material del conductor.

### **Cálculo de la temperatura de equilibrio en las bobinas del compresor de 350 HP, sin enfriamiento líquido.**

Para realizar los cálculos en este proyecto, es necesario estimar el calibre del cobre esmaltado de las bobinas inductivas del filtro, ya que este dato no está disponible en la ficha técnica del equipo. Según información de fabricantes de bobinas inductivas, los calibres típicos de cobre esmaltado usados en este tipo de aplicaciones varían entre AWG 5 y AWG 22, dependiendo de la corriente y las condiciones operativas. Dado que el filtro está diseñado para soportar corrientes a plena carga de hasta 482 A, se requiere un calibre capaz de manejar corrientes elevadas de manera segura. Dentro del rango mencionado, el calibre 5 AWG (diámetro aproximado de 4.62 mm) es el más grande y tiene una capacidad de corriente de hasta 125 A en

condiciones estándar (según tablas AWG para conductores de cobre a 90 °C). Para efectos de este análisis, se seleccionará el calibre 5 AWG como una aproximación inicial, reconociendo que esta elección busca simplificar los cálculos en ausencia de datos exactos.

Para un cable de cobre calibre 5 AWG, por medio de interpolación de datos del NEC 2020 Cap 9, Tabla 9, obtuvimos un valor de resistencia de 1.32Ω/km

Asimismo, las dimensiones exactas de las bobinas de este filtro se desconocen, por lo que, tomando las medidas del plano del filtro (Ver anexo 8), como referencia, se pudo aproximar las medidas de las bobinas de este filtro usando AutoCAD. De esta medición se obtuvo que son tres bobinas de forma rectangular, con 12cm de frente, 17.7cm de fondo y 20.8cm de altura. Con estos datos se calculó que cada una de las bobinas cuenta con 45 vueltas del cable, y que la longitud del cable en la bobina es de 26.76 m o 0.02676 km.

Para el cálculo de la corriente que pasa por las bobinas inductivas del filtro, calcularemos el porcentaje de THD A absorbido por el filtro. Antes del uso del filtro se registró un promedio de %THD A = 45.68%, y posterior a la instalación del filtro un promedio de %THD A = 19.8%. Por lo que el porcentaje promedio de THD absorbido por el filtro corresponde a %THD=25.88%.

La corriente correspondiente al máximo consumido por los compresores con la operación actual registrada es de 302 A. Con esta información, determinamos la corriente que circula por las bobinas de la siguiente manera:

$$I_{bobinas} = 302A * 25.88\% = 78.16 A$$

Para el cálculo del área externa o área superficial de las bobinas, se toma cada bobina como un cubo con las medidas reales, 12cm de ancho, 17.7 cm de profundidad y 20.8 cm de altura, por lo que:

$$Area = 2 * (0.177m * 0.208m + 0.12m * 0.208m) = 0.1235m^2$$

$$As = 3 * (0.1235m^2) = 0.3707m^2$$

Se sabe que el diámetro del conductor de cobre estañado calibre 5 es de 4.68 mm, asimismo se conoce que el largo de una sola vuelta del conductor en la bobina corresponde a 594 mm, y que la altura de la bobina es de 208 mm. Por lo tanto, se pudo determinar la cantidad de vueltas que tiene el cable conductor para formar cada bobina, este dato corresponde a 45 vueltas

Retomando el cálculo de la temperatura de equilibrio en las bobinas, representado por la fórmula (6), tenemos que:

$$T = \frac{-h * A_s * T_{\infty} - I^2 * R_{ref} + I^2 * R_{ref} * \alpha * T_{ref}}{I^2 * R_{ref} * \alpha - h * A_s}$$

Donde:

- $I = 78.16 \text{ A}$  (La  $I$  que pasa por las bobinas del filtro)
- $h = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$  (Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire) (Anexo 4).
- $A_s = 0.3707 \text{ m}^2$  (Contempla las tres bobinas).
- $T_{\infty} = 20 \text{ °C}$  (Anexo 9).
- $\alpha = 0.004041$  (Coeficiente de temperatura de resistencia para el cobre) (Anexo 6).
- $R_{ref} = 0.106 \text{ } \Omega$  (Contempla las tres bobinas)
- $T_{ref} = 20 \text{ °C}$  (Anexo 6)

Por lo que:

$$T = \frac{-25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} * 0.3707 \text{ m}^2 * 20 \text{ °C} - (78.16 \text{ A})^2 * 0.106 \text{ } \Omega + (78.16 \text{ A})^2 * 0.106 \text{ } \Omega * 0.004041 * 20 \text{ °C}}{(78.16 \text{ A})^2 * 0.106 \text{ } \Omega * 0.004041 - 25 \text{ W/m}^2 * 0.3707 \text{ m}^2}$$

$$T = 117.37 \text{ °C}$$

Ahora bien, se ha obtenido de los cálculos el dato de  $T = 117.37 \text{ °C}$ . A continuación, se comparará este dato de temperatura, con datos de temperatura obtenidos de mediciones térmicas reales las cuales fueron realizadas en las bobinas de los filtros de armónicos que fueron instalados para los compresores de 350 HP mencionados en reiteradas ocasiones.

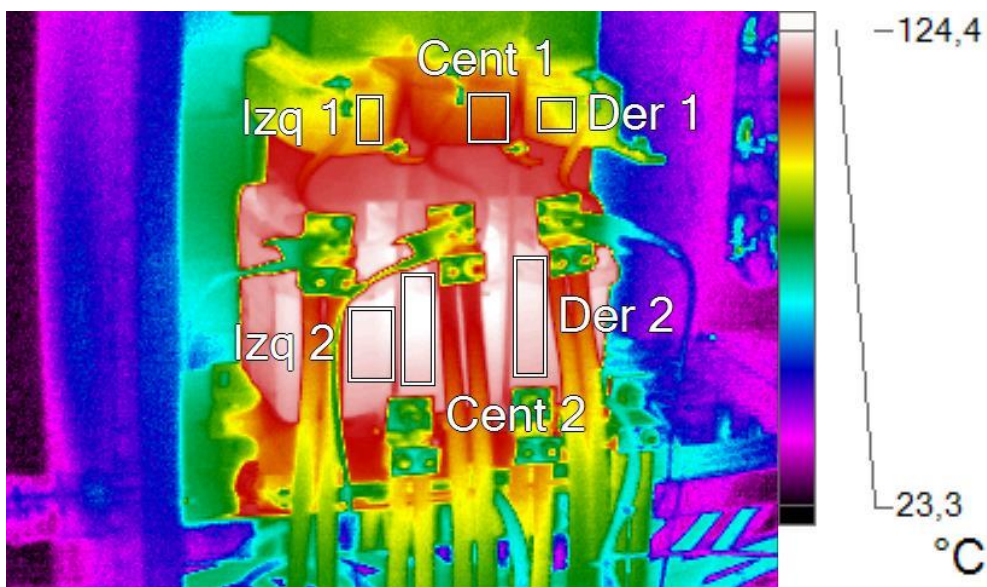
*Ilustración 10. Bobinas Inductivas de Filtro de Armónicos.*



Fuente: Obtenida de reporte de termografía realizada en los filtros de armónicos instalados.

La ilustración anterior ha mostrado las tres bobinas de uno de los filtros de armónicos instalados para reducir los armónicos en los compresores de 350 HP.

*Ilustración 11. Termografía en Bobinas Inductivas de filtro de armónicos.*



Fuente: Obtenida de reporte de termografía APAME, realizado en los filtros instalados.

La ilustración 10, muestra con una escala de colores, en qué zonas del filtro o mejor dicho de sus bobinas, se alcanzan diferentes temperaturas, comprobando que

en efecto estas se calientan considerablemente en operación, y esto es debido al paso de las corrientes armónicas.

*Tabla 7. Marcadores de la Imagen Principal.*

Nombre	Promedio	Máx	Emisividad	Segundo plano
Izq 2	101,5°C	119,1°C	0,95	30,0°C
Cent 2	107,1°C	123,4°C	0,95	30,0°C
Der 2	99,6°C	112,3°C	0,95	30,0°C
Izq 1	48,5°C	51,2°C	0,95	30,0°C
Cent 1	53,6°C	63,6°C	0,95	30,0°C
Der 1	47,0°C	50,7°C	0,95	30,0°C

Fuente: Obtenida de reporte de termografía APAME, realizado en los filtros instalados.

Con base en la información obtenida mediante termografía, se evidencian variaciones en la temperatura del embobinado. No obstante, los valores medidos en campo permiten validar el cálculo teórico previo, el cual arrojó una temperatura estimada de 117 °C. Este valor se encuentra dentro del rango de temperaturas observadas experimentalmente, e incluso cercano a los valores máximos registrados, lo que respalda la precisión y validez del modelo matemático utilizado.

### **Cálculo de la temperatura de equilibrio en las bobinas del compresor de 350 HP, con la implementación del enfriamiento líquido.**

$$T = \frac{-h * A_s * T_{\infty} - I^2 * R_{ref} + I^2 * R_{ref} * \alpha * T_{ref}}{I^2 * R_{ref} * \alpha - h * A_s}$$

Donde:

- $I = 78.16 \text{ A}$  (La  $I$  que pasa por las bobinas del filtro)
- $h = X \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$  (Coeficiente de transferencia de calor por convección del TMC-1230 es desconocido, ya que no se define en sus datos técnicos)
- $A_s = 0.3707 \text{ m}^2$  (Contempla las tres bobinas)
- $T_{\infty} = 20 \text{ °C}$
- $\alpha = 0.004041$  (Coeficiente de temperatura de resistencia para el cobre)
- $R_{ref} = 0.106 \text{ } \Omega$  (Contempla las tres bobinas)
- $T_{ref} = 20 \text{ °C}$

Por lo que esta es la función, que, aplicada a este caso en específico, describe la temperatura de equilibrio de las bobinas sumergidas, en función del coeficiente de transferencia de calor por convección del líquido en el que se encuentren sumergidas estas bobinas.

$$T(X) = \frac{-X \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} * 0.3707 \text{ m}^2 * 20 \text{ °C} - (78.16 \text{ A})^2 * 0.106 \Omega + (78.16 \text{ A})^2 * 0.106 \Omega * 0.004041 * 20 \text{ °C}}{(78.16 \text{ A})^2 * 0.106 \Omega * 0.004041 - X \text{ W/m}^2 * 0.3707 \text{ m}^2}$$

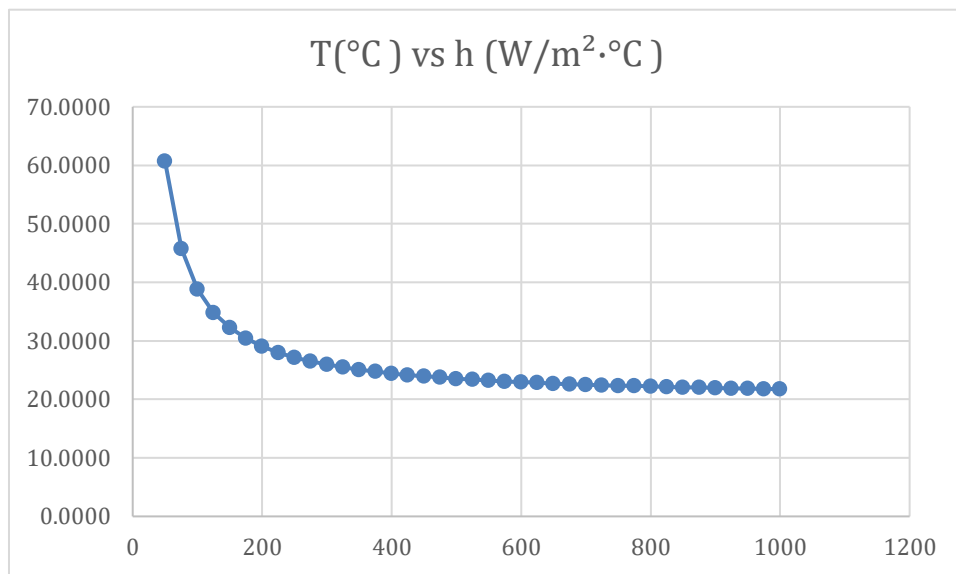
Se conoce un rango de coeficientes transferencia de calor por convección de 50-1000 W/m<sup>2</sup>·K alcanzados en sistemas de inmersión monofásicos (Doran, 2019; Ravalli, 2022). Se analizará el comportamiento de la temperatura para diferentes calores de este rango. La siguiente tabla resume los valores de temperatura de equilibrio del sistema para valores que van desde 50-1000 W/m<sup>2</sup>·K. Por temperatura de equilibrio se entiende la temperatura constante que alcanza un sistema cuando el calor que recibe es igual al que pierde.

Tabla 8. Temperatura de equilibrio en función del coeficiente de convección.

<b>Coeficiente h (W/m<sup>2</sup>·°C )</b>	<b>Temp. Equilibrio (°C )</b>
50	60.6801
75	45.7111
100	38.7952
125	34.8111
150	32.2207
175	30.4015
200	29.0538
225	28.0152
250	27.1904
275	26.5195
300	25.9631
325	25.4942
350	25.0937
375	24.7476
400	24.4456
425	24.1796
450	23.9437
475	23.7330
500	23.5437
525	23.3727
550	23.2174
575	23.0757
600	22.9461
625	22.8269
650	22.7170
675	22.6153
700	22.5209
725	22.4331
750	22.3512
775	22.2747
800	22.2030
825	22.1357
850	22.0723
875	22.0126
900	21.9563
925	21.9030
950	21.8525
975	21.8047
1000	21.7593

Fuente: Obtenida de reporte de APAME sobre instalación de filtros.

Ilustración 12. temperatura de equilibrio alcanzada en °C para diferentes valores de coeficiente  $h$  en  $W/m^2 \cdot K$ .



Fuente: Propia, elaborada con Excel.

De esta curva se puede obtener información valiosa. Se observa que la temperatura de equilibrio disminuye a medida que el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) aumenta. Además, se nota que el cambio de temperatura es más significativo cuando los valores de  $h$  son bajos; conforme el coeficiente incrementa, aunque la temperatura de equilibrio continúa disminuyendo, lo hace a una tasa de cambio cada vez menor, mostrando un comportamiento similar al de una función exponencial. Cabe mencionar que incluso para el extremo más bajo del rango reportado para ( $h$ ), se logra reducir la temperatura de equilibrio en un 48.3%. Lo que nos indica que el enfriamiento líquido puede regular la temperatura de equilibrio en una medida importante.

