

**Diseño de un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para sistemas de control de temperatura en un Datacenter**

Odair Hernández Zubieta

Asesor

Amaimen Guillén Pacheco, PhD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Electrónica

2026

## Resumen

El crecimiento sostenido de los servicios digitales y de la computación en la nube ha incrementado la importancia de los centros de datos como infraestructuras críticas para el almacenamiento, procesamiento y transmisión de información. En estos entornos, los sistemas de control de temperatura cumplen una función esencial, ya que el funcionamiento seguro de los equipos de tecnología de la información depende de condiciones ambientales estables. La presencia de fallas en los sistemas de climatización puede generar sobrecalentamiento, degradación de los componentes electrónicos e interrupciones en la prestación de los servicios. El objetivo de esta investigación fue diseñar un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los sistemas de control de temperatura de un datacenter, basado en buenas prácticas de ingeniería y en criterios de criticidad de los equipos. La metodología empleada corresponde a un enfoque aplicado de carácter descriptivo–propositivo, que incluye revisión documental, identificación del inventario técnico de los sistemas HVAC, análisis de criticidad de los equipos y definición de variables operativas críticas para su monitoreo. Se propuso un modelo de gestión del mantenimiento que integra actividades preventivas programadas, monitoreo basado en condición, uso de plataformas de supervisión como BMS/SCADA y definición de indicadores de desempeño orientados a evaluar la confiabilidad del sistema. La implementación del plan permitió reducir la probabilidad de fallas imprevistas, optimizar el consumo energético y mejorar la disponibilidad de la infraestructura térmica, fortaleciendo la confiabilidad operativa de los sistemas de climatización en centros de datos.

**Palabras clave:** Datacenter, climatización, mantenimiento predictivo, HVAC, confiabilidad operativa.

## Abstract

The sustained growth of digital services and cloud computing has increased the importance of data centers as critical infrastructure for the storage, processing, and transmission of information. In these environments, temperature control systems play an essential role, as the safe operation of information technology equipment depends on stable environmental conditions. Failures in climate control systems can lead to overheating, degradation of electronic components, and service interruptions. The main purpose of this research is to design a preventive and predictive maintenance plan for the temperature control systems of a data center, based on good engineering practices and equipment criticality criteria. The methodology employed is an applied, descriptive-propositive approach, which includes a literature review, identification of the technical inventory of HVAC systems, analysis of equipment criticality, and definition of critical operating variables for monitoring. As a result, a maintenance management model is proposed that integrates scheduled preventive activities, condition-based monitoring, the use of supervisory platforms such as BMS/SCADA, and the definition of performance indicators aimed at evaluating system reliability. Implementing the plan reduces the probability of unforeseen failures, optimizes energy consumption, and improves the availability of the thermal infrastructure, strengthening the operational reliability of air conditioning systems in data centers.

**Keywords:** Data center, cooling systems, predictive maintenance, HVAC, operational reliability.

## Tabla de contenido

Introducción .....	8
Estado del Arte.....	10
Planteamiento del Problema .....	17
Pregunta de Investigación .....	20
Justificación.....	21
Objetivos .....	22
Objetivo General .....	22
Objetivos Específicos .....	22
Marco Conceptual.....	23
Metodología .....	27
Unidad de análisis .....	27
Fases Metodológicas .....	28
<i>Fase 1: Revisión Documental y Normativa</i> .....	28
<i>Fase 2: Levantamiento del Inventario Técnico</i> .....	28
<i>Fase 3: Análisis de Criticidad de Equipos</i> .....	29
<i>Fase 4: Identificación de Variables Críticas a Monitorear</i> .....	29
<i>Fase 5: Diseño del Plan de Mantenimiento</i> .....	29
<i>Fase 6: Definición de Indicadores de Gestión (KPIs)</i> .....	30
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información.....	30
Procesamiento de la Información.....	30

Propuesta del Plan de Mantenimiento Preventivo y Predictivo.....	31
Inventario Técnico de los Sistemas de Control de Temperatura.....	31
Matriz de Criticidad .....	33
Calendario de Mantenimiento .....	34
Actividades Predictivas Basadas en Condición .....	34
Listas de Chequeo Técnicas .....	35
Plan de Repuestos Críticos.....	36
Integración con BMS/SCADA.....	36
Indicadores de Gestión (KPIs) .....	37
Resultados .....	38
Conclusiones .....	46
Recomendaciones .....	48
Referencias Bibliográficas .....	50

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Inventario Sistemas de Control de Temperatura</i> .....	32
<b>Tabla 2</b> <i>Matriz de Criticidad</i> .....	33
<b>Tabla 3</b> <i>Calendario de Mantenimiento</i> .....	34
<b>Tabla 4</b> <i>Actividades Predictivas</i> .....	35
<b>Tabla 5</b> <i>Plan de Repuestos Críticos</i> .....	36
<b>Tabla 6</b> <i>Indicadores de Gestión</i> .....	37
<b>Tabla 7</b> <i>Variables Críticas para Monitoreo Predictivo del Sistema HVAC</i> .....	44
<b>Tabla 8</b> <i>Impacto Esperado del Plan de Mantenimiento</i> .....	45

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Modelo de Mantenimiento Predictivo</i> .....	38
<b>Figura 2</b> <i>Esquema General del Sistema de Climatización en un Datacenter</i> .....	41

## Introducción

El crecimiento acelerado de los servicios digitales ha convertido a los Datacenter en infraestructuras esenciales para el funcionamiento de organizaciones empresariales, entidades gubernamentales y sistemas de telecomunicaciones. En estos entornos, la continuidad operativa constituye un requisito fundamental, ya que cualquier interrupción puede generar pérdidas económicas, afectaciones en la prestación de servicios y riesgos asociados a la integridad de la información. Dentro de los sistemas que soportan la operación de un datacenter, el control de temperatura y de las condiciones ambientales ocupa un lugar central, debido a la sensibilidad de los equipos de tecnología de la información frente a variaciones térmicas y de humedad.

Los sistemas de climatización en centros de datos no solo cumplen una función de confort, sino que representan un componente crítico para la estabilidad de la infraestructura. El sobrecalentamiento, la inadecuada distribución del aire o la falla en equipos como unidades CRAC, chillers, ventiladores y sensores pueden comprometer la confiabilidad del sistema completo. Por ello, la gestión de estos equipos requiere enfoques de mantenimiento que superen modelos reactivos y que permitan anticipar fallas, reducir riesgos operativos y optimizar recursos técnicos.