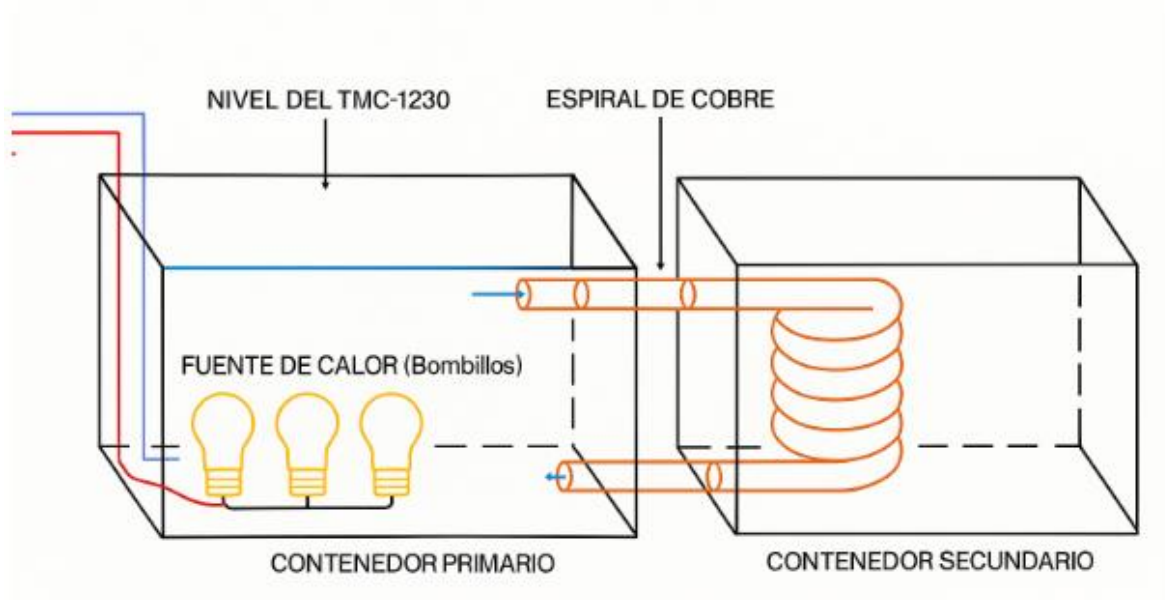
#### **Diseño del esquema de pruebas:**

El presente diagrama muestra la manera en que se arma el sistema para las pruebas prácticas de medición de temperatura y del coeficiente de transferencia de calor por convección del líquido enfriador TMC-1230

Se harán mediciones de la temperatura de equilibrio alcanzada por la fuente de calor previamente al uso del TMC-1230. Posteriormente se harán varias pruebas de temperatura hasta que se alcance el equilibrio térmico. Se tomará el dato de la

temperatura de equilibrio. Asimismo, se harán mediciones del gradiente de temperatura en el contenedor B, el cual está lleno de agua a temperatura ambiente.

*Ilustración 13. Croquis del esquema experimental.*

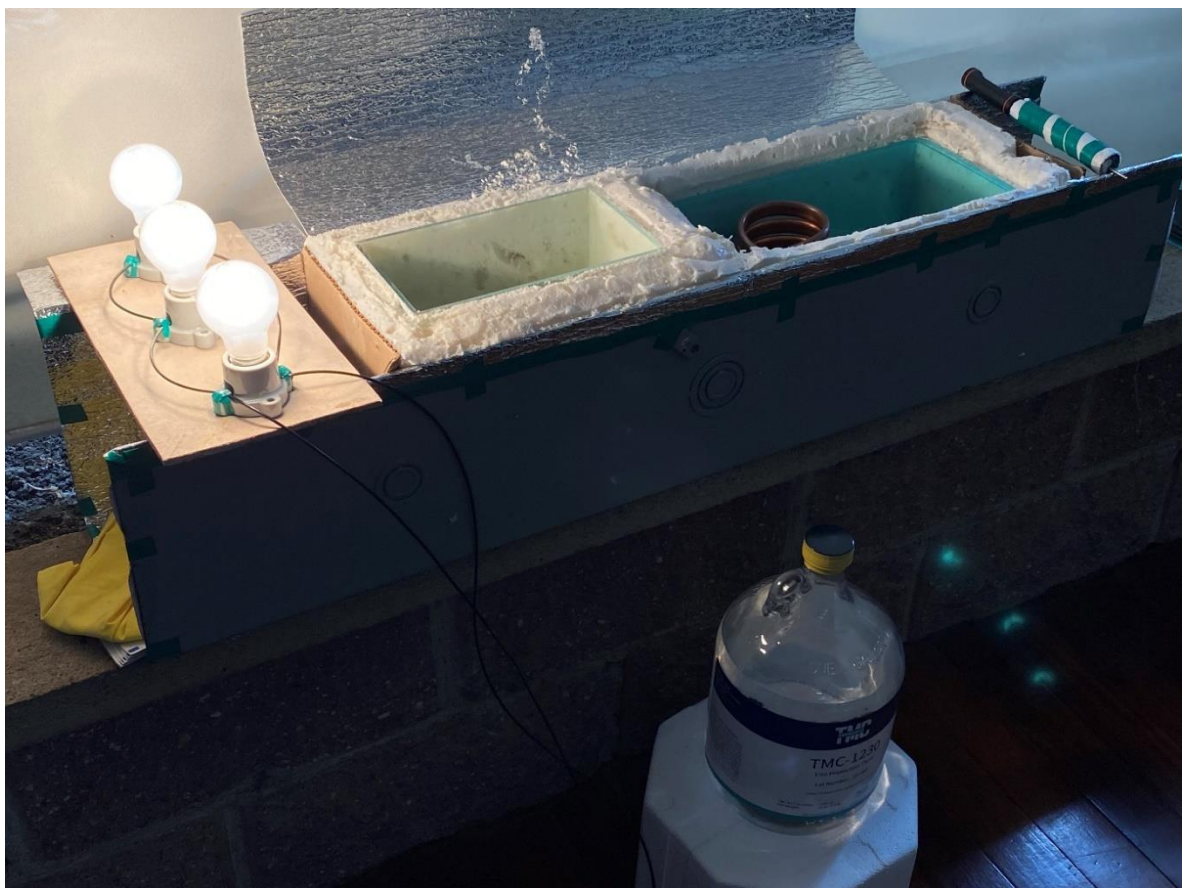


Fuente: Propia, creada con AutoCAD.

## Implementación experimental y resultados

A continuación, con el objetivo de ilustrar el sistema, se muestra el modelo experimental con el cual se realizaron las pruebas, lo mostrado en la imagen es previo a que el circuito con los bombillos es sumergido en el contenedor 1 con el líquido TMC-1230. Asimismo, se puede apreciar en la imagen el líquido TMC-1230 en su embase original de vidrio.

*Ilustración 14. Componentes del Modelo Experimental Para Pruebas.*



Fuente: Propia.

Nótese que tanto el contenedor uno, como el segundo contenedor, están aislados térmicamente con un rollo aislante térmico de aluminio y con espuma expansiva de poliuretano. Durante la medición de datos, también la parte superior de ambos contenedores fue cubierta para así reducir las pérdidas de calor.

El modelo de prueba se formula para emular las condiciones térmicas de un filtro pasivo de armónicos real, utilizando bombillos incandescentes como fuente de

calor controlada mediante un dimer, sumergidos en TMC-1230 dentro de un contenedor primario aislado térmicamente. Esto permite analizar el comportamiento del sistema a diferentes temperaturas y obtener datos como el coeficiente de transferencia de calor (h). Un tubo de cobre en espiral transfiere el calor al agua en un contenedor secundario, también aislado. Este diseño se desarrolla así para minimizar pérdidas térmicas, garantizar la compatibilidad del TMC-1230 con el contenedor de vidrio y del agua con el de plástico, y facilitar la medición precisa de la disipación y recuperación de calor en un entorno controlado.

### **Mediciones de temperatura superficial de la fuente de calor al aire libre**

Se armó un circuito de tres bombillos en paralelo, cada uno es un bombillo incandescente de 100 Watts, y con el uso de un dimer, se variaron los valores de la corriente del circuito, y para cada uno de dichos valores se tomaron muestras de temperatura en la superficie de los bombillos.

La siguiente imagen muestra el circuito, mientras se le hace una medición de temperatura. Es importante destacar que, para cada medición, fue necesario esperar hasta que los bombillos alcanzaran su temperatura de equilibrio.

*Ilustración 15. Mediciones de Temperatura a la Fuente de Calor en Aire.*



Fuente: Propia.

De estas mediciones se pudo obtener los siguientes datos de corriente y temperatura.

Temperatura ambiente: 24.5 °C

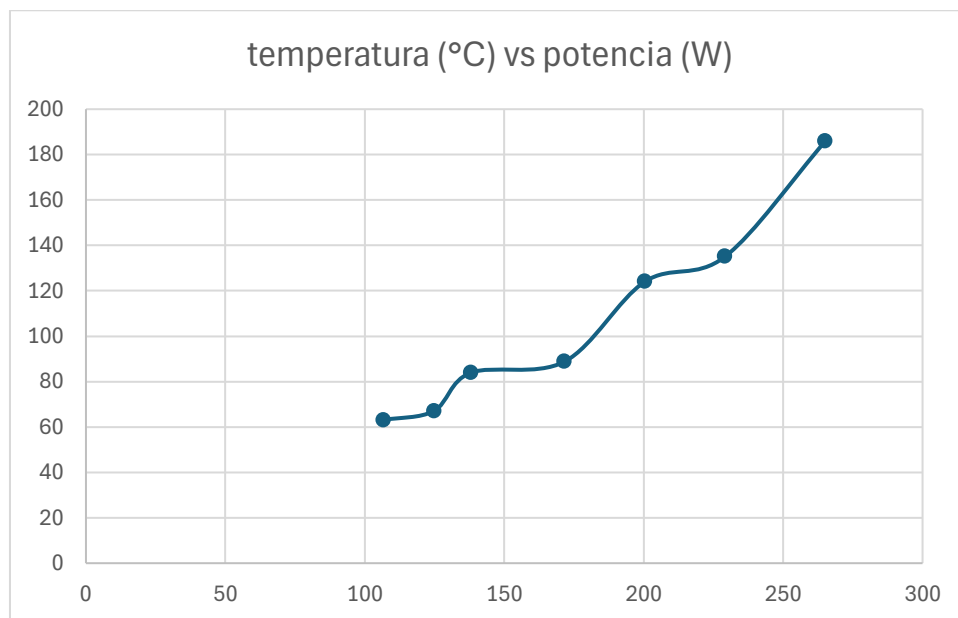
Tabla 9. Temperatura de equilibrio de los bombillos al aire, para diferentes cargas

Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura de Equilibrio (°C)
0.89	106.8	63.1
1.04	124.8	67.1
1.15	138	83.9
1.43	171.6	88.8
1.67	200.4	124
1.91	229.2	135.1
2.21	265.2	186

Fuente: Propia, elaborada con Excel.

De los datos tabulados obtenidos de las mediciones experimentales, se obtuvo la siguiente gráfica que muestra de manera visual el comportamiento de la temperatura en función de la potencia.

Ilustración 16. Temperatura de equilibrio de los bombillos al aire, para diferentes cargas.



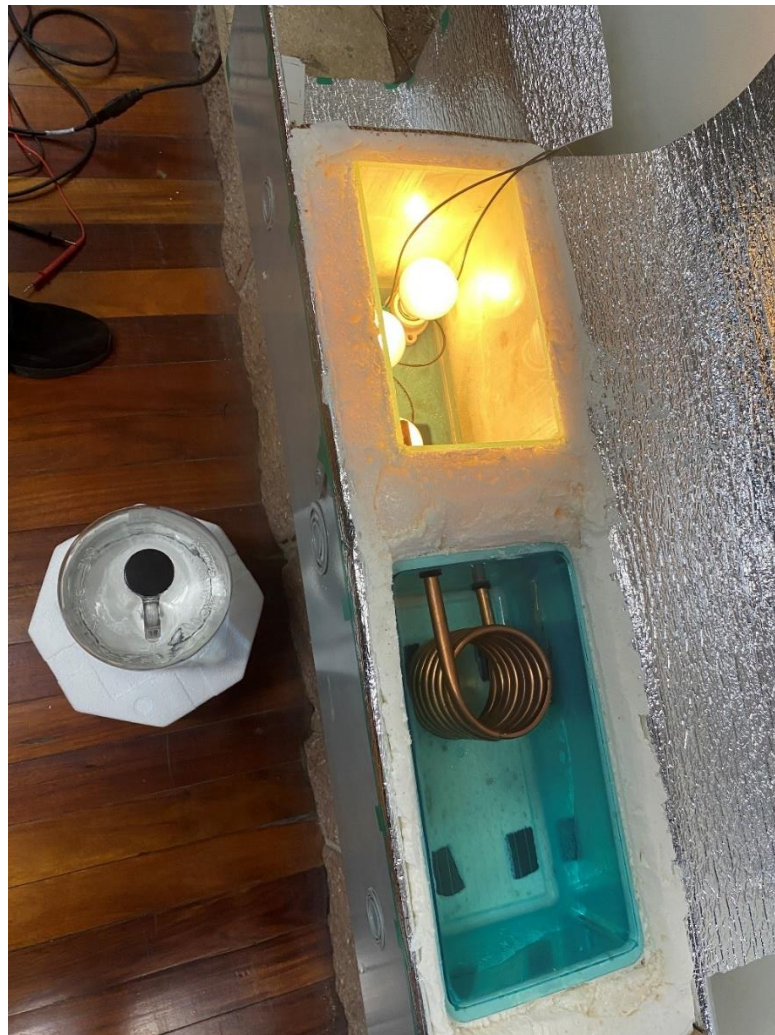
Fuente: Propia, elaborada con Excel.

### Mediciones de temperatura en los contenedores con diferentes cargas

La siguiente imagen muestra el esquema de pruebas mientras el circuito se encuentra sumergido en el líquido TMC.1230, y el segundo contenedor está lleno de agua a temperatura ambiente.

Para las mediciones, se inició con el sistema apagado, ambos líquidos a temperatura ambiente, y gradualmente se fue aumentando la carga sumergida. Después de finalizar con la toma de datos de alguna medición, se dejó esperó a que el contenido de los contenedores volviese a su temperatura ambiente, para así poder medir el tiempo que tardó cada prueba en alcanzar su temperatura de equilibrio.

*Ilustración 17. Circuito Sumergido en TMC-1230.*



Fuente: Propia.

Estas mediciones se realizaron en un espacio cerrado, seco, y sin luz solar directa. De estas mediciones se pudo obtener los siguientes datos de corriente y temperatura.

Temperatura ambiente: 24.5 °C

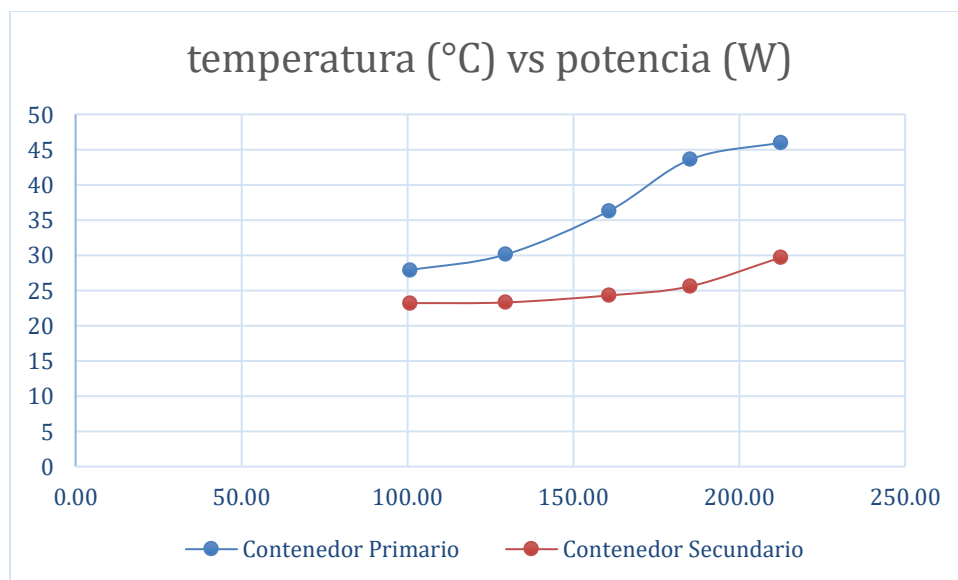
Tabla 10. Temperatura de equilibrio en contenedores primario y secundario para diferentes cargas.

Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura de Equilibrio Contenedor Primario (°C)	Temperatura de Equilibrio Contenedor Secundario (°C)
0.84	40.42	27.9	23.2
1.08	66.65	30.1	23.3
1.34	102.61	36.3	24.3
1.54	136.23	43.6	25.6
1.77	179.43	46	29.7

Fuente: Propia, elaborada con Excel.

De los datos tabulados obtenidos de las mediciones experimentales, se obtuvo la siguiente gráfica que nos muestra de manera visual el comportamiento de la temperatura en función de la potencia, tanto para los datos medidos en el contenedor primario como en el secundario.

Ilustración 18. Temperatura de equilibrio en contenedores primario y secundario para diferentes cargas.



Fuente: Propia, elaborado con Excel.

La siguiente imagen se muestra con el objetivo de ilustrar el circuito en funcionamiento en el contenedor primario, cuando ya se ha aumentado considerablemente la carga. El líquido presenta burbujas, lo que indica el inicio de la ebullición nucleada del TMC-1230 debido a las altas temperaturas generadas por los bombillos incandescentes. Este fenómeno implica una transferencia de calor eficiente,

ya que las burbujas facilitan la convección al transportar energía térmica hacia la superficie del líquido, contribuyendo a la disipación del calor generado por el circuito. A pesar de la formación de burbujas, se demuestra la característica dieléctrica del TMC-1230, al comprobar el funcionamiento del circuito con empalmes expuestos al líquido, el cual inundó por completo dicho circuito, sin que se presentaran arcos eléctricos ni fallos en el aislamiento. Esto sugiere que el TMC-1230 mantiene sus propiedades dieléctricas incluso bajo condiciones de ebullición controlada, aunque en aplicaciones industriales podría ser necesario optimizar el diseño para minimizar la acumulación de vapor y garantizar la estabilidad a largo plazo.

*Ilustración 19. Carga Sumergida Aumentada: Presencia de burbujas.*



Fuente: Propia

## Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del TMC-1230

El cálculo del coeficiente  $h$  en  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , se realiza con las condiciones reales y documentadas de las pruebas prácticas de temperatura en el sistema, donde tenemos que:

### Área superficial ( $A_s$ ):

Área superficial de un bombillo de los utilizados para las pruebas

*Ilustración 20*



Ilustración tomada de la web de un bombillo estándar.

Esta imagen muestra un bombillo de la misma forma que los bombillos utilizados para las pruebas, Se le midió la circunferencia y se escaló para obtener las medidas necesarios para el cálculo de áreas, en la ilustración 20 muestra las cotas necesarias para dicho cálculo:

*Ilustración 21. Cotas Para Aproximación de Área Superficial*

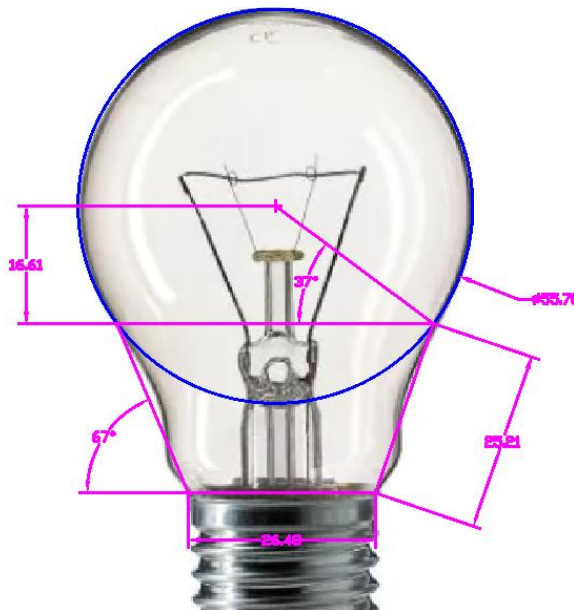


Imagen 17. Imagen tomada de la web, modificada con AutoCAD.

Donde el área de la calota esférica está dada por:

$$A = 4\pi R^2 * \left(1 - \frac{\theta}{360}\right)$$

Donde:

- R = 0.02785 m (Radio de la esfera)
- $\theta = 106^\circ$  (Ángulo desde el centro de la esfera al plano cortado)

Entonces:

$$A = 0.00688 \text{ m}^2$$

El área de la parte inferior del vidrio se calcula como un cono al cual se le ha hecho un corte paralelo a la base y está dada por:

*Ecuación 8* 
$$A = \frac{\pi}{\cos(67)} (R^2 - r^2)$$

Donde:

- R = 0.02224 m (Radio de la base)
- r = 0.0134 m (radio del plano circular generado por el corte)

Entonces:

$$A = 0.00253 \text{ m}^2$$

El área total de un bombillo es la suma de estas dos áreas

$$A_t = 0.00941 \text{ m}^2$$

El área superficial  $A_s$  que buscamos, contempla los tres bobillos, por lo que:

$$A_s = 0.02823 \text{ m}^2$$

**$R_{ref}$  ( $\Omega$ ):**

Para el cálculo de esta resistencia de referencia del circuito sumergido, se tomarán en cuenta los tres bombillos en paralelo, y tenemos que la resistencia equivalente corresponde a:

$$R_{ref} = 57.1429 \Omega$$

**$h$  ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ):**

Para el cálculo de  $h$ , retomaremos la siguiente fórmula (7):

$$T = \frac{-h * A_s * T_\infty - I^2 * R_{ref} + I^2 * R_{ref} * \alpha * T_{ref}}{I^2 * R_{ref} * \alpha - h * A_s}$$

De esta fórmula, usando propiedades numéricas podemos despejar el valor de  $h$ , obteniendo como resultado la siguiente fórmula:

Ecuación 9 
$$h = \frac{-I^2 * R_{ref} [\alpha (T - T_{ref}) + 1]}{A_s (T_{\infty} - T)}$$

Donde:

- $T_{\infty} = 24.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{ref} = 24.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\alpha = 0.004041$  (Coeficiente de temperatura de resistencia para el cobre)
- $A_s = 0.02823 \text{ m}^2$
- $R_{ref} = 57.1429 \text{ } \Omega$

Por lo que tenemos

Ecuación 10 
$$h = \frac{-I^2 * 57.1429 \text{ } \Omega * [0.004041 (T - 24.5 \text{ }^{\circ}\text{C}) + 1]}{0.02823 \text{ m}^2 * (24.5 \text{ }^{\circ}\text{C} - T)}$$

Lo que nos deja una fórmula que define el comportamiento de h para las condiciones de este caso experimental, y depende de la corriente y de la temperatura de equilibrio alcanzada, fórmula que evaluaremos para los diferentes valores obtenidos en el contenedor primario.

La siguiente tabla muestra los diferentes valores del coeficiente de transferencia de calor por convección h del líquido TMC-1230, para los diferentes datos de corriente y temperatura obtenidos de las pruebas prácticas, además muestra el valor promedio de este coeficiente.

*Tabla 11. Coeficiente de transferencia de calor calculado para diversos valores de corriente y temperatura de equilibrio alcanzada.*

Corriente (A)	Temperatura de Equilibrio Contenedor Primario ( $^{\circ}\text{C}$ )	Coeficiente h en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$
0.84	27.9	426.8652
1.08	30.1	431.1508
1.34	36.3	322.7076
1.54	43.6	272.1461
1.77	46	321.3088
<b>Valor promedio h:</b>		<b>354.8357</b>

Fuente: Propia, elaborada con Excel.

Se puede observar que se obtuvieron valores diferentes para el coeficiente de transferencia de calor, los cuales se encuentran en el rango esperado según la

literatura estudiada. Para términos prácticos de cálculos posteriores, usaremos como referencia el valor promedio obtenido, dado de la siguiente manera:

$$h = 354.8357 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

## Cálculo de la energía recuperada en el diseño experimental

### Cálculo de las pérdidas

Para el cálculo de las pérdidas en este esquema experimental, se retoman conceptos antes vistos como el de potencia disipada, donde  $P = I^2 * R$ . Y se evalúan los valores de corriente obtenidos de las pruebas prácticas, junto con la resistencia conocida del circuito correspondiente a  $57.1429 \Omega$ , y con estos datos obtenemos la siguiente tabla:

*Tabla 12. Perdidas por efecto Joule para diferentes valores de corriente.*

Corriente (A)	Pérdidas (Watts)
0.84	40.4161
1.08	66.6515
1.34	102.6058
1.54	136.2250
1.77	179.4278

Fuente: Propia, elaborada con Excel.

### Cálculo de la energía recuperada

En esta sección retomaremos la fórmula (3) de la energía térmica dada por

$$Q = m * c * \Delta T$$

Donde:

- $m = 6 \text{ kg}$ , es la masa del agua en el contenedor secundario.
- $c = 4186 \text{ J/kg}\cdot\text{°C}$  es la capacidad calorífica específica del agua.
- $\Delta T$  es el cambio de temperatura (en  $\text{°C}$ ).
- $T_{\infty} = 23.1 \text{ °C}$

Por lo que podemos detallar la fórmula de la siguiente manera:

$$Q = 6 \text{ kg} * 4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} * (T - 23.1 ^\circ\text{C})$$

Teniendo esta fórmula de Q en función de T, se evalúa para los datos de temperatura obtenidos en el contenedor secundario, y obtenemos la siguiente tabla:

*Tabla 13. Potencia Recuperada*

Temperatura Cont.2 (°C)	Energía Q (J)	Tiempo (s)	Potencia Recuperada (Watts)
23.2	2511.6	760	3.3047
23.3	5023.2	770	6.5236
24.3	30139.2	929	32.4426
25.6	62790	1067	58.8472
29.7	165765.6	1155	143.5200

Fuente: Propia, elaborada con Excel.

*Tabla 14. Porcentaje Calculado de Energía Recuperada*

Pérdidas (Watts)	Potencia Recuperada (Watts)	% Energía recuperada
40.4161	3.3047	8.1768
66.6515	6.5236	9.7877
102.6058	32.4426	31.6187
136.2250	58.8472	43.1986
179.4278	143.5200	79.9876

Fuente: Propia, elaborada con Excel.

### **Cálculo de la energía recuperada para los filtros de armónicos**

Para este cálculo, se retoma la fórmula (7) que describe la función de la temperatura de equilibrio de las bobinas sumergidas en el líquido TMC-1230. Previamente no se contaba con el dato del coeficiente de transferencia h, pero como este ya ha sido calculado gracias a los datos obtenidos de las pruebas prácticas, podemos evaluar la fórmula de la siguiente manera:

$$T(X) = \frac{-354.8357 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot 0.3707 \text{ m}^2 \cdot 20^\circ\text{C} - (78.16 \text{ A})^2 \cdot 0.106 \Omega + (78.16 \text{ A})^2 \cdot 0.106 \Omega \cdot 0.004041 \cdot 20^\circ\text{C}}{(78.16 \text{ A})^2 \cdot 0.106 \Omega \cdot 0.004041 - 354.8357 \text{ W/m}^2 \cdot 0.3707 \text{ m}^2}$$

$$T(X) = 25.02 ^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, la temperatura de equilibrio alcanzada por las bobinas del filtro con la carga del compresor, correspondiente a 302 A, es de 25.02 °C.

Para continuar con el cálculo de la energía recuperada, se toma como referencia las condiciones reales observadas durante las pruebas prácticas, incluyendo la temperatura ambiente y las temperaturas de los fluidos involucrados. Esto permite obtener una estimación más precisa y representativa de los resultados, en lugar de asumir un valor estándar de temperatura ambiente de 20 °C. Además, se evalúa la fórmula correspondiente a la carga crítica que el filtro puede manejar. En este caso, la carga máxima es de 492 A, de la cual un 25,88 % corresponde a la corriente que circula específicamente por las bobinas, lo que equivale a 127,33 A. Sustituyendo este valor en la fórmula, obtenemos lo siguiente:

$$T(X) = \frac{-354.8357 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \cdot 0.3707 \text{ m}^2 \cdot 24.5 \text{ °C} - (127.33 \text{ A})^2 \cdot 0.106 \ \Omega + (127.33 \text{ A})^2 \cdot 0.106 \ \Omega \cdot 0.004041 \cdot 24.5 \ \text{°C}}{(127.33 \ \text{A})^2 \cdot 0.106 \ \Omega \cdot 0.004041 - 354.8357 \ \text{W/m}^2 \cdot 0.3707 \ \text{m}^2}$$

$$T(X) = 38.29 \ \text{°C}$$

Partiendo del hecho de que la temperatura de equilibrio alcanzada para la carga máxima conectada en el filtro es de 38.29 °C, se determina la temperatura alcanzada por el contenedor con agua mediante interpolación, utilizando los valores reales obtenidos en las mediciones.