El mantenimiento preventivo y predictivo surge como una alternativa estratégica para fortalecer la gestión de la infraestructura térmica. Mientras el mantenimiento preventivo se basa en intervenciones programadas que buscan conservar la operatividad de los equipos, el mantenimiento predictivo incorpora el monitoreo de variables en tiempo real y el análisis de tendencias, permitiendo detectar condiciones anómalas antes de que se conviertan en fallas críticas. La integración de ambos enfoques, apoyada en sistemas de supervisión como BMS y SCADA, facilita una gestión más estructurada y basada en datos.

A partir de esta problemática, el presente trabajo tiene como propósito diseñar un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los sistemas de control de temperatura de un datacenter, fundamentado en buenas prácticas de ingeniería y orientado a garantizar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa de la infraestructura. Para ello, se realiza un análisis conceptual y técnico que abarca la revisión del estado del arte, la caracterización de los equipos, la definición de criterios de criticidad y el diseño de una propuesta que integra cronogramas, actividades, indicadores de gestión y estrategias de monitoreo.

De esta manera, la investigación no solo aborda una necesidad técnica concreta, sino que también aporta un modelo estructurado de gestión del mantenimiento en entornos críticos, con potencial de aplicación en contextos similares donde la estabilidad ambiental y la continuidad operativa son factores determinantes.

## Estado del Arte

El crecimiento acelerado de los servicios digitales, la computación en la nube, el almacenamiento masivo de información y el desarrollo de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT) han impulsado una expansión significativa de los centros de datos a nivel global. Estas infraestructuras constituyen actualmente el núcleo operativo de la economía digital, ya que favorecen el procesamiento, almacenamiento y distribución de grandes volúmenes de información en tiempo real (Koronen et al., 2020; Nadjahi, 2018). En consecuencia, la confiabilidad y disponibilidad de los centros de datos se han convertido en factores estratégicos para organizaciones empresariales, instituciones gubernamentales y proveedores de servicios tecnológicos.

El incremento de la demanda computacional ha generado centros de datos cada vez más densos en términos de potencia energética y capacidad de procesamiento. En estos entornos, la gestión eficiente de los recursos energéticos y térmicos se convierte en un factor crítico para garantizar la continuidad operativa de los sistemas. Estudios recientes indican que el crecimiento del tráfico de datos y de los servicios digitales está impulsando el desarrollo de infraestructuras de mayor capacidad, lo cual plantea nuevos retos en términos de eficiencia energética, gestión térmica y mantenimiento de los sistemas de climatización (Chang et al., 2024).

Uno de los principales retos asociados a la operación de estas infraestructuras es la gestión térmica. Los equipos de tecnología de la información, tales como servidores, dispositivos de almacenamiento y equipos de red, generan grandes cantidades de calor durante su funcionamiento. Si este calor no es disipado adecuadamente, puede producirse un incremento en la temperatura interna de los sistemas, lo cual afecta directamente la confiabilidad y el desempeño del hardware. Diversas investigaciones han demostrado que el aumento de

temperatura en los componentes electrónicos puede acelerar los procesos de degradación de materiales, reduciendo significativamente la vida útil de los dispositivos y aumentando la probabilidad de fallas operativas (Lin et al., 2021; Schmidt, 2005). Por esta razón, los sistemas de enfriamiento se consideran un componente crítico dentro de la infraestructura de los centros de datos.

Desde una perspectiva histórica, los sistemas de enfriamiento en centros de datos han evolucionado significativamente. En las primeras generaciones de estas instalaciones se utilizaban sistemas de aire acondicionado convencionales similares a los empleados en edificios comerciales. Sin embargo, el incremento en la densidad de potencia de los servidores y el crecimiento del tráfico de datos hicieron evidente la necesidad de desarrollar sistemas de climatización especializados para entornos de alta carga térmica (Joshi & Kumar, 2012).

Como resultado de esta evolución tecnológica, surgieron soluciones específicas como las unidades CRAC (Computer Room Air Conditioning) y CRAH (Computer Room Air Handler), diseñadas para mantener condiciones ambientales estables en salas de equipos informáticos. Estas unidades favorecen el control de manera precisa la temperatura, la humedad y el flujo de aire dentro de los centros de datos (Cruz & Rincón, 2019).

En la actualidad, los sistemas de climatización representan uno de los mayores consumos energéticos dentro de los centros de datos. Se estima que estos sistemas pueden representar entre el 30 % y el 50 % del consumo energético total de la instalación (Capozzoli, 2015; Nadjahi, 2018). Por esta razón, mejorar la eficiencia energética de los sistemas de enfriamiento se ha convertido en una prioridad tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Uno de los indicadores más utilizados para evaluar la eficiencia energética de un centro de datos es el PUE (Power Usage Effectiveness), el cual mide la relación entre el consumo

energético total de la instalación y el consumo energético de los equipos de tecnología de la información. Un valor de PUE cercano a 1 indica una alta eficiencia energética, mientras que valores más elevados reflejan mayores pérdidas energéticas en los sistemas auxiliares (Islam et al., 2019).

Con el objetivo de mejorar la eficiencia energética, diversas investigaciones han analizado estrategias de optimización en la distribución del flujo de aire dentro de los centros de datos. Una de las estrategias más utilizadas es la configuración de pasillos fríos y pasillos calientes, la cual permite separar las corrientes de aire frío y caliente para reducir la recirculación térmica y mejorar el rendimiento del sistema de enfriamiento (Cho & Kim, 2011; Yang et al., 2021)

Además, se han desarrollado diferentes tecnologías de enfriamiento avanzadas, tales como el enfriamiento líquido, el uso de aire exterior (free cooling) y los sistemas híbridos de climatización. Estas soluciones llevan a reducir el consumo energético mediante el aprovechamiento de condiciones ambientales externas o mediante el uso de fluidos con mayor capacidad de transferencia térmica (Fulpagare & Bhargava, 2015; Song et al., 2016; C. Zhang et al., 2024)

La investigación académica también ha explorado el uso de modelos computacionales para analizar el comportamiento térmico de los centros de datos. La dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada para estudiar la distribución del flujo de aire dentro de las salas de servidores (Beitelmal & Patel, 2010).