La siguiente tabla presenta la tabulación de los datos recopilados sobre las temperaturas de equilibrio alcanzadas en el contenedor primario y en el contenedor secundario, según las pruebas prácticas. Además, se resalta en color rojo el dato de temperatura para el cual deseamos averiguar el valor de X.

*Tabla 15. Tabla para Interpolación de Temperatura de Equilibrio.*

Temperatura de Equilibrio Contenedor Primario (°C)	Temperatura de Equilibrio Contenedor Secundario (°C)
27.9	23.2
30.1	23.3
36.3	24.3
<b>38.29</b>	<b>X</b>
43.6	25.6
46	29.7

Fuente: Propia, elaborada con Excel.

Ecuación 11

$$y_x = y_0 + \frac{x-x_0}{x_1-x_0} (y_1 - y_0)$$

$$y_x = 24.3 + \frac{38.29 - 36.3}{43.60 - 36.3} (25.6 - 24.3)$$

$$y_x = 24.65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De esta manera se determina una temperatura de 24.65 °C en el contenedor secundario para el valor primario. Ahora bien, ¿cuánta energía hemos se ha recuperado?

**Potencia disipada:**

$$P = I^2 * R$$

$$P = 127.33^2 * 0.106 \Omega$$

$$P = 1718.57 \text{ W}$$

**Cálculo de la energía recuperada**

Se retoma la fórmula (3) de la energía térmica dada por

$$Q = m * c * \Delta T$$

Donde:

- $m = 6 \text{ kg}$ , es la masa del agua en el contenedor secundario.
- $c = 4186 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$  es la capacidad calorífica específica del agua.
- $T = 24.65 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $T_\infty = 23.1 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $\Delta T = 24.65 - 23.1 = 1.55 \text{ } ^\circ\text{C}$

Por lo que podemos detallar la fórmula de la siguiente manera:

$$Q = 6 \text{ kg} * 4186 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C} * (1.55 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q = 38929.8 \text{ J}$$

Para el cálculo de la energía en Watts, se estima un tiempo  $t$  igual a 966 segundos. Dato calculado con interpolación.

$$\frac{Q}{t} = \frac{38929.8 \text{ J}}{966 \text{ s}} = 40.3 \text{ W}$$

**% De energía recuperada:**

$$\%Recuperado = \frac{40.3 \text{ W}}{1718.57 \text{ W}} \times 100\% = 2.34\%$$

## **Análisis del Impacto Térmico en la Impedancia del Filtro LC**

### **Efecto de la temperatura en el inductor (L)**

**Resistencia del conductor:** La bobina del inductor está hecha de un material conductor (generalmente cobre o aluminio), cuya resistencia eléctrica aumenta con la temperatura debido al incremento en la resistividad del material. Esto se describe por la ecuación (6):

$$R = R_0[1 + \alpha (T - T_0)]$$

donde  $R_0$  es la resistencia a la temperatura de referencia  $T_0$ ,  $\alpha$  es el coeficiente de temperatura del material, y  $T$  es la temperatura actual.

**Impedancia del inductor:** La impedancia de un inductor puro es  $Z_L = j\omega L$ , pero en la práctica, incluye una resistencia en serie  $R_L$  debido a las pérdidas en el conductor. La impedancia total del inductor es:  $Z_L = R_L + j\omega L$ . A medida que la temperatura aumenta,  $R_L$  crece, lo que incrementa la magnitud de la impedancia del inductor, especialmente en frecuencias donde la resistencia tiene un impacto significativo.

**Inductancia (L):** La inductancia en sí misma es menos sensible a la temperatura, pero puede variar ligeramente si el núcleo magnético (No es el caso de este TFG) cambia sus propiedades (e.g., permeabilidad) con la temperatura. En la mayoría de los casos, este efecto es mínimo comparado con el aumento de  $R_L$ .

## Efecto de la temperatura en el capacitor (C)

**Capacitancia:** La capacitancia de un capacitor puede disminuir ligeramente con el aumento de la temperatura, dependiendo del tipo de dieléctrico. Por ejemplo, en capacitores cerámicos o de película, el material dieléctrico puede experimentar cambios en su constante dieléctrica, reduciendo C. Esto provoca un aumento en la impedancia capacitiva, ya que:  $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$  Si C disminuye,  $Z_C$  aumenta.

**Resistencia equivalente en serie (ESR):** Los capacitores también tienen una resistencia en serie equivalente (ESR) que puede aumentar con la temperatura debido a cambios en las propiedades del dieléctrico o los contactos internos. Esto contribuye a un incremento en la impedancia total del capacitor.

## Impedancia del filtro LC

Un filtro de armónicos LC típico (e.g., un filtro pasa-bajos o un filtro sintonizado) combina un inductor y un capacitor en serie o paralelo, diseñados para tener una impedancia mínima a una frecuencia específica (frecuencia de resonancia). La impedancia total del filtro depende de la configuración, para nuestra aplicación solo se tomará en cuenta la configuración en serie, donde tenemos que la impedancia total es:

$$\text{Ecuación 12} \quad Z_{LC} = Z_L + Z_C = R_L + j\omega L + ESR + \frac{1}{j\omega C}$$

A medida que  $R_L$  y  $ESR$  aumentan con la temperatura, y si C disminuye, la magnitud de  $Z_{LC}$  tiende a aumentar, especialmente fuera de la frecuencia de resonancia.

La resistencia equivalente en serie (ESR) de un capacitor representa las pérdidas resistivas asociadas con el dieléctrico, los contactos metálicos y otros componentes internos. A diferencia de la resistencia del conductor  $R_L$ , la relación entre la ESR y la temperatura no sigue una fórmula universal simple como la de  $R_L$  ya que depende de múltiples factores, incluyendo el tipo de capacitor, las propiedades del dieléctrico, entre otros. Para efectos de practicidad, tomaremos el valor de ESR como un valor despreciable, de manera que se usará la siguiente fórmula para la impedancia del sistema LC del filtro de armónicos:

Ecuación 13

$$Z_{LC} = R_L + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

### Impacto de la temperatura en la impedancia del filtro

Los filtros Matrix instalados en los compresores, cuentan con una inductancia  $X_L = 0.1135$  (Apéndices 1 y 3) y con una capacitancia  $C = 1058 \mu\text{F}$  (Apéndices 1 y 3) Donde la impedancia se puede indicar con la siguiente fórmula:

Ecuación 14 
$$Z_{LC} = R_{ref}[1 + \alpha (T - T_{ref})] + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_{LC} = R_{ref}[1 + \alpha (T - T_{ref})] + j0.1135 + \frac{1}{j0.3989}$$

Donde:

- $T$  = Temperatura alcanzada por el conductor en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\alpha = 0.004041$  (Coeficiente de temperatura de resistencia para el cobre)
- $R_{ref} = 0.106 \Omega$  (Contempla las tres bobinas)
- $T_{ref} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Para el caso donde el conductor no se ha calentado tenemos que:

$$Z_{LC} = 0.106[1 + 0.004041(20 - 20)] + j0.1135 + \frac{1}{j0.3989}$$

$$Z_{LC} = 2.3957 < -87.46$$

Para el caso donde el conductor se ha calentado a una temperatura de  $117 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tenemos que:

$$Z_{LC} = 0.106[1 + 0.004041(117 - 20)] + j0.1135 + \frac{1}{j0.3989}$$

$$Z_{LC} = 2.3979 < -86.47$$

Lo que quiere decir que, para un caso máximo con un delta de temperatura igual a  $97$  grados, la resistencia del conductor aumentaría casi en un  $40\%$ . Pero ¿qué tanto afecta la  $Z_{LC}$  y qué tanto afecta la medición de armónicos? Tomando los resultados para cuando el conductor no se ha calentado, y el caso donde ya se calentó, se obtiene una diferencia en la impedancia  $Z_{LC}$  de un  $0.1\%$

### Impacto en el desempeño del filtro

**Frecuencia de resonancia:** Si los valores de inductancia y capacitancia cambian con la temperatura, la frecuencia de resonancia del filtro

$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  puede desplazarse. Una disminución en C aumenta  $f_r$ , lo que podría desintonizar el filtro para los armónicos objetivo.

**Eficacia del filtro:** El aumento de la impedancia (debido a mayores pérdidas resistivas y cambios en C) puede reducir la capacidad del filtro para atenuar armónicos, afectando la calidad del suministro eléctrico.

Es lógico que la impedancia de un filtro LC aumente con la temperatura debido al incremento en la resistencia del inductor RL, el aumento de la ESR del capacitor, y la posible disminución de la capacitancia (C). Estos efectos pueden alterar la frecuencia de resonancia y la eficacia del filtro.

## Simulación en ETAP

Este apartado presenta las simulaciones eléctricas realizadas sobre el sistema de alimentación de los compresores, integrando los filtros de armónicos. Dichas simulaciones tienen como objetivo analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones similares a las de operación real, incluyendo la presencia de distorsión armónica.

En secciones anteriores de este documento se han expuesto los resultados obtenidos mediante simulaciones de la Distorsión Armónica Total (THD) tanto antes como después de la instalación de los filtros pasivos. Estos datos sirven como referencia base para validar el comportamiento simulado.

Es importante señalar que las simulaciones de las que se habla en el primer párrafo fueron realizadas previamente por la empresa APAME, como parte del análisis técnico desarrollado antes de la instalación física de los filtros. Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizó el mismo diagrama unifilar y las condiciones eléctricas originales empleadas por APAME, lo que garantiza la equivalencia en las condiciones del sistema. A partir de este modelo base, se introdujo una modificación específica: la variación en la impedancia del filtro como resultado del calentamiento de sus componentes.

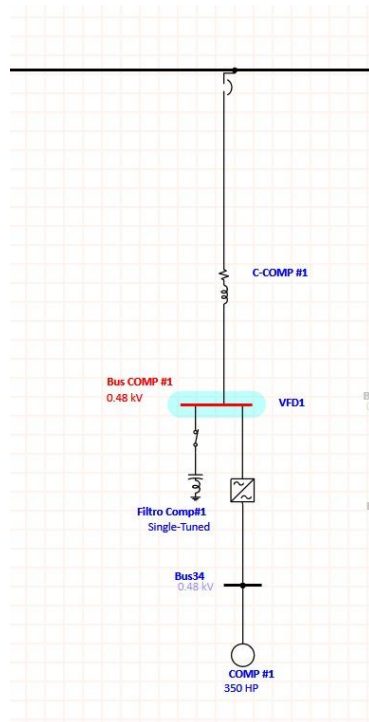
El propósito principal de esta sección es replicar esas condiciones de medición mediante un modelo eléctrico detallado, permitiendo evaluar el impacto de los filtros sobre la calidad de la energía al incorporar una condición nueva al análisis: la variación en la impedancia del filtro asociada al calentamiento de sus componentes debido al paso sostenido de corrientes armónicas.

Por lo tanto, mediante la simulación se pretende estimar en qué medida dicha variación térmica influye sobre el nivel de THD, comparando los resultados con los valores obtenidos en condiciones ideales (sin calentamiento) y los observados en campo.

Del análisis matemático del impacto de la temperatura en la impedancia del filtro, se obtuvo como resultado un cambio del 0,1 % en la impedancia total  $Z_{LC}$ . Sin embargo, debido a las restricciones de la plataforma ETAP, no es posible aplicar directamente una variación porcentual sobre la impedancia total del filtro. Por esta razón, se procedió a modificar exclusivamente la componente inductiva, que sí puede ser ajustada manualmente en el entorno del software. Así, el 0,1 % adicional fue aplicado únicamente sobre la impedancia inductiva del filtro, lo cual representa una aproximación para evaluar el efecto térmico sobre el comportamiento del sistema frente a la distorsión armónica.

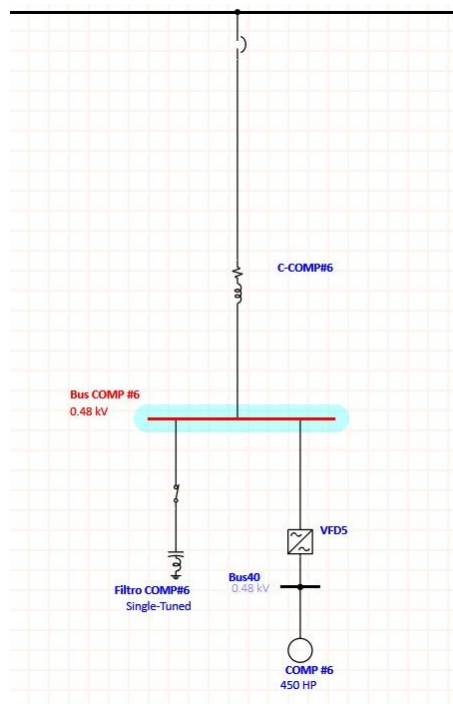
Las ilustraciones 22 y 23 muestran el modelado de los filtros para los compresores en ETAP.

Ilustración 22. Filtro Para Compresor 1 en ETAP



Fuente: Propia tomada de ETAP

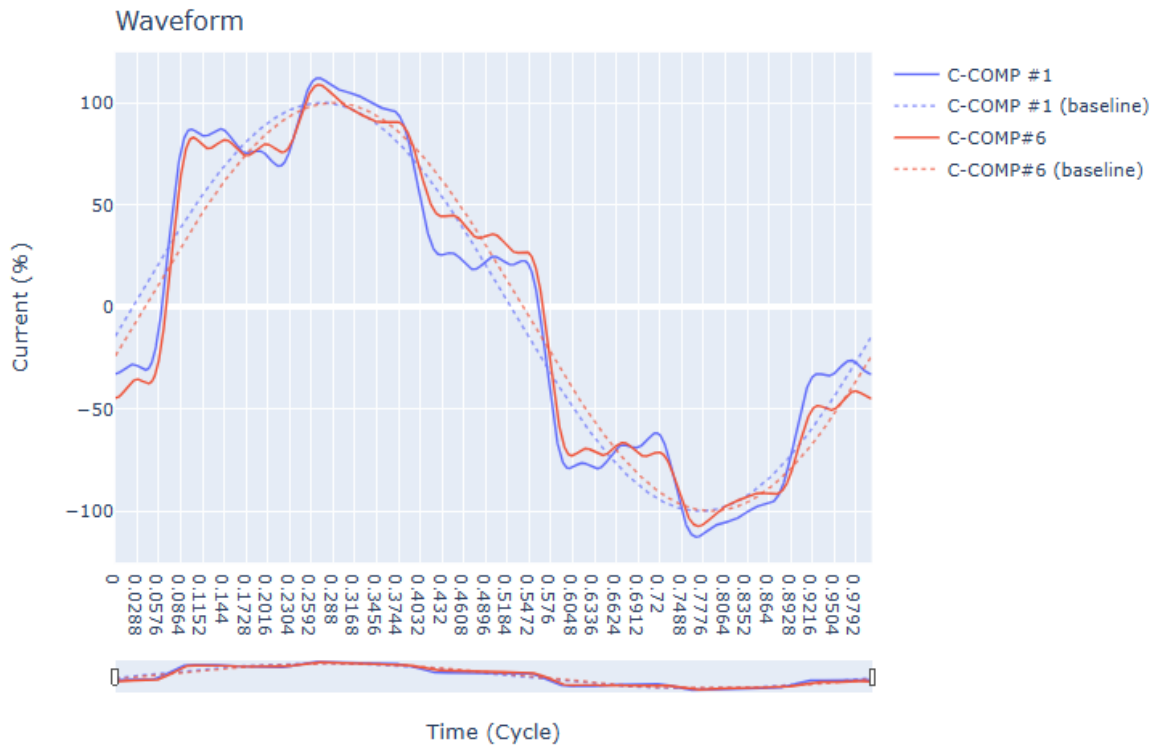
Ilustración 23. Filtro Para Compresor 1 en ETAP



Fuente: Propia tomada de ETAP

De esta simulación realizada, cambiando el valor de impedancia inductiva de  $0.1135 \Omega$  (Apéndices 1 y 3) a un  $0.1136 \Omega$  (Apéndices 2 y 4) en ambos filtros (Filtro instalado para el compresor 1 y filtro instalado para el compresor 6), se obtiene la forma de onda y el porcentaje de THD mostrados en las siguientes gráficas:

*Ilustración 24. Forma de Onda*



Fuente: Propia tomada de ETAP

Ilustración 25. Porcentaje de THD Compresores 1 & 6.



Fuente: Propia tomada de ETAP

## Análisis de resultados

A partir de la tabla 9 e ilustración 15, se observa que los valores de temperatura de equilibrio alcanzados por la superficie de los bombillos aumentan de forma directamente proporcional respecto a la potencia aplicada. Sin embargo, esta relación no es lineal, sino que presenta un comportamiento escalonado, lo cual se evidencia más claramente en la curva mostrada en el gráfico 1.

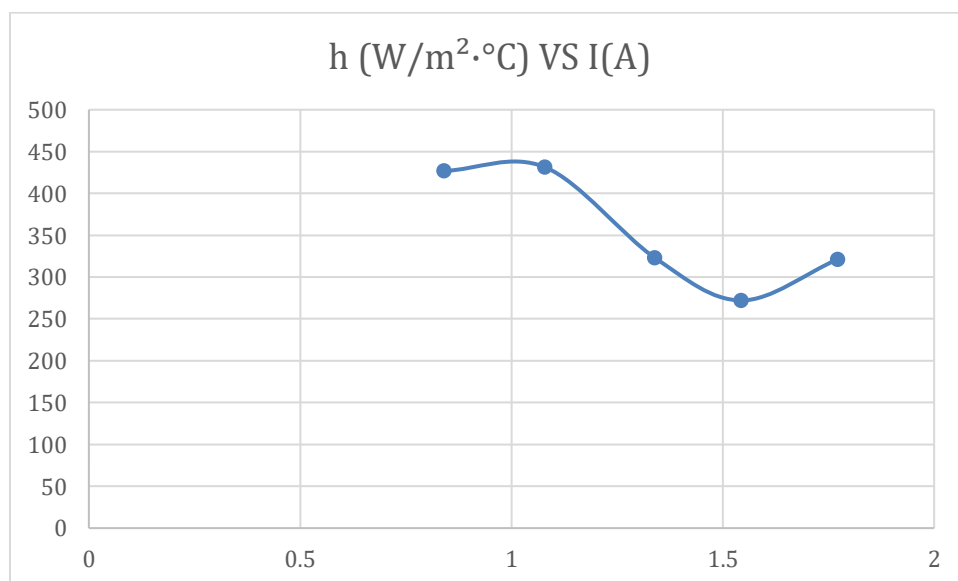
En la tabla 10 se aprecia que el comportamiento de la temperatura de equilibrio en los contenedores primario y secundario sigue una tendencia similar a la registrada antes del uso del enfriamiento líquido. No obstante, los valores de temperatura son significativamente más bajos, lo que evidencia la efectividad del TMC-1230 en la disipación de calor. Aunque las temperaturas continúan aumentando con la potencia aplicada, el comportamiento es menos escalonado, tal como se muestra en la ilustración 17. Además, la curva correspondiente al contenedor primario presenta una pendiente mayor en comparación con la del contenedor secundario, lo cual es coherente desde el punto de vista térmico, ya que dicho contenedor está en contacto

directo con la fuente de calor, y por tanto, experimenta una transferencia de energía más intensa, mientras que el contenedor secundario está parcialmente aislado y sufre mayores pérdidas, lo que reduce su tasa de ganancia térmica.

Previamente en el proyecto se definió una ecuación para la temperatura de equilibrio del sistema, la cual considera variables como el área superficial de la fuente de calor, temperatura de referencia, temperatura ambiente, corriente, resistencia y el coeficiente de transferencia de calor por convección del medio (ya sea aire o TMC-1230). Para el cálculo aplicado al filtro de armónicos de los compresores, se contaba con todos los datos necesarios salvo el coeficiente de convección  $h$ . Mediante un despeje algebraico se obtuvo una expresión que permite calcular  $h$  en función del resto de variables. Para efectos de las pruebas experimentales, las únicas variables desconocidas fueron la temperatura de equilibrio alcanzada y la corriente aplicada al circuito.

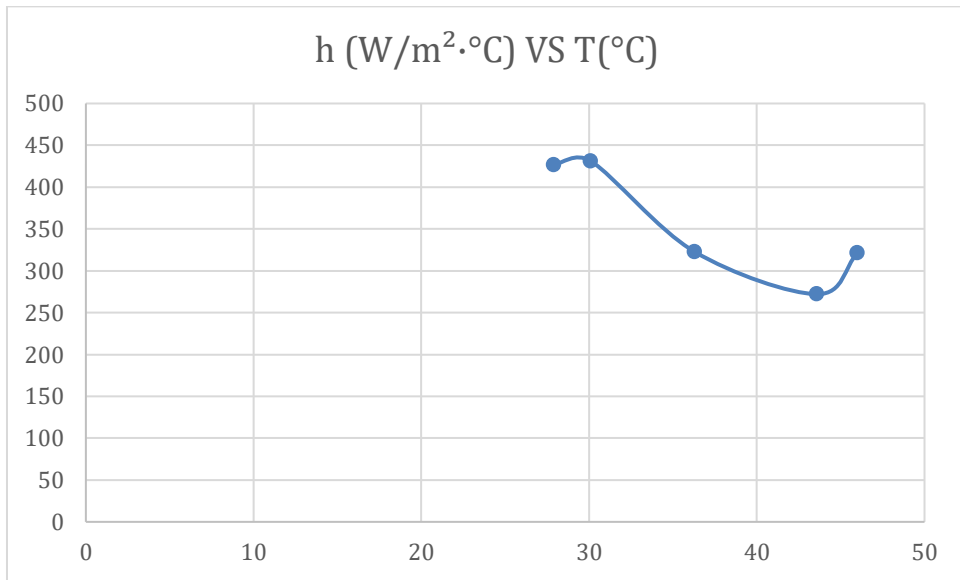
La tabla 11 muestra los valores obtenidos del coeficiente  $h$  en cinco mediciones diferentes de corriente y temperatura de equilibrio. Se evidencia que, en algunos casos,  $h$  parece aumentar con la corriente, mientras que en otros, disminuye. Esto impide establecer una relación creciente o decreciente clara entre  $h$ , la corriente o la temperatura. Al graficar el coeficiente  $h$  en función de ambas variables, se obtienen las siguientes curvas:

*Ilustración 26. Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección vs Corriente.*



Fuente: Propia elaborada con Excel.

*Ilustración 27. Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección vs Temperatura.*



Fuente: Propia tomada de ETAP

De estas gráficas se observa una tendencia no lineal del coeficiente de transferencia de calor por convección. Para efectos prácticos, se utilizó el valor promedio de  $h$  en los cálculos. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango esperado ( $50\text{--}1000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) para sistemas de inmersión monofásicos, según lo reportado por Doran (2019) y Ravalli (2022).

En cuanto al cálculo de la energía recuperada en el diseño experimental, el análisis de la tabla 13 muestra que, a mayor gradiente de temperatura registrado en el contenedor secundario, mayor es la energía recuperada, lo cual también se ve reflejado en los tiempos de registro. Esto permite inferir que la potencia recuperada también sigue una tendencia creciente con respecto al gradiente de temperatura y a la potencia aplicada. Además, de las tablas 13 y 14, se concluye que, tanto en términos absolutos como porcentuales, la energía recuperada es directamente proporcional a la potencia, y que la temperatura de equilibrio en el contenedor secundario también aumenta con esta.

Es importante destacar que, en el modelo experimental, se obtuvieron porcentajes de recuperación de energía que se encuentran dentro de un rango de (8-80)%, lo cual evidencia la funcionalidad del TMC-1230 como medio de transferencia de calor.

Para el caso específico del filtro de armónicos, la tabla 15 permitió calcular la energía recuperada bajo condiciones similares a las del experimento. La temperatura de equilibrio alcanzada en el contenedor secundario fue de 24.65 °C, con una temperatura inicial de 23.1°C, lo que resultó en un gradiente de temperatura de 1.55°C. Con estos valores y el tiempo transcurrido, se obtuvo una potencia recuperada de 40.3 W, equivalente al 2.34% de la potencia disipada total de 1718.57 W.

Esto confirma que el porcentaje de recuperación de energía en el caso del filtro de armónicos es mucho menor que en el modelo experimental. Esta diferencia es coherente, ya que, a pesar de que el área superficial y la potencia disipada de las bobinas del filtro son mayores, la temperatura de equilibrio alcanzada es considerablemente más baja que en las pruebas experimentales, lo cual limita la energía transferida.

Finalmente, los resultados de las simulaciones antes y después de la instalación de los filtros de armónicos (Ilustraciones 3 y 4) muestran una reducción significativa en la quinta armónica. Para el primer filtro, la corriente armónica se redujo de un 39.38% a un 22.00%, y para el segundo filtro, de un 38.84% a un 16.43%, lo que representa reducciones del 17.38% y 22.41%, respectivamente.

Al analizar el gráfico 4, se observan valores de 22.11% y 16.54% de corriente armónica en la quinta armónica para los filtros 1 y 2, respectivamente. Comparándolos con los valores de la imagen 3, se calculan reducciones de 17.27% y 22.30%. De estos resultados puede inferirse que, en las simulaciones donde se aumentó la impedancia en un 0.1%, debido al efecto de la temperatura, los porcentajes de reducción de armónicos fueron menores, lo que evidencia el impacto térmico sobre el comportamiento armónico del sistema.

## **Viabilidad técnica**

El presente proyecto propone la implementación de un sistema de enfriamiento líquido, utilizando el fluido TMC-1230, como medio de mejora térmica en filtros pasivos de armónicos empleados en sistemas eléctricos industriales. Más allá de la tradicional función de reducir la temperatura de operación de estos filtros y mitigar el impacto térmico, este proyecto se centra en evaluar la viabilidad de recuperar parte

de la energía térmica disipada, producto de la distorsión armónica en el sistema. La investigación se enfoca en determinar si dicha energía, usualmente considerada una pérdida inevitable, puede ser aprovechada eficazmente mediante un sistema de transferencia térmica controlado.

### **Compatibilidad con tecnologías existentes**

Desde el punto de vista de integración, el sistema propuesto es completamente compatible con la infraestructura eléctrica convencional. Los filtros de armónicos estudiados son del tipo pasivo, y el sistema de enfriamiento líquido se incorpora sin modificar la topología del circuito eléctrico ni alterar los parámetros fundamentales de operación. El fluido TMC-1230, además, presenta propiedades dieléctricas, baja conductividad térmica y alta estabilidad química, lo cual permite su uso seguro en aplicaciones eléctricas sin riesgo de cortocircuitos ni corrosión, siempre que se sigan los protocolos establecidos por el fabricante (TMC Industries, 2023).

### **Evidencia cuantitativa que respalda la viabilidad**

A lo largo del desarrollo experimental se obtuvieron resultados que respaldan la factibilidad técnica del sistema. Los valores de temperatura de equilibrio alcanzados, tanto en el modelo experimental como en el filtro de armónicos, demuestran que el sistema de enfriamiento reduce de forma significativa la temperatura de operación.

- En el modelo experimental, se logró observar una clara disminución de la temperatura al aplicar el fluido refrigerante, con reducciones térmicas considerables, comparadas con condiciones de convección natural en aire.
- El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ , calculado experimentalmente, arrojó valores dentro del rango esperado para sistemas de inmersión monofásicos ( $50\text{--}1000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ), lo cual valida el comportamiento térmico del fluido.
- Se validaron las propiedades dieléctricas del líquido TMC-1230, al mantener un circuito con una carga conectada en sus condiciones de operación, al mismo tiempo que el circuito se encontraba sumergido en el fluido.
- Además, se comprobó que es posible recuperar parte de la energía térmica disipada. En el caso del filtro de armónicos real, se obtuvo una potencia

recuperada de 40.3 W, equivalente al 2.34% de la potencia disipada, mientras que en el modelo experimental se alcanzaron porcentajes considerablemente mayores.

Estas evidencias respaldan la hipótesis del proyecto, demostrando que es técnicamente posible mejorar la disipación térmica mediante refrigeración líquida, y que existe un potencial real para la recuperación de energía en ciertas condiciones.