Las simulaciones CFD buscan identificar zonas de recirculación de aire caliente, analizar el impacto de diferentes configuraciones de ventilación y optimizar el diseño de los sistemas de enfriamiento. Estas técnicas evalúan múltiples escenarios operativos antes de su implementación

real, lo cual facilita la toma de decisiones en el diseño y operación de los centros de datos (Dong, H. et al., 2019; Fathi, S. et al., 2015; Yang et al., 2021)

Estas herramientas posibilitan el comportamiento térmico de la infraestructura bajo diferentes condiciones de carga computacional, contribuyendo a mejorar la eficiencia energética y la confiabilidad de los sistemas de climatización.

En los últimos años, el enfoque de investigación en centros de datos ha evolucionado hacia la incorporación de tecnologías digitales para mejorar la gestión de la infraestructura. En particular, el desarrollo del Internet de las Cosas (IoT) ha permitido implementar redes de sensores inteligentes capaces de monitorear en tiempo real el estado de los equipos y las condiciones ambientales de las instalaciones (Das et al., 2025).

Estos sensores recopilan información sobre variables críticas como temperatura, humedad, vibración, presión y consumo energético, generando grandes volúmenes de datos que pueden ser utilizados para optimizar la operación de los centros de datos (Pech et al., 2021). La disponibilidad de estos datos ha impulsado el desarrollo de sistemas de monitoreo avanzados que detectan anomalías en los equipos antes de que se produzcan fallas críticas.

Las plataformas de gestión conocidas como DCIM (Data Center Infrastructure Management) han adquirido una gran relevancia. Estas herramientas integran información proveniente de múltiples subsistemas de la infraestructura, facilitando la supervisión en tiempo real del estado de los sistemas de energía, climatización y redes (Koronen et al., 2020)

El análisis de los datos recopilados por los sistemas de monitoreo ha permitido implementar estrategias de mantenimiento predictivo en centros de datos. A diferencia del mantenimiento correctivo o preventivo tradicional, el mantenimiento predictivo utiliza datos operativos para evaluar la condición real de los equipos y anticipar posibles fallas (Mobley,

2011). Diversas investigaciones han demostrado que las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático pueden analizar grandes volúmenes de datos operativos para identificar patrones de comportamiento y detectar anomalías en los sistemas (Scaife et al., 2024). Estos algoritmos anticipan fallas en los sistemas de climatización y optimizar la planificación de las actividades de mantenimiento.

Asimismo, algunos estudios han demostrado que los algoritmos de aprendizaje automático pueden optimizar el funcionamiento de los sistemas HVAC en centros de datos, ajustando dinámicamente los parámetros de operación en función de las condiciones térmicas del entorno (Biemann et al., 2023; Tian et al., 2023). Estas tecnologías mejoran la eficiencia energética y reducir los costos operativos asociados al mantenimiento.

Otra tendencia emergente en la gestión de infraestructuras críticas es el uso de gemelos digitales (Digital Twins). Un gemelo digital consiste en una representación virtual de un sistema físico que se actualiza continuamente mediante datos provenientes de sensores (Blume et al., 2020).

En el contexto de los centros de datos, los gemelos digitales simulan el comportamiento de los sistemas de climatización bajo diferentes condiciones operativas, lo cual facilita la identificación de estrategias de optimización energética y mantenimiento (Panagiotakis et al., 2020; Tahmasebinia et al., 2023).

Estas tecnologías también evalúan diferentes escenarios de operación y analizar el impacto de decisiones de mantenimiento antes de implementarlas en la infraestructura real. De esta manera, los gemelos digitales contribuyen a mejorar la confiabilidad y resiliencia de los sistemas de climatización en centros de datos (Y. Wang et al., 2021; Yuan et al., 2025).

Desde el punto de vista de la ingeniería de mantenimiento, diversos estudios han destacado la importancia de integrar estrategias preventivas y predictivas en la gestión de infraestructuras críticas. El mantenimiento preventivo permite realizar inspecciones periódicas, limpieza de componentes y verificación del funcionamiento de los equipos, mientras que el mantenimiento predictivo permite identificar señales tempranas de deterioro mediante el análisis de datos operativos (Almobarek, 2022).

La combinación de ambos enfoques permite desarrollar estrategias de mantenimiento más eficientes y adaptadas a las condiciones reales de operación. En centros de datos, donde la continuidad del servicio es fundamental, la implementación de planes de mantenimiento estructurados puede contribuir significativamente a reducir el riesgo de fallas y mejorar la confiabilidad de la infraestructura (Puchkova et al et al., 2024).

El análisis de la literatura evidencia una evolución significativa en la gestión de los sistemas de climatización en centros de datos. Inicialmente, los enfoques se centraban en el diseño físico de los sistemas de enfriamiento y en la optimización del flujo de aire dentro de las instalaciones. Posteriormente, el desarrollo de modelos computacionales permitió analizar el comportamiento térmico de los centros de datos mediante simulaciones avanzadas.

En la actualidad, las tendencias de investigación se orientan hacia la integración de tecnologías de monitoreo inteligente, análisis de datos, inteligencia artificial y gemelos digitales para mejorar la eficiencia energética y la confiabilidad de estas infraestructuras. Estas innovaciones posibilitan avanzar desde modelos de mantenimiento reactivos hacia enfoques predictivos basados en información en tiempo real.

El diseño de planes de mantenimiento preventivo y predictivo para los sistemas de control de temperatura en centros de datos se presenta como una estrategia fundamental para

garantizar la continuidad operativa, optimizar el consumo energético y reducir el riesgo de fallas en infraestructuras críticas.

La presente investigación se enmarca en esta tendencia, proponiendo un modelo de gestión del mantenimiento basado en buenas prácticas de ingeniería y en el uso de herramientas de monitoreo que permitan mejorar la confiabilidad y eficiencia de los sistemas de climatización en un datacenter.

## Planteamiento del Problema

Los centros de datos (datacenters) constituyen infraestructuras críticas para el funcionamiento de los servicios digitales contemporáneos, incluyendo plataformas empresariales, sistemas de telecomunicaciones, servicios financieros, almacenamiento en la nube y aplicaciones gubernamentales. La disponibilidad y continuidad de estas infraestructuras depende de la operación estable de múltiples subsistemas, entre los cuales los sistemas de climatización y control térmico desempeñan un papel fundamental. Estos sistemas garantizan condiciones ambientales adecuadas para el funcionamiento de los equipos de tecnología de la información, los cuales son altamente sensibles a variaciones de temperatura y humedad (Cho, Choi & Hong, 2008; T. Wang, 2006)

El incremento de la densidad de potencia en servidores y equipos de red ha generado un aumento significativo en la carga térmica dentro de los centros de datos. Como consecuencia, los sistemas de enfriamiento se han convertido en uno de los componentes más críticos de la infraestructura, ya que una falla en estos sistemas puede provocar sobrecalentamiento, degradación del hardware, interrupciones del servicio e incluso pérdida de información crítica (Fakhim et al., 2010; Patterson, 2013). Diversos estudios han evidenciado que los sistemas de climatización representan uno de los principales factores de riesgo operacional en centros de datos, debido a la complejidad de su operación y a la dependencia directa que tienen los equipos informáticos de condiciones térmicas estables (Souza, 2022).