### **Disponibilidad de materiales y componentes**

Los materiales requeridos para la implementación del sistema propuesto en un filtro de armónicos real son de disponibilidad comercial y no demandan tecnologías de fabricación especializadas. A diferencia del modelo experimental, en el que se emplearon cables y bombillos como cargas térmicas, la aplicación práctica no requiere estos componentes. La instalación en campo únicamente requiere una cápsula de vidrio resistente a altas temperaturas que garantice un cierre hermético, evitando la fuga del fluido TMC-1230, así como materiales aislantes que aseguren una adecuada conservación del gradiente térmico. Estos elementos pueden ser adquiridos fácilmente a través de proveedores nacionales o internacionales, lo que confirma la factibilidad técnica del montaje en condiciones industriales reales.

### **Consideración de limitaciones técnicas**

Se reconocen ciertas limitaciones técnicas en el diseño propuesto, tales como:

- Pérdidas térmicas inevitables a pesar del aislamiento.
- Variaciones en el coeficiente de transferencia  $h$  en función de múltiples factores, como turbulencia del fluido, geometría del sistema y temperatura de operación.
- Porcentaje bajo de energía recuperada en el sistema real, debido a la menor temperatura de equilibrio alcanzada en condiciones normales de trabajo del filtro.

Sin embargo, estas limitaciones no comprometen la viabilidad técnica del sistema, ya que han sido debidamente consideradas en el análisis de resultados, permitiendo tomar decisiones fundamentadas para mejorar el diseño futuro.

Con base en la compatibilidad con tecnologías existentes, la disponibilidad de materiales, los resultados experimentales obtenidos y la validación matemática de los principales parámetros térmicos, se concluye que el proyecto es técnicamente viable. El uso de enfriamiento líquido con TMC-1230 permite mejorar el comportamiento térmico de filtros de armónicos y abre la posibilidad de recuperar una fracción de la energía disipada, lo cual puede representar un avance significativo en términos de eficiencia térmica y confiabilidad operativa en sistemas eléctricos industriales.

## Conclusiones

- El enfriamiento líquido con TMC-1230 reduce eficazmente la temperatura de los componentes del filtro de armónicos en comparación con la convección natural por aire, disminuyendo las pérdidas, al recupera un 2.4% sobre dichas pérdidas y mejorando la estabilidad del sistema, lo que respalda la viabilidad de su implementación.
- Las propiedades térmicas del TMC-1230, con un coeficiente de transferencia de calor por convección calculado de  $354.84 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , fueron validadas experimentalmente, confirmando su compatibilidad dieléctrica al permitir la operación segura de componentes eléctricos sumergidos sin cortocircuitos.
- El modelo de enfriamiento desarrollado, que integra componentes inductivos y capacitivos con enfriamiento por inmersión en TMC-1230, fue validado mediante pruebas térmicas con una fuente de calor en condiciones controladas, demostrando su viabilidad técnica y compatibilidad con la infraestructura eléctrica existente.
- Las simulaciones en ETAP revelaron que un aumento del 0.1% en la impedancia inductiva debido al calentamiento de las bobinas reduce ligeramente la capacidad del filtro para mitigar la distorsión armónica total (THD), indicando que el control térmico puede mejorar indirectamente el desempeño armónico.
- La transferencia de energía térmica al líquido TMC-1230, evaluada mediante un modelo matemático, cuantificó un 2.34% de energía recuperada en el filtro real, con porcentajes mayores en el prototipo experimental, evidenciando el potencial para diseñar sistemas energéticamente más sostenibles.

## **Recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos y el análisis técnico desarrollado, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras mejoras, escalabilidad y desarrollo del sistema propuesto:

### **1. Optimización del diseño térmico**

Evaluar el uso de tratamientos superficiales o acabados térmicamente favorables en el material del contenedor del TMC-1230, para mejorar la transferencia de calor. Aunque todas las bobinas se encuentran en contacto directo con el fluido, optimizar el entorno térmico del sistema de contención podría favorecer una disipación más eficiente sin intervenir los componentes eléctricos.

Ampliar la investigación hacia el uso de intercambiadores de calor de placas compactas, diseñados para operar en condiciones de ebullición bifásica. En caso de aplicarse esta técnica, se sugiere considerar la incorporación de un sistema de condensación complementario que permita cerrar el ciclo térmico y mejorar el aprovechamiento del cambio de fase del TMC-1230.

### **2. Escalabilidad a condiciones industriales**

Adoptar un sistema de circulación forzada del TMC-1230, con el objetivo de evitar una posible estratificación térmica y mantener una transferencia de calor uniforme en aplicaciones de mayor carga o en ambientes industriales.

Diseñar un sistema robusto de sellado y manejo de presión del fluido dieléctrico, utilizando materiales compatibles con el TMC-1230 y resistentes a la corrosión, en especial si se planea operar bajo condiciones de cambio de fase o altas temperaturas.

### **3. Integración energética**

Integrar el sistema de recuperación de calor con procesos industriales auxiliares como el calentamiento de agua o secado de materiales. Esta integración permite reutilizar de forma directa la energía calórica disipada por el filtro en otras etapas del proceso productivo.

Asimismo, se recomienda considerar el uso de materiales de cambio de fase (PCM) para almacenar el calor recuperado en aplicaciones con demandas térmicas variables, facilitando su liberación controlada en función de la necesidad energética del sistema.

#### **4. Evaluación económica y ambiental**

Realizar un análisis detallado del retorno de inversión (ROI), incorporando los ahorros energéticos esperados, la prolongación de la vida útil de los componentes involucrados y el valor potencial de la energía calórica recuperada como insumo secundario.

Adicionalmente, implementar un plan de manejo responsable del TMC-1230 que contemple su reciclaje y reutilización a través de los servicios de TMC Industries o canales equivalentes, con el fin de garantizar sostenibilidad ambiental y cumplimiento normativo.

#### **5. Recomendaciones para futuras investigaciones**

Investigar fluidos dieléctricos emergentes que presenten una mayor eficiencia en la transferencia térmica y un menor impacto ambiental, comparando su comportamiento con el TMC-1230, especialmente en condiciones de inmersión y ebullición bifásica.

#### **6. Aspectos prácticos de implementación**

Priorizar un diseño de sistema que minimice la complejidad en el sellado y manejo de presión, mediante el uso de componentes estandarizados y materiales accesibles. Esto permitirá una reducción en los costos de fabricación, mantenimiento y operación.

## Referencias

1. Abubakar, R. A., & Nuhu, I. (2024). Geothermo-mechanical energy conversion using shape memory alloy heat engine. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 35(1), 38.
2. Al-Hinaai, A. (2024). Di-electric liquid cooling for future 20 kV power modules [Tesis doctoral, INSA de Lyon].
3. Areaciencias. (02 de Mayo de 2025). Obtenido de <https://www.areaciencias.com/fisica/conductividad-termica/>
4. Carnovale, D. J., Hurd, E., & Graziani, S. (2021). Harmonic solutions explained [White Paper WP040009EN]. Eaton.
5. Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico* (3ª ed.). McGraw-Hill.
6. Chen, H., Zhang, Y., & Li, J. (2022). Sustainable energy recovery from thermal processes: A review. *Energy, Sustainability and Society*, 12(1), 46.
7. Delette, G., Soupremanien, U., & Loudot, S. (2022). Thermal management design of transformers for Dual Active Bridge power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(7), 8301–8309.
8. Dimitriev, O. P. (2023). Thermomechanical energy converters for harvesting thermal energy: A review. *Journal of Renewable Materials*, 11(4), 1557–1592.
9. Doran, B. M. (2019). Surface engineering solutions for immersion phase change cooling of electronics [Tesis de maestría, Louisiana Tech University].
10. García Alba, M. (2021). Diseño de un intercambiador de calor para una planta de relicuefacción de GNL [Trabajo Fin de Grado, Universidade da Coruña]. *RUC Repositorio Institucional*.
11. García Mogollón, S. J., & Mendoza Navarro, G. (2019). Estudio exergoeconómico de una central térmica comparando el sistema de enfriamiento del aire de admisión evaporativo actual con un sistema de enfriamiento por absorción aprovechando los gases de combustión [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. *Repositorio Institucional UNAB*.

12. Han, J.-W., Garud, K. S., Hwang, S.-G., & Lee, M.-Y. (2022). Experimental study on dielectric fluid immersion cooling for thermal management of lithium-ion battery. *Symmetry*, 14(10), 2126.
13. Harmonic Filters, M. Q. (15 de 03 de 2025). Obtenido de <https://mtecorp.com/products/harmonic-filters/matrix-ap/model-code-and-dimensions/>
14. Hnayno, M., Chehade, A., Klabi, H., Polidori, G., & Maalouf, C. (2023). Experimental investigation of a data-centre cooling system using a new single-phase immersion/liquid technique. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 102925.
15. IEEE. (2014). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems (IEEE Std 519-2014). IEEE.
16. LANPU. (22 de 04 de 2025). Obtenido de <https://www.cableesmaltado.com/productos/alambre-de-cobre-esmaltado/alambre-redondeado-de-cobre-esmaltado.html>
17. Liang, G., & Mudawar, I. (2019). Review of pool boiling enhancement by surface modification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 892–933.
18. Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: A review. *Energies*, 13(21), 5792.
19. Mahela, O. P., Khan, B., & Tanwar, S. (2021). Harmonic mitigation and power quality improvement in utility grid with solar energy penetration using distribution static compensator. *IET Power Electronics*, 14(5), 912–922.
20. MTE Corporation. (2013). Technical reference manual: Matrix AP harmonic filter (FORM: MAP-TRM-E). MTE Corporation.
21. National Fire Protection Association. (2020). *NFPA 70: National Electrical Code* (2020 ed.). National Fire Protection Association.
22. Nazari, M. H., Hosseini, S. H., & Azad-Farsani, E. (2019). Shapley value-based techno-economic framework for harmonic and loss mitigation. *IEEE Access*, 7, 119576–119585.
23. Olympios, A. V., McTigue, J. D., Farres-Antunez, P., Tafone, A., Romagnoli, A., Li, Y., Ding, Y., & Markides, C. N. (2021). Progress and prospects of

thermo-mechanical energy storage—a critical review. *Progress in Energy*, 3(2), 022001.

24. Pambudi, N. A., Yusuf, A. M., & Sarifudin, A. (2022). The use of single-phase immersion cooling by using two types of dielectric fluid for data center energy savings. *Energy Engineering*, 119(1), 275–286.
25. Pérez Rojas, W. O. (2021). Diseño y construcción de un prototipo para recuperación de calor residual en el calderín pirotubular de 2 BHP del laboratorio de energía de la carrera de ingeniería mecánica [Proyecto Técnico de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Digital UTA.
26. Rahman, S. M. I., Moghassemi, A., Arsalan, A., Timilsina, L., Chamarthi, P. K., Papari, B., Ozkan, G., & Edrington, C. S. (2024). Emerging trends and challenges in thermal management of power electronic converters: A state of the art review. *IEEE Access*, 12, 50633–50672.
27. Rao, U. M., Fofana, I., Jaya, T., Rodriguez-Celis, E. M., Jalbert, J., & Picher, P. (2019). Alternative dielectric fluids for transformer insulation system: Progress, challenges, and future prospects. *IEEE Access*, 7, 183838–183853.
28. Ravalli, R. (2022). Critical overview and feasibility study of two-phase immersion cooling systems for power electronics [Tesis de maestría, Politecnico di Torino].
29. Ristic-Smith, A., & Rogers, D. J. (2024). Compact two-phase immersion cooling with dielectric fluid for PCB-based power electronics. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 5, 697–719.
30. Romero Daza, J. F. (2020). Herramienta para la selección de filtros pasivos de armónicos [Trabajo de grado, Universidad de Pamplona].
31. Samaniego Corella, G. F. (2020). Diseño de un sistema de recuperación de energía y agua de purgas de los calderos de una empresa textil [Tesis de pregrado, Universidad Internacional SEK]. *Repositorio DSpace - UISEK*.
32. Silva Ortega, J., Ramírez Restrepo, R., & Sagastume Gutiérrez, A. (s.f.). Optimización de un intercambiador de calor para la recuperación energética en generadores termoeléctricos aplicados a motores diésel estacionarios.
33. SISTEMES, D. (19 de 04 de 2025). Ayuda de SOLIDWORKS. Obtenido de <https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Sim>

ulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection\_Topics/Convection\_Heat\_Coefficient.htm

34. Sixel, W. R., Kaviany, M., & Leary, A. M. (s.f.). Ceramic heat pipe for thermal management of a high frequency inductor.
35. Solís-Ortega, R., Gómez-Ramírez, G. A., Brenes-Fallas, D., Morales-Hernández, J. P., & Umaña-Mondragón, M. (2025). *Modelado de redes de distribución usando ETAP*. *Tecnología en Marcha*, 38(1), 48–62.  
<https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7104>
36. Synthesia Technology. (22 de 05 de 2025). Obtenido de <https://blog.synthesia.com/es/como-es-la-conductividad-termica-del-poliuretano>
37. TMC Industries, Inc. (s.f.-a). Technical data sheet: TMC-1230.
38. TMC Industries, Inc. (s.f.-b). Safety data sheet: TMC-1230.
39. Weather Spark. (02 de 05 de 2025). Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/15492/Clima-promedio-en-Curridabat-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>
40. Yang, N.-C., & Hsu, Y.-W. (2023). OpenDSS-based harmonic power flow analysis for distribution systems with passive power filters. *IEEE Access*, 11, 69190–69199.

## Apéndice

Apéndice 1. Parámetros base del filtro de armónicos para el compresor 6, usados en la simulación hecha por APAME para la instalación de los filtros

Harmonic Filter Editor - Filtro COMP#6

Filter Type: Single-Tuned

Capacitor C 1: kvar 30.61, 1-Ph;  $\mu\text{F}$  1058, 1-Ph; Rated kV 0.277; Max. kV 0.48

Inductor L 1:  $X_{L1}$  0.1135; Q Factor 40; Max. I 482

Capacitor C 2: kvar 0, 1-Ph;  $\mu\text{F}$  0, 1-Ph; Rated kV 0; Max. kV 0

Inductor L 2:  $X_{L2}$  0; Q Factor 0; Max. I 0

Loading: Operating Load: kW 0 +j kvar 0; Resistor: R 0

Size Filter ...

Filtro COMP#6

OK Cancel

Apéndice 2. Parámetros del filtro de armónicos para el compresor 6, con cambio en el valor de la inductancia.