En particular, los equipos de enfriamiento como unidades CRAC (Computer Room Air Conditioning), chillers, sistemas de ventilación y sensores ambientales deben operar de manera coordinada para garantizar la estabilidad térmica del entorno. Sin embargo, la presencia de fallas

en alguno de estos componentes puede generar efectos en cascada que comprometen el funcionamiento de toda la infraestructura (Gao, 2013).

Adicionalmente, el envejecimiento de los equipos de climatización constituye un factor relevante en la degradación del desempeño térmico de los centros de datos. Con el paso del tiempo, componentes como compresores, intercambiadores de calor, ventiladores y válvulas pueden experimentar pérdidas de eficiencia, lo que afecta el rendimiento del sistema de enfriamiento y aumenta el consumo energético de la instalación (Huang & Wang, 2019). Esta situación no solo impacta la eficiencia operativa del datacenter, sino que también incrementa los costos de operación y mantenimiento.

Desde la perspectiva de sostenibilidad energética, los centros de datos han sido objeto de creciente preocupación debido a su elevado consumo energético. Se estima que los sistemas de climatización pueden representar entre el 30 % y el 40 % del consumo energético total de un centro de datos, lo cual ha motivado el desarrollo de nuevas tecnologías de enfriamiento y estrategias de optimización energética (García, 2014; Gholamhosseinian & Khalaj, 2012). Entre estas tecnologías se destacan el enfriamiento líquido, las placas frías (cold plates) y los sistemas de inmersión, los cuales buscan mejorar la eficiencia térmica y reducir el consumo energético de estas infraestructuras (Agonafer, 2023; Zhang et al, 2022).

La implementación de tecnologías avanzadas de enfriamiento también introduce nuevos desafíos en términos de gestión del mantenimiento. La complejidad creciente de los sistemas de climatización requiere estrategias de monitoreo continuo, análisis de datos y modelos predictivos que permitan anticipar fallas antes de que estas afecten la operación del sistema (Pourgol & Rahat, 2023). En este sentido, el mantenimiento basado en condición y el mantenimiento

predictivo han sido identificados como enfoques clave para mejorar la confiabilidad de los sistemas de enfriamiento en centros de datos.

El mantenimiento predictivo se fundamenta en el análisis de datos operativos y en el monitoreo de variables críticas del sistema, tales como temperatura, presión, flujo de aire, consumo energético y comportamiento de los equipos. Mediante el uso de técnicas de análisis de datos, minería de información y aprendizaje automático, es posible identificar patrones de comportamiento anómalos que pueden indicar el inicio de procesos de degradación en los equipos (Kabir & Ahmed, 2022; Patnaik, 2010). Estas herramientas anticipan fallas y programar intervenciones de mantenimiento antes de que se produzcan interrupciones en la operación.

A pesar de los avances tecnológicos en monitoreo y análisis de datos, en muchos centros de datos los esquemas de mantenimiento continúan basándose principalmente en enfoques correctivos o preventivos tradicionales, los cuales se fundamentan en cronogramas fijos de intervención y no necesariamente consideran la condición real de los equipos. Esta situación puede generar intervenciones innecesarias o, por el contrario, fallas inesperadas que afectan la continuidad del servicio (Gomes, 2017).

El aumento en la complejidad de los centros de datos también ha generado nuevas vulnerabilidades asociadas a la gestión térmica. Investigaciones recientes han señalado que los sistemas de enfriamiento pueden constituir incluso un vector potencial de riesgo para la seguridad y estabilidad de los centros de datos si no se gestionan adecuadamente (Bendiab, 2022). El monitoreo continuo y el mantenimiento estructurado se convierten en elementos fundamentales para garantizar la resiliencia de estas infraestructuras.

En este escenario, surge la necesidad de desarrollar estrategias de mantenimiento que integren enfoques preventivos y predictivos, apoyados en herramientas de monitoreo, análisis de

datos y criterios de criticidad de los equipos. Un plan de mantenimiento estructurado permite no solo reducir la probabilidad de fallas imprevistas, sino también optimizar el uso de recursos técnicos, mejorar la eficiencia energética y fortalecer la confiabilidad de la infraestructura térmica del datacenter.

Por lo tanto, se plantea la necesidad de diseñar un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los sistemas de control de temperatura de un datacenter, que integre buenas prácticas de ingeniería, monitoreo de variables críticas y estrategias de gestión basadas en datos. Este enfoque permitirá fortalecer la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa de la infraestructura, contribuyendo a garantizar la continuidad de los servicios digitales que dependen de estos sistemas.

### **Pregunta de Investigación**

¿Cómo diseñar un plan de mantenimiento preventivo y predictivo, basado en normativas internacionales y buenas prácticas de ingeniería, que garantice la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de los sistemas de control de temperatura en un datacenter?

## **Justificación**

El funcionamiento ininterrumpido de un data center no depende únicamente de la robustez de su infraestructura, sino también de la existencia de estrategias de mantenimiento que aseguren la estabilidad de sus sistemas críticos. Los equipos de climatización y control ambiental desempeñan un papel esencial en la protección de los sistemas de tecnología de la información, por lo que su adecuada gestión influye directamente en la continuidad operativa.

Desde el punto de vista técnico, un plan de mantenimiento preventivo y predictivo permite anticipar fallas mediante el monitoreo de variables críticas, optimizando el desempeño de sistemas como CRAC, chillers, ventiladores y sensores. En el ámbito económico, estas estrategias contribuyen a reducir costos asociados a fallos inesperados y a mejorar la planificación de repuestos y recursos técnicos.

En el plano normativo, la adopción de estándares y buenas prácticas facilita el cumplimiento de requisitos de confiabilidad y eficiencia, fortaleciendo la gestión de la infraestructura. Finalmente, desde una perspectiva académica, el estudio integra conocimientos de climatización, automatización y gestión del mantenimiento, aportando un modelo que puede servir de referencia para futuras investigaciones y aplicaciones profesionales.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los sistemas de control de temperatura de un datacenter, basado en normativas internacionales y buenas prácticas de ingeniería, que garantice la disponibilidad y eficiencia operativa de la infraestructura.

### **Objetivos Específicos**

Realizar un levantamiento del inventario técnico de los sistemas de control de temperatura mediante la inspección y catalogación de activos, para establecer una línea base que facilite la planificación de repuestos y la gestión de vida útil.

Analizar las normativas y estándares internacionales de climatización mediante una matriz de cumplimiento, con el fin de alinear la operación del datacenter a las mejores prácticas globales de disponibilidad y eficiencia energética.

Diseñar un plan maestro de mantenimiento y protocolos de ejecución, integrados con herramientas de monitoreo en tiempo real y KPIs, para asegurar la continuidad operativa y reducir los tiempos de respuesta ante fallas térmicas.

## Marco Conceptual

El control térmico en un datacenter constituye un elemento esencial para garantizar la continuidad operativa de los sistemas de tecnología de la información. Los equipos electrónicos que componen la infraestructura informática generan cantidades significativas de calor durante su funcionamiento, por lo que mantener condiciones ambientales estables de temperatura y humedad se convierte en un requisito fundamental para preservar la confiabilidad del hardware y evitar fallas operativas (Cho, Choi & Hong, 2008; Schmidt, 2005). Diversos estudios han demostrado que el incremento sostenido de la temperatura en componentes electrónicos acelera los procesos de degradación de materiales, reduciendo la vida útil de los equipos y aumentando la probabilidad de fallas en la infraestructura tecnológica (Fakhim et al., 2010).

Los datacenters pueden definirse como instalaciones especializadas diseñadas para alojar sistemas informáticos, equipos de almacenamiento de datos y dispositivos de comunicación, cuya operación requiere altos niveles de disponibilidad y confiabilidad. Estas infraestructuras integran múltiples subsistemas, entre los cuales destacan los sistemas eléctricos, los sistemas de respaldo energético, las redes de comunicación y los sistemas de climatización. Dentro de estos subsistemas, el control térmico ocupa un lugar crítico debido a su influencia directa en la estabilidad operativa de los equipos informáticos (Nadjahi, 2018)

Los sistemas de climatización en centros de datos forman parte de las tecnologías HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), las cuales se encargan de regular variables ambientales como temperatura, humedad relativa, presión y flujo de aire dentro de las salas de servidores. En entornos de alta densidad de potencia, estos sistemas incluyen equipos especializados como unidades CRAC (Computer Room Air Conditioning) y CRAH (Computer Room Air Handler), diseñados específicamente para entornos informáticos donde la disipación

térmica debe realizarse de manera precisa y controlada (Cruz & Rincón, 2019). Estos sistemas funcionan mediante la extracción del aire caliente generado por los equipos de TI y su reemplazo por aire frío, manteniendo así condiciones térmicas adecuadas para el funcionamiento continuo del hardware.

La gestión térmica de los centros de datos también se relaciona con el concepto de carga térmica, que corresponde a la cantidad de calor generada por los equipos informáticos y otros dispositivos eléctricos dentro de la instalación. A medida que aumenta la densidad de servidores en los racks, también se incrementa la carga térmica del sistema, lo que exige soluciones de enfriamiento más eficientes y estrategias de control térmico más avanzadas (Patterson, 2013; T. Wang, 2006). En respuesta a estos desafíos, se han desarrollado diversas estrategias de diseño térmico, como la configuración de pasillos fríos y pasillos calientes, que permite optimizar la distribución del flujo de aire y reducir la recirculación de aire caliente dentro de las salas de servidores (Cho & Lim, 2019).

Desde la gestión del mantenimiento, se reconocen tres enfoques principales aplicables al contexto del datacenter: correctivo, preventivo y predictivo. El mantenimiento correctivo se ejecuta tras la ocurrencia de una falla y suele implicar mayor impacto en continuidad y costos. El mantenimiento preventivo se basa en intervenciones planificadas por tiempo o uso (por ejemplo, limpieza, ajustes, calibración, recambio de filtros y verificación de alarmas), orientadas a reducir la probabilidad de fallas. El mantenimiento predictivo, en cambio, se apoya en el monitoreo de condición para detectar degradación y anticipar fallas antes de que afecten la operación. En un datacenter, la combinación de mantenimiento preventivo y predictivo resulta especialmente pertinente por el costo de la indisponibilidad y por la posibilidad de instrumentar equipos con sensores y registros históricos a través de plataformas de control y supervisión.

El mantenimiento predictivo se vincula conceptualmente con el monitoreo de condición y con la analítica de datos operativos. A nivel práctico, implica definir qué variables se miden, con qué frecuencia, con qué umbrales y qué acciones se disparan cuando se detectan tendencias anómalas. Para sistemas de control de temperatura, el diagnóstico predictivo puede apoyarse en tendencias de presión y caudal, variaciones de consumo, comportamiento de compresores, desempeño de ventiladores, desviaciones de setpoints, tiempos de ciclo y patrones de alarmas. Su propósito no es “predecir por predecir”, sino mejorar la planificación: reducir fallas inesperadas, priorizar intervenciones y gestionar repuestos críticos, elementos que el proyecto también propone como parte del diseño del plan (calendario, listas de chequeo, repuestos críticos e integración con BMS/SCADA)

La fiabilidad operacional es otro concepto central, entendido como la capacidad de un sistema para desempeñar su función bajo condiciones específicas durante un periodo determinado. En datacenters, la fiabilidad se asocia a la disponibilidad del servicio y a la resiliencia ante fallas. De forma complementaria, la mantenibilidad se refiere a la facilidad y rapidez con la que un equipo puede restaurarse a condición operativa. Estos conceptos se materializan mediante indicadores típicos como el MTBF (tiempo medio entre fallas) y el MTTR (tiempo medio de reparación), los cuales evalúan si el plan de mantenimiento reduce fallas y tiempos de recuperación. En coherencia con ello, el proyecto plantea la definición de KPIs como mecanismo de evaluación continua del plan y como soporte para ajustes basados en desempeño.

Un componente metodológico clave para priorizar actividades es la criticidad de activos. La criticidad se determina considerando consecuencias de falla (impacto en continuidad, seguridad, costos, energía, cumplimiento) y probabilidad de ocurrencia, y suele representarse mediante una matriz que permite clasificar equipos y subsistemas. En sistemas HVAC de

datacenter, la criticidad puede diferenciarse entre elementos cuya falla compromete inmediatamente la sala (por ejemplo, unidades principales o componentes sin redundancia efectiva) y elementos cuya falla tiene impacto gradual o mitigable. Esta lógica permite asignar frecuencias de mantenimiento diferenciadas, orientar el inventario de repuestos y justificar protocolos específicos, aspectos presentes en la propuesta del trabajo.