Harmonic Filter Editor - Filtro COMP#6

Filter Type: Single-Tuned

Capacitor C 1: kvar 30.61, 1-Ph;  $\mu\text{F}$  1058, 1-Ph; Rated kV 0.277; Max. kV 0.48

Inductor L 1:  $X_{L1}$  0.1136; Q Factor 40; Max. I 482

Capacitor C 2: kvar 0, 1-Ph;  $\mu\text{F}$  0, 1-Ph; Rated kV 0; Max. kV 0

Inductor L 2:  $X_{L2}$  0; Q Factor 0; Max. I 0

Loading: Operating Load: kW 0 +j kvar 0; Resistor: R 0

Size Filter ...

Filtro COMP#6

OK Cancel

Apéndice 3. Parámetros base del filtro de armónicos para el compresor 1, usados en la simulación hecha por APAME para la instalación de los filtros

Harmonic Filter Editor - Filtro Comp#1

Info

Parameter

Reliability

Remarks

Comment

Filter Type: Single-Tuned

Capacitor C 1

kvar: 30.61 1-Ph

$\mu$ F: 1058 1-Ph

Rated kV: 0.277

Max. kV: 0.48

Inductor L 1

$X_{L1}$ : 0.1135

Q Factor: 40

Max. I: 482

Capacitor C 2

kvar: 0 1-Ph

$\mu$ F: 0 1-Ph

Rated kV: 0

Max. kV: 0

Inductor L 2

$X_{L2}$ : 0

Q Factor: 0

Max. I: 0

Loading

Operating Load:

kW: 0 +j kvar: 0

Resistor

R: 0

Size Filter ...

Filtro Comp#1

OK Cancel

Apéndice 4. Parámetros del filtro de armónicos para el compresor 1, con cambio en el valor de la inductancia.

Harmonic Filter Editor - Filtro Comp#1

Info

Parameter

Reliability

Remarks

Comment

Filter Type: Single-Tuned

Capacitor C 1

kvar: 30.61 1-Ph

$\mu$ F: 1058 1-Ph

Rated kV: 0.277

Max. kV: 0.48

Inductor L 1

$X_{L1}$ : 0.1136

Q Factor: 40

Max. I: 482

Capacitor C 2

kvar: 0 1-Ph

$\mu$ F: 0 1-Ph

Rated kV: 0

Max. kV: 0

Inductor L 2

$X_{L2}$ : 0

Q Factor: 0

Max. I: 0

Loading

Operating Load:

kW: 0 +j kvar: 0

Resistor

R: 0

Size Filter ...

Filtro Comp#1

OK Cancel

## Anexos

*Anexo 1. Tabla 430.250 Corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna*

Caballos de fuerza (hp)	Tipo de inducción de jaula de ardilla y de rotor devanado (amperes)							Tipo síncrono de factor de potencia unitario* (amperes)			
	115 volts	200 volts	208 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts
½	4.4	2.5	2.4	2.2	1.1	0.9	—	—	—	—	—
¾	6.4	3.7	3.5	3.2	1.6	1.3	—	—	—	—	—
1	8.4	4.8	4.6	4.2	2.1	1.7	—	—	—	—	—
1½	12.0	6.9	6.6	6.0	3.0	2.4	—	—	—	—	—
2	13.6	7.8	7.5	6.8	3.4	2.7	—	—	—	—	—
3	—	11.0	10.6	9.6	4.8	3.9	—	—	—	—	—
5	—	17.5	16.7	15.2	7.6	6.1	—	—	—	—	—
7½	—	25.3	24.2	22	11	9	—	—	—	—	—
10	—	32.2	30.8	28	14	11	—	—	—	—	—
15	—	48.3	46.2	42	21	17	—	—	—	—	—
20	—	62.1	59.4	54	27	22	—	—	—	—	—
25	—	78.2	74.8	68	34	27	—	53	26	21	—
30	—	92	88	80	40	32	—	63	32	26	—
40	—	120	114	104	52	41	—	83	41	33	—
50	—	150	143	130	65	52	—	104	52	42	—
60	—	177	169	154	77	62	16	123	61	49	12
75	—	221	211	192	96	77	20	155	78	62	15
100	—	285	273	248	124	99	26	202	101	81	20
125	—	359	343	312	156	125	31	253	126	101	25
150	—	414	396	360	180	144	37	302	151	121	30
200	—	552	528	480	240	192	49	400	201	161	40
250	—	—	—	—	302	242	60	—	—	—	—
300	—	—	—	—	361	289	72	—	—	—	—
350	—	—	—	—	414	336	83	—	—	—	—
400	—	—	—	—	477	382	95	—	—	—	—
450	—	—	—	—	515	412	103	—	—	—	—
500	—	—	—	—	590	472	118	—	—	—	—

Obtenido del NEC, 2020.

Anexo 2. Tabla 310.16 Ampacidades de conductores aislados, con no más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o la tierra (directamente enterrados)

Calibre AWG o kcmil	Temperatura nominal del conductor [ver la Tabla 310.4(A)]						Calibre AWG o kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Tipos TW, UF		Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, XHWN USE, ZW	Tipos TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, PFA, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, XHWN, XHWN-2, XHHN, Z, ZW-2	Tipos TW, UF		
	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			
18*	—	—	14	—	—	—	—
16*	—	—	18	—	—	—	—
14*	15	20	25	—	—	—	—
12*	20	25	30	15	20	25	12*
10*	30	35	40	25	30	35	10*
8	40	50	55	35	40	45	8
6	55	65	75	40	50	55	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	115	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	145	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0
250	215	255	290	170	205	230	250
300	240	285	320	195	230	260	300
350	260	310	350	210	250	280	350
400	280	335	380	225	270	305	400
500	320	380	430	260	310	350	500
600	350	420	475	285	340	385	600
700	385	460	520	315	375	425	700
750	400	475	535	320	385	435	750
800	410	490	555	330	395	445	800
900	435	520	585	355	425	480	900
1000	455	545	615	375	445	500	1000
1250	495	590	665	405	485	545	1250
1500	525	625	705	435	520	585	1500
1750	545	650	735	455	545	615	1750
2000	555	665	750	470	560	630	2000

Notas:

1. La sección 310.15(B) debe usarse de referencia para los factores de corrección de la ampacidad cuando la temperatura ambiente es distinta de 30°C (86°F).

2. La sección 310.15(C)(1) debe usarse de referencia para más de tres conductores portadores de corriente.

3. La sección 310.16 debe usarse de referencia para las condiciones de uso.

\*La sección 240.4(D) debe usarse de referencia para las limitaciones de protección contra sobrecorriente del conductor, excepto según se modifique en otra parte del Código.

Obtenido del NEC, 2020.

Anexo 3. Capítulo 9, Tabla 9 Resistencia y reactancia en corriente alterna para los cables para 600 volts, 3 fases a 60 Hz y 75°C (167°F) - Tres conductores individuales en un conduit

Calibre (AWG o kcmil)	Ohms al neutro por kilómetro															Calibre (AWG o kcmil)
	Ohms al neutro por 1000 pies															
	$X_L$ (Reactancia) para todos los conductores		Resistencia en corriente alterna para conductores de cobre sin recubrir			Resistencia en corriente alterna para conductores de aluminio			Z eficaz a 0.85 PF para conductores de cobre sin recubrir			Z eficaz a 0.85 PF para conductores de aluminio				
	Conduit de PVC o Aluminio	Conduit de acero	Conduit de PVC	Conduit de aluminio	Conduit de acero	Conduit de PVC	Conduit de aluminio	Conduit de acero	Conduit de PVC	Conduit de aluminio	Conduit de acero	Conduit de PVC	Conduit de aluminio	Conduit de acero		
14	0.190 0.058	0.240 0.073	10.2 3.1	10.2 3.1	10.2 3.1	—	—	—	8.9 2.7	8.9 2.7	8.9 2.7	—	—	—	14	
12	0.177 0.054	0.223 0.068	6.6 2.0	6.6 2.0	6.6 2.0	10.5 3.2	10.5 3.2	10.5 3.2	5.6 1.7	5.6 1.7	5.6 1.7	9.2 2.8	9.2 2.8	9.2 2.8	12	
10	0.164 0.050	0.207 0.063	3.9 1.2	3.9 1.2	3.9 1.2	6.6 2.0	6.6 2.0	6.6 2.0	3.6 1.1	3.6 1.1	3.6 1.1	5.9 1.8	5.9 1.8	5.9 1.8	10	
8	0.171 0.052	0.213 0.065	2.56 0.78	2.56 0.78	2.56 0.78	4.3 1.3	4.3 1.3	4.3 1.3	2.26 0.69	2.26 0.69	2.30 0.70	3.6 1.1	3.6 1.1	3.6 1.1	8	
6	0.167 0.051	0.210 0.064	1.61 0.49	1.61 0.49	1.61 0.49	2.66 0.81	2.66 0.81	2.66 0.81	1.44 0.44	1.48 0.45	1.48 0.45	2.33 0.71	2.36 0.72	2.36 0.72	6	
4	0.157 0.048	0.197 0.060	1.02 0.31	1.02 0.31	1.02 0.31	1.67 0.51	1.67 0.51	1.67 0.51	0.95 0.29	0.95 0.29	0.98 0.30	1.51 0.46	1.51 0.46	1.51 0.46	4	
3	0.154 0.047	0.194 0.059	0.82 0.25	0.82 0.25	0.82 0.25	1.31 0.40	1.35 0.41	1.31 0.40	0.75 0.23	0.79 0.24	0.79 0.24	1.21 0.37	1.21 0.37	1.21 0.37	3	
2	0.148 0.045	0.187 0.057	0.62 0.19	0.66 0.20	0.66 0.20	1.05 0.32	1.05 0.32	1.05 0.32	0.62 0.19	0.62 0.19	0.66 0.20	0.98 0.30	0.98 0.30	0.98 0.30	2	
1	0.151 0.046	0.187 0.057	0.49 0.15	0.52 0.16	0.52 0.16	0.82 0.25	0.85 0.26	0.82 0.25	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	0.79 0.24	0.79 0.24	0.82 0.25	1	
1/0	0.144 0.044	0.180 0.055	0.39 0.12	0.43 0.13	0.39 0.12	0.66 0.20	0.69 0.21	0.66 0.20	0.43 0.13	0.43 0.13	0.43 0.13	0.62 0.19	0.66 0.20	0.66 0.20	1/0	
2/0	0.141 0.043	0.177 0.054	0.33 0.10	0.33 0.10	0.33 0.10	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	0.36 0.11	0.36 0.11	0.36 0.11	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	2/0	
3/0	0.138 0.042	0.171 0.052	0.253 0.077	0.269 0.082	0.259 0.079	0.43 0.13	0.43 0.13	0.43 0.13	0.289 0.088	0.302 0.092	0.308 0.094	0.43 0.13	0.43 0.13	0.46 0.14	3/0	
4/0	0.135 0.041	0.167 0.051	0.203 0.062	0.220 0.067	0.207 0.063	0.33 0.10	0.36 0.11	0.33 0.10	0.243 0.074	0.256 0.078	0.262 0.080	0.36 0.11	0.36 0.11	0.36 0.11	4/0	
250	0.135 0.041	0.171 0.052	0.171 0.052	0.187 0.057	0.177 0.054	0.279 0.085	0.295 0.090	0.282 0.086	0.217 0.066	0.230 0.070	0.240 0.073	0.308 0.094	0.322 0.098	0.33 0.10	250	
300	0.135 0.041	0.167 0.051	0.144 0.044	0.161 0.049	0.148 0.045	0.233 0.071	0.249 0.076	0.236 0.072	0.194 0.059	0.207 0.063	0.213 0.065	0.269 0.082	0.282 0.086	0.289 0.088	300	
350	0.131 0.040	0.164 0.050	0.125 0.038	0.141 0.043	0.128 0.039	0.200 0.061	0.217 0.066	0.207 0.063	0.174 0.053	0.190 0.058	0.197 0.060	0.240 0.073	0.253 0.077	0.262 0.080	350	
400	0.131 0.040	0.161 0.049	0.108 0.033	0.125 0.038	0.115 0.035	0.177 0.054	0.194 0.059	0.180 0.055	0.161 0.049	0.174 0.053	0.184 0.056	0.217 0.066	0.233 0.071	0.240 0.073	400	
500	0.128 0.039	0.157 0.048	0.089 0.027	0.105 0.032	0.095 0.029	0.141 0.043	0.157 0.048	0.148 0.045	0.141 0.043	0.157 0.048	0.164 0.050	0.187 0.057	0.200 0.061	0.210 0.064	500	
600	0.128 0.039	0.157 0.048	0.075 0.023	0.092 0.028	0.082 0.025	0.118 0.036	0.135 0.041	0.125 0.038	0.131 0.040	0.144 0.044	0.154 0.047	0.167 0.051	0.180 0.055	0.190 0.058	600	
750	0.125 0.038	0.157 0.048	0.062 0.019	0.079 0.024	0.069 0.021	0.095 0.029	0.112 0.034	0.102 0.031	0.118 0.036	0.131 0.040	0.141 0.043	0.148 0.045	0.161 0.049	0.171 0.052	750	
1000	0.121 0.037	0.151 0.046	0.049 0.015	0.062 0.019	0.059 0.018	0.075 0.023	0.089 0.027	0.082 0.025	0.105 0.032	0.118 0.036	0.131 0.040	0.128 0.039	0.138 0.042	0.151 0.046	1000	

Obtenido del NEC, 2020.

Anexo 4. Coeficiente de transferencia de calor por convección.

Medio	Coeficiente de transferencia de calor h ( W/m <sup>2</sup> . K)
Aire (convección natural)	5-25
Aire/vapor supercalentado (convección forzada)	20-300
Petróleo (convección forzada)	60-1800
Agua (convección forzada)	300-6000
Agua (en ebullición)	3000-60.000
Vapor (en condensación)	6000-120.000

Tabla obtenida de: (SISTEMES, 2025)

Anexo 5. Rango de tamaño típico para alambre redondeado de cobre esmaltado.

TU POSICIÓN: INICIO > PRODUCTOS > ALAMBRE DE COBRE ESMALTADO



**Alambre Redondeado de Cobre Esmaltado**

**Rango de tamaño (mm):** 0.025-4.5mm;AWG:5-22

**Nivel de resistencia a temperatura (°C):** 130, 155, 180, 200, 220

**Estándar:** IEC, NEMA, GB, JIS

**Color:** Color natural, rojo, azul, etc.

**UL NO:** E345303

**Embalajeaaa:** Carrete de madera de PT-25 PT-30 PT-60 PT-90 PT-200 y requisitos del cliente.

---

Estamos aquí para ayudar: Maneras fáciles de obtener las respuestas que necesitas.