Finalmente, la gestión moderna de la climatización en entornos críticos se apoya en sistemas de automatización y supervisión. Un BMS integra datos de infraestructura (energía, clima, seguridad) y facilita la visualización de variables, alarmas y tendencias; SCADA permite supervisión y control con enfoque industrial, incluyendo adquisición de datos y acciones remotas. La integración del plan de mantenimiento con estas plataformas favorece trazabilidad de actividades, evidencia para auditorías, gestión de alarmas, seguimiento de cumplimiento y análisis de desempeño, alineándose con la intención del proyecto de no limitarse a actividades aisladas, sino de construir un plan estructurado y verificable que reduzca riesgo operativo y mejore eficiencia.

## Metodología

El presente trabajo se desarrolla bajo un enfoque aplicado y de carácter descriptivo–propositivo. Es aplicado porque busca dar solución a una necesidad técnica real, relacionada con la gestión del mantenimiento de los sistemas de control de temperatura en un datacenter. A su vez, es descriptivo porque analiza las características operativas de los equipos, las condiciones ambientales requeridas y las prácticas actuales de mantenimiento, con el fin de estructurar una propuesta técnica fundamentada. Finalmente, se considera propositivo, ya que el resultado principal es el diseño de un plan de mantenimiento preventivo y predictivo que integra estándares, criterios de criticidad y herramientas de monitoreo.

El estudio se clasifica como técnico–documental, con apoyo en el análisis de información normativa, bibliográfica y operativa. No se centra en la experimentación, sino en la recopilación, análisis e integración de información proveniente de fuentes técnicas y de la caracterización de los sistemas de climatización del datacenter.

Asimismo, se apoya en principios de ingeniería del mantenimiento, particularmente en enfoques de mantenimiento basado en condición y gestión de activos críticos.

### Unidad de análisis

La unidad de análisis está constituida por los sistemas de control de temperatura del datacenter, incluyendo equipos de climatización y los dispositivos asociados a su monitoreo y control. Entre ellos se consideran:

Unidades de climatización tipo CRAC/CRAH

Sistemas de enfriamiento central (chillers, bombas, torres si aplica)

Ventiladores y sistemas de distribución de aire

Sensores de temperatura y humedad

Sistemas de supervisión y control (BMS/SCADA)

Estos elementos se analizan desde su función, criticidad, variables operativas y requerimientos de mantenimiento.

### **Fases Metodológicas**

La metodología se desarrolla en fases secuenciales que favorecen pasar del análisis teórico al diseño de la propuesta técnica.

#### ***Fase 1: Revisión Documental y Normativa***

En esta fase se realiza la revisión de literatura técnica, normas y buenas prácticas relacionadas con climatización en entornos críticos, mantenimiento preventivo y predictivo, y gestión de data centers. El propósito es identificar lineamientos, parámetros ambientales recomendados, enfoques de mantenimiento y criterios de confiabilidad que sirvan como base conceptual del plan.

#### ***Fase 2: Levantamiento del Inventario Técnico***

Se procede a la identificación y caracterización de los equipos que conforman el sistema de control de temperatura. Para cada equipo se registran variables como:

Tipo de equipo

Función dentro del sistema

Condiciones de operación

Importancia para la continuidad del servicio

Historial de fallas (si está disponible)

Este inventario constituye la base para el análisis de criticidad.

### ***Fase 3: Análisis de Criticidad de Equipos***

Con la información recopilada, se elabora una matriz de criticidad que considera la probabilidad de falla y el impacto asociado (operativo, económico y en continuidad del servicio). Esta clasificación permite priorizar los equipos que requieren mayor control, frecuencias de mantenimiento más estrictas y monitoreo continuo.

### ***Fase 4: Identificación de Variables Críticas a Monitorear***

Se definen las variables operativas que facilitan evaluar el estado de los sistemas de climatización, tales como:

Temperatura de suministro y retorno

Humedad relativa

Presión y caudal de aire

Consumo energético

Alarmas del sistema de control

Estas variables se vinculan con las capacidades de monitoreo del BMS/SCADA.

### ***Fase 5: Diseño del Plan de Mantenimiento***

A partir de la criticidad y de las variables definidas, se estructura el plan de mantenimiento que incluye:

Actividades preventivas programadas por frecuencia

Actividades predictivas basadas en condición

Listas de chequeo técnicas

Recomendaciones para gestión de repuestos críticos

El plan se organiza en frecuencias: diaria, semanal, mensual, trimestral y anual.

### ***Fase 6: Definición de Indicadores de Gestión (KPIs)***

Se establecen indicadores que permitan evaluar la efectividad del plan, tales como:

Número de fallas imprevistas

Tiempo medio entre fallas

Tiempo medio de reparación

Disponibilidad del sistema de climatización

Estos indicadores contribuyen a realizar seguimiento y mejora continua.

### **Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información**

La información se recopila mediante:

Revisión documental de normas y literatura técnica

Análisis de registros operativos del sistema de climatización

Fichas técnicas de equipos

Reportes de sistemas de monitoreo

Como instrumentos se emplean formatos de inventario técnico, matrices de criticidad y listas de chequeo de mantenimiento.

### **Procesamiento de la Información**

La información recopilada se organiza y analiza mediante tablas, matrices de evaluación y registros comparativos. A partir de este análisis se definen las prioridades, frecuencias de mantenimiento y variables a monitorear, lo cual da lugar a la propuesta final del plan.

## **Propuesta del Plan de Mantenimiento Preventivo y Predictivo**

### **Inventario Técnico de los Sistemas de Control de Temperatura**

Como punto de partida para el diseño del plan de mantenimiento, se establece un inventario técnico de los equipos que intervienen en el control térmico del datacenter. Este inventario permite conocer la función de cada elemento, su importancia operativa y las variables asociadas a su funcionamiento.

Como se presenta en la Tabla 1, se establece el inventario técnico de los principales equipos que conforman el sistema de climatización del datacenter, identificando sus características operativas y su función dentro del proceso de control térmico.