ENVIAR E-MAIL
 OBTENER EL PRECIO

Obtenida de: (LANPU, 2025)

Muestra diferentes niveles de resistencia a temperatura, de acuerdo con los tipos (Calibre) de alambre de cobre esmaltado, con estándares IEC, NEMA, GC, JIS.

Anexo 6. Tabla de coeficiente de temperatura resistencia.

```
TEMPERATURE COEFFICIENTS OF RESISTANCE, AT 20 DEGREES C
Material      Element/Alloy      "alpha" per degree Celsius
=====
Nickel ----- Element ----- 0.005866
Iron ----- Element ----- 0.005671
Molybdenum ---- Element ----- 0.004579
Tungsten ----- Element ----- 0.004403
Aluminum ----- Element ----- 0.004308
Copper ----- Element ----- 0.004041
Silver ----- Element ----- 0.003819
Platinum ----- Element ----- 0.003729
Gold ----- Element ----- 0.003715
Zinc ----- Element ----- 0.003847
Steel* ----- Alloy ----- 0.003
Nichrome ----- Alloy ----- 0.00017
Nichrome V ----- Alloy ----- 0.00013
Manganin ----- Alloy ----- +/- 0.000015
Constantan ----- Alloy ----- -0.000074
* = Steel alloy at 99.5 percent iron, 0.5 percent carbon
```

Muestra los coeficientes de resistencia de diferentes elementos y aleaciones, a 20 grados Celcius. Tabla tomada de la referencia de Kuphaldt (2022).

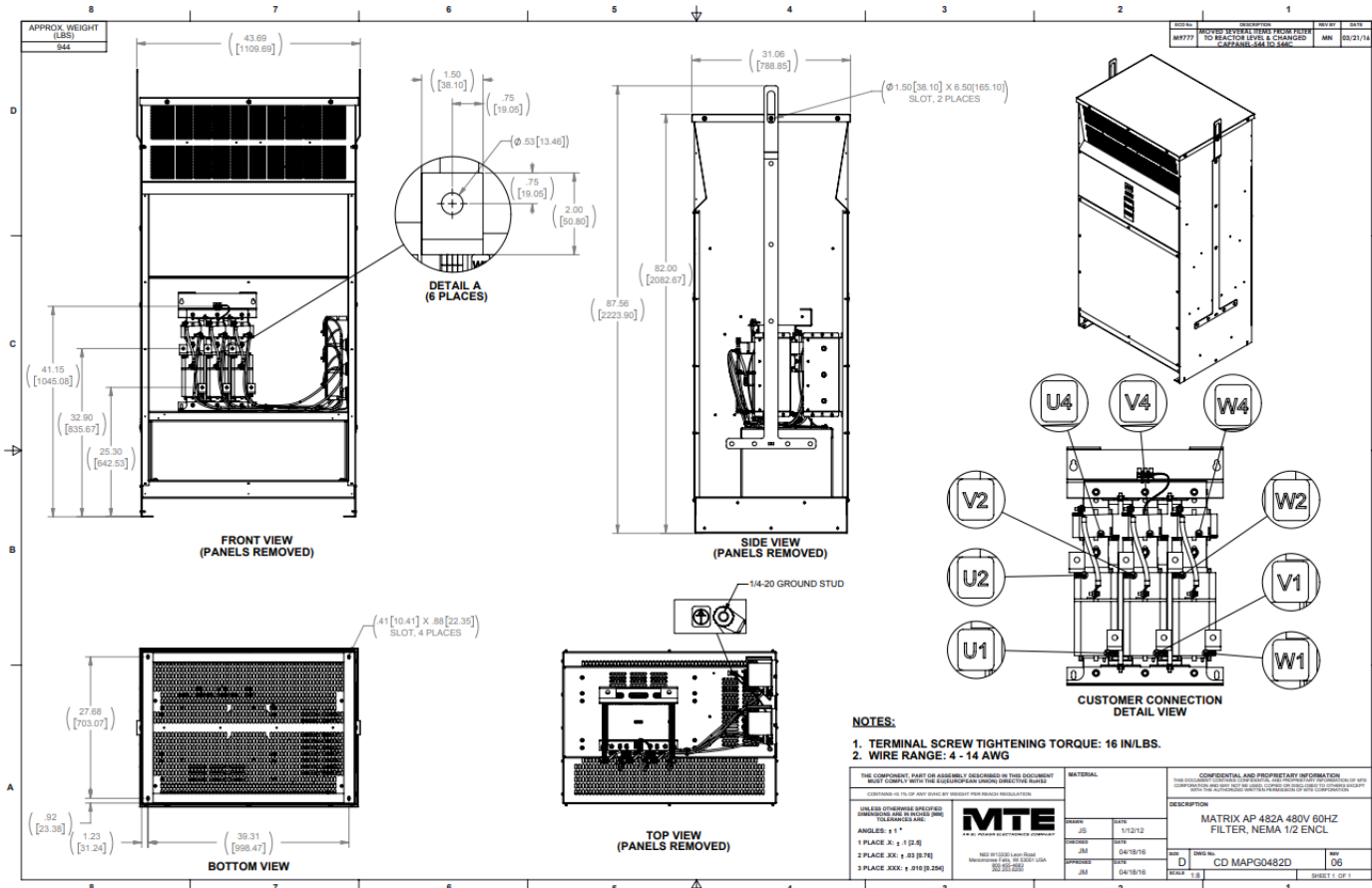
Anexo 7. Matrix AP 480 Volts, 60Hz Selection Tables Enclosed

**Table 4-6: Matrix AP 480V Enclosed**

Motor HP	Filter Amps Rating	Part Number	NEMA 1/2 Enclosure (in.) (H x W x D)	App. Weight (lbs.)	Part Number	NEMA 3R Enclosure (in.) (H x W x D)	App. Weight (lbs.)
3	6	<a href="#">MAPG0006D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	67	<a href="#">MAPW0006D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	75
5	8	<a href="#">MAPG0008D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	68	<a href="#">MAPW0008D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	76
7.5	11	<a href="#">MAPG0011D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	75	<a href="#">MAPW0011D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	83
10	14	<a href="#">MAPG0014D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	80	<a href="#">MAPW0014D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	88
15	21	<a href="#">MAPG0021D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	99	<a href="#">MAPW0021D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	106
20	27	<a href="#">MAPG0027D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	104	<a href="#">MAPW0027D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	112
25	34	<a href="#">MAPG0034D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	114	<a href="#">MAPW0034D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	122
30	44	<a href="#">MAPG0044D</a>	24.0 x 12.5 x 17.9	128	<a href="#">MAPW0044D</a>	24.0 x 12.5 x 23.0	135
40	52	<a href="#">MAPG0052D</a>	33.9 x 18.3 x 20.9	177	<a href="#">MAPW0052D</a>	33.9 x 18.3 x 26.0	188
50	66	<a href="#">MAPG0066D</a>	33.9 x 18.3 x 20.9	190	<a href="#">MAPW0066D</a>	33.9 x 18.3 x 26.0	201
60	83	<a href="#">MAPG0083D</a>	33.9 x 18.3 x 20.9	212	<a href="#">MAPW0083D</a>	33.9 x 18.3 x 26.0	219
75	103	<a href="#">MAPG0103D</a>	33.9 x 18.3 x 20.9	226	<a href="#">MAPW0103D</a>	33.9 x 18.3 x 26.0	237
100	128	<a href="#">MAPG0128D</a>	51.3 x 27.7 x 24.9	370	<a href="#">MAPW0128D</a>	51.3 x 27.7 x 30.0	383
125	165	<a href="#">MAPG0165D</a>	51.3 x 27.7 x 24.9	437	<a href="#">MAPW0165D</a>	51.3 x 27.7 x 30.0	450
150	208	<a href="#">MAPG0208D</a>	51.3 x 27.7 x 24.9	452	<a href="#">MAPW0208D</a>	51.3 x 27.7 x 30.0	464
200	240	<a href="#">MAPG0240D</a>	51.3 x 27.7 x 24.9	488	<a href="#">MAPW0240D</a>	51.3 x 27.7 x 30.0	501
250	320	<a href="#">MAPG0320D</a>	76.0 x 27.7 x 24.9	655	<a href="#">MAPW0320D</a>	76.0 x 27.7 x 34.0	680
300	403	<a href="#">MAPG0403D</a>	76.0 x 27.7 x 24.9	655	<a href="#">MAPW0403D</a>	76.0 x 27.7 x 34.0	680
400	482	<a href="#">MAPG0482D</a>	87.6 x 43.7 x 31.1	944	<a href="#">MAPW0482D</a>	87.6 x 43.7 x 40.1	989
500	636	<a href="#">MAPG0636D</a>	87.6 x 43.7 x 31.1	1084	<a href="#">MAPW0636D</a>	87.6 x 43.7 x 40.1	1129
600	786	<a href="#">MAPG0786D</a>	87.6 x 43.7 x 31.1	1180	<a href="#">MAPW0786D</a>	87.6 x 43.7 x 40.1	1225
700	850	<a href="#">MAPG0850D</a>	84.0 x 52.0 x 36.5	1589	<a href="#">MAPW0850D</a>	84.0 x 52.0 x 45.5	1630
900	1000	<a href="#">MAPG1000D</a>	84.0 x 52.0 x 36.5	1565	<a href="#">MAPW1000D</a>	84.0 x 52.0 x 45.5	1606
1000	1200	<a href="#">MAPG1200D</a>	84.0 x 52.0 x 36.5	1593	<a href="#">MAPW1200D</a>	84.0 x 52.0 x 45.5	1635

*Obtenida de MTE Corporation (2013)*

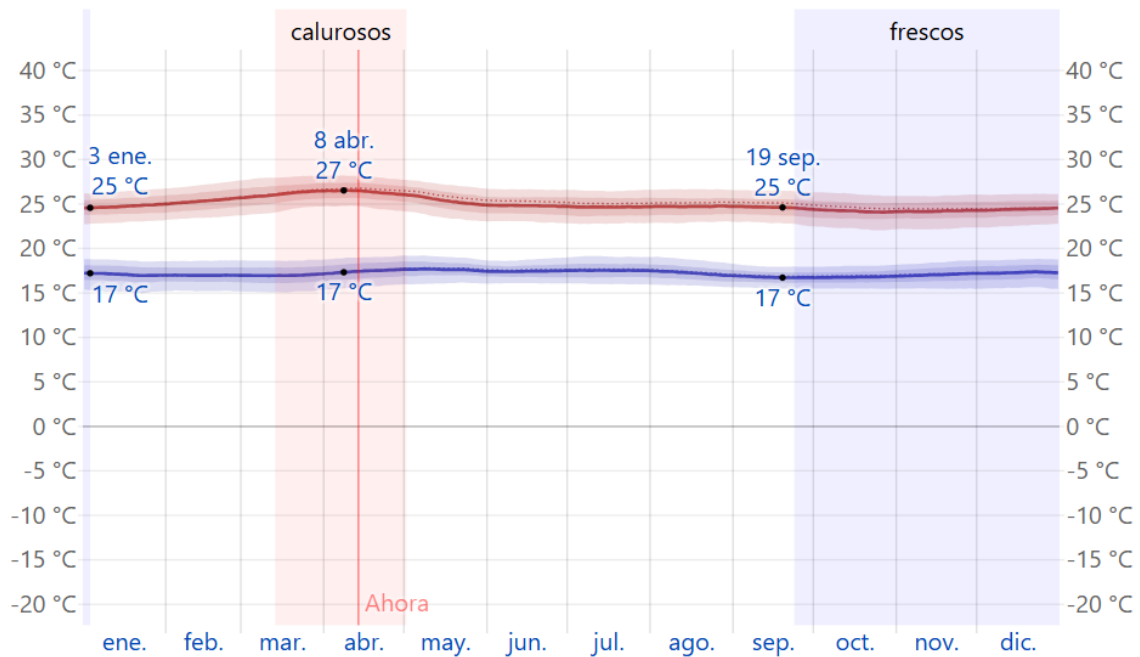
Anexo 8. MATRIX AP 482A 480V 60HZ FILTER, NEMA 1/2 ENC (Part Number MAPG0482D)



Obtenido de: (Harmonic Filters, 2025)

Filtro utilizado en el filtrado de armónicas en compresores.

## Anexo 9. Temperatura máxima y mínima promedio en Curridabat



La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25° a 75°, y 10° a 90°. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes.

Promedio	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Máxima	25 °C	25 °C	26 °C	26 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	24 °C	24 °C	24 °C
Temp.	20 °C	20 °C	21 °C	21 °C	21 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C
Mínima	17 °C	17 °C	17 °C	17 °C	18 °C	17 °C	18 °C	17 °C	17 °C	17 °C	17 °C	17 °C

Obtenido de: (Weather Spark, 2025)

Para usos prácticos de cálculo, se tomó la temperatura ambiente en Curridabat como 20 grados Celsius.

## Anexo 10. Conductividad térmica de diferentes materiales

### CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DIFERENTES MATERIALES

Material	$\lambda$ W/(m·K)	Material	$\lambda$ W/(m·K)
Acero	47 - 58	Hielo	2
Acero inoxidable	12 - 45	Hierro	80,2
Agua	0,58	Hormigón	1,7
Aire	0,025	Ladrillo	0,80
Alcohol	0,16	Ladrillo refractario	0,47 - 1,05
Alpaca	29,1	Latón	81 - 116
Aluminio puro	237	Litio	301,2
Amianto	0,04	Madera	0,04 - 0,4
Bronce	116 - 186	Mercurio	83,7
Caucho	0,16	Mica	0,35
Cemento Portland	0,29	Níquel	52,3
Cinc	106 - 140	Oro	318
Cobre	401	Parafina	0,21
Corcho	0,03 - 0,04	Piedra arenisca	2,4
Diamante	900 - 2300	Plata	429
Estaño	64,0	Plomo	35,0
Fibra de vidrio	0,03 - 0,07	Polipropileno	0,12
Glicerina	0,29	Tierra húmeda	0,8
Helio (superfluides)	infinito	Vidrio	0,6 - 1,1

Obtenida de: (Areencias, 2025)