**Tabla 1***Inventario Sistemas de Control de Temperatura*

Equipo	Función principal	Variables asociadas	Nivel de criticidad
Unidad CRAC/CRAH	Control de temperatura y humedad en sala TI	Temperatura de impulsión/retorno, humedad, consumo eléctrico	Alta
Chiller	Producción de agua fría	Temperatura del agua, presión, caudal, vibración	Alta
Bombas de circulación	Movimiento del fluido refrigerante	Caudal, presión, consumo eléctrico	Media–Alta
Ventiladores	Distribución del aire	Velocidad, vibración, consumo eléctrico	Media
Sensores de T y HR	Medición ambiental	Temperatura, humedad relativa	Alta
Sistema BMS/SCADA	Supervisión y control	Alarmas, tendencias, estados de equipos	Alta

*Nota. Adaptado de (Nadjahi, 2018; Cruz & Rincón, 2019)*

## Matriz de Criticidad

La criticidad se determina considerando impacto de falla y probabilidad de ocurrencia.

**Tabla 2**

*Matriz de Criticidad*

Equipo	Impacto de falla	Probabilidad	Criticidad
CRAC/CRAH	Alto (riesgo de sobrecalentamiento inmediato)	Media	Alta
Chiller	Alto (afecta múltiples equipos)	Baja–Media	Alta
Bombas	Medio (disminuye eficiencia térmica)	Media	Media–Alta
Ventiladores	Medio	Media	Media
Sensores	Alto (datos erróneos)	Baja	Alta
BMS/SCADA	Alto (pérdida de monitoreo)	Baja	Alta

*Nota. Adaptado de (Mobley, 2011; Souza et al., 2022)*

De acuerdo con la Tabla 2, se realiza la clasificación de criticidad de los equipos del sistema HVAC, lo que permite identificar aquellos componentes cuya falla tendría un mayor impacto en la continuidad operativa del datacenter.

## Calendario de Mantenimiento

**Tabla 3**

*Calendario de Mantenimiento*

Frecuencia	Actividades preventivas
Diaria	Verificación de alarmas en BMS, revisión de temperatura y humedad, inspección visual de equipos
Semanal	Limpieza superficial de filtros, revisión de parámetros operativos
Mensual	Inspección de ventiladores, revisión de sensores, calibraciones básicas
Trimestral	Limpieza profunda de filtros, revisión de bombas, inspección eléctrica
Semestral	Mantenimiento de CRAC, pruebas de funcionamiento de chillers
Anual	Mantenimiento mayor, calibración general, revisión integral del sistema

*Nota. Adaptado de (Moblely, 2011; Almobarek et al., 2022)*

En la Tabla 3 se describe el plan de mantenimiento preventivo propuesto, en el cual se establecen las actividades, frecuencias y responsables para garantizar el adecuado funcionamiento de los equipos del sistema de climatización.

### **Actividades Predictivas Basadas en Condición**

La incorporación de actividades predictivas permite pasar de un mantenimiento basado en intervalos a uno basado en condición real, lo que reduce intervenciones innecesarias y detecta degradaciones antes de que se conviertan en fallas críticas. Esto incrementa el MTBF, reduce el

MTTR y mejora la disponibilidad del sistema de climatización. Como se observa en la Tabla 4, se definen las variables críticas asociadas al mantenimiento predictivo, las cuales permiten monitorear el estado de los equipos y anticipar posibles fallas mediante el análisis de datos operativos.

**Tabla 4**

*Actividades Predictivas*

Variable monitoreada	Método	Acción preventiva
Temperatura fuera de rango	Tendencias BMS	Ajuste de setpoints o revisión de unidad
Vibración en ventiladores	Sensores de vibración	Inspección de rodamientos
Consumo eléctrico anómalo	Medición energética	Revisión de eficiencia
Presión anormal en chiller	Lecturas de presión	Verificación de fugas

*Nota. Adaptado de (Pech et al., 2021; Scaife, 2024)*

**Listas de Chequeo Técnicas**

Estado de filtros

Condición de serpentines

Revisión de drenajes

Verificación de alarmas

Funcionamiento de ventiladores

## Plan de Repuestos Críticos

**Tabla 5**

*Plan de Repuestos Críticos*

Equipo	Repuesto crítico	Justificación
CRAC	Filtros, tarjetas electrónicas	Alta frecuencia de uso
Chiller	Sensores de presión, válvulas	Impacto sistémico
Bombas	Sellos mecánicos	Evita paradas inesperadas
Sensores	Sensores T°/HR	Garantiza monitoreo confiable

*Nota: Adaptado de (Gomes, 2017)*

La Tabla 5 presenta la identificación de los repuestos críticos requeridos para el sistema de climatización, lo cual facilita la gestión oportuna de suministros y reduce los tiempos de respuesta ante fallas.

### Integración con BMS/SCADA

La integración con BMS/SCADA no solo facilita el monitoreo, sino que constituye la base para la trazabilidad técnica del mantenimiento. Los registros históricos nos llevan a un análisis de tendencias, identificación de patrones de falla y toma de decisiones fundamentadas, lo cual fortalece la confiabilidad y reduce la incertidumbre operativa.

El sistema BMS/SCADA se utilizará para:

Registro de tendencias

Gestión de alarmas

Historial de intervenciones

Soporte para mantenimiento predictivo

### Indicadores de Gestión (KPIs)

**Tabla 6**

*Indicadores de Gestión*

Indicador	Fórmula	Objetivo
Disponibilidad del sistema	Tiempo operativo / Tiempo total	> 99%
MTBF	Tiempo entre fallas	Incremento progresivo
MTTR	Tiempo promedio de reparación	Reducción
Fallas imprevistas	Nº fallas / mes	Disminuir

*Nota: Adaptado de (Moblely, 2011)*

En la Tabla 6 se establecen los indicadores de gestión definidos para evaluar el desempeño del sistema de mantenimiento, permitiendo medir la confiabilidad operativa y la eficiencia del proceso.

El plan propuesto no debe considerarse un esquema estático, sino un modelo dinámico de mejora continua. La evaluación periódica de indicadores de gestión permitirá ajustar frecuencias, procedimientos y umbrales de alarma, adaptando el plan a cambios operativos, crecimiento de cargas térmicas o modificaciones en la infraestructura. De esta manera, el mantenimiento se convierte en un proceso evolutivo alineado con la confiabilidad operacional del datacenter.

## Resultados

La propuesta de plan de mantenimiento preventivo y predictivo desarrollada para los sistemas de control de temperatura del datacenter permite estructurar un modelo de gestión orientado a mejorar la confiabilidad operativa de la infraestructura térmica. Este enfoque se fundamenta en principios de mantenimiento basado en condición, los cuales permiten anticipar fallas a partir del análisis de variables operativas y del comportamiento de los equipos en tiempo real (Moblely, 2011; Pech et al., 2021).

Uno de los principales resultados del estudio corresponde a la identificación de los equipos con mayor nivel de criticidad dentro del sistema de climatización. A partir del análisis realizado, se determinó que las unidades CRAC/CRAH, los chillers, los sensores ambientales y los sistemas de supervisión presentan un impacto alto en caso de falla, debido a su relación directa con la estabilidad térmica del datacenter. Este tipo de clasificación es consistente con metodologías de análisis de confiabilidad en sistemas críticos, donde la priorización de activos permite optimizar la gestión del mantenimiento (Souza et al., 2022; Gomes, 2017).

La incorporación de monitoreo basado en condición constituye un elemento clave dentro del modelo propuesto, ya que permite identificar desviaciones operativas antes de que se conviertan en fallas críticas. La definición de variables como temperatura, presión, vibración y consumo energético facilita la detección temprana de anomalías, lo cual ha sido ampliamente documentado en estudios recientes sobre mantenimiento predictivo en sistemas HVAC (Scaife, 2024; Tian et al., 2023).

Otro resultado relevante es la estructuración de un calendario de mantenimiento que integra actividades preventivas y predictivas en diferentes horizontes temporales. Esta planificación permite establecer intervenciones periódicas en componentes críticos del sistema,

asegurando su correcto funcionamiento y reduciendo la probabilidad de fallas inesperadas. Este enfoque se alinea con buenas prácticas de ingeniería de mantenimiento, donde la combinación de estrategias preventivas y predictivas mejora la eficiencia operativa de los sistemas (Mobley, 2011; Almobarek et al., 2022).

El plan propuesto también incorpora indicadores de gestión orientados a evaluar el desempeño del sistema de mantenimiento. Entre los indicadores definidos se incluyen la disponibilidad operativa, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), los cuales permiten medir la confiabilidad del sistema y apoyar la toma de decisiones técnicas. Estos indicadores son ampliamente utilizados en la evaluación de sistemas industriales y de infraestructura crítica (Mobley, 2011; Souza et al., 2022).

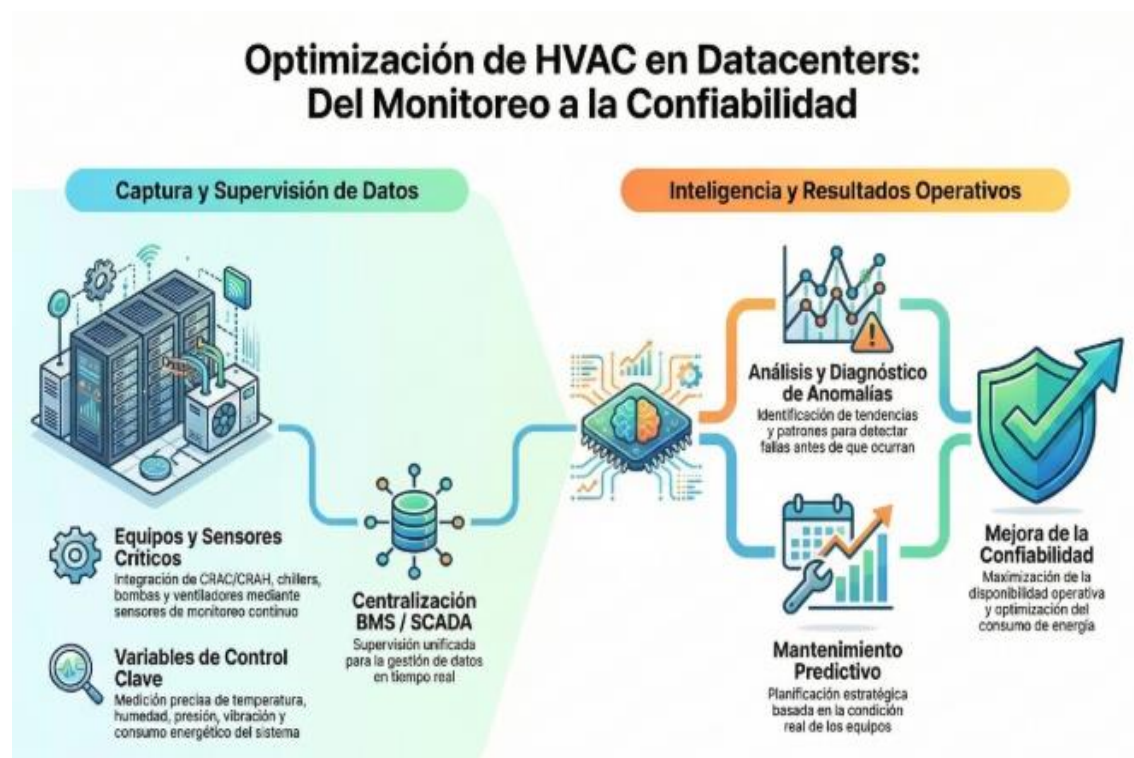
Desde el punto de vista operativo, la implementación del plan permite mejorar la gestión de repuestos críticos y optimizar la planificación de las intervenciones técnicas. La priorización de componentes clave reduce los tiempos de respuesta ante fallas y contribuye a minimizar el impacto de eventos no programados, lo cual coincide con estudios sobre disponibilidad en sistemas de enfriamiento de centros de datos (Gomes, 2017).

Adicionalmente, la integración del plan con plataformas de supervisión como BMS y SCADA permite consolidar información histórica sobre el comportamiento de los equipos. Este análisis de datos facilita la identificación de patrones operativos y tendencias de deterioro, contribuyendo a una toma de decisiones más precisa en la gestión del mantenimiento. Investigaciones recientes destacan que el uso de sistemas de monitoreo y análisis de datos mejora significativamente la eficiencia energética y la confiabilidad de los sistemas HVAC (Kabir & Ahmed, 2022; Scaife, 2024).

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la implementación de un modelo estructurado de mantenimiento preventivo y predictivo permite fortalecer la confiabilidad operativa de los sistemas de control de temperatura del datacenter. La integración de monitoreo en tiempo real, análisis de criticidad y gestión basada en indicadores constituye una estrategia efectiva para reducir el riesgo de fallas, optimizar el uso de recursos técnicos y mejorar el desempeño energético de la infraestructura (Souza et al., 2022; Tian et al., 2023).

**Figura 1**

*Modelo de Mantenimiento Predictivo*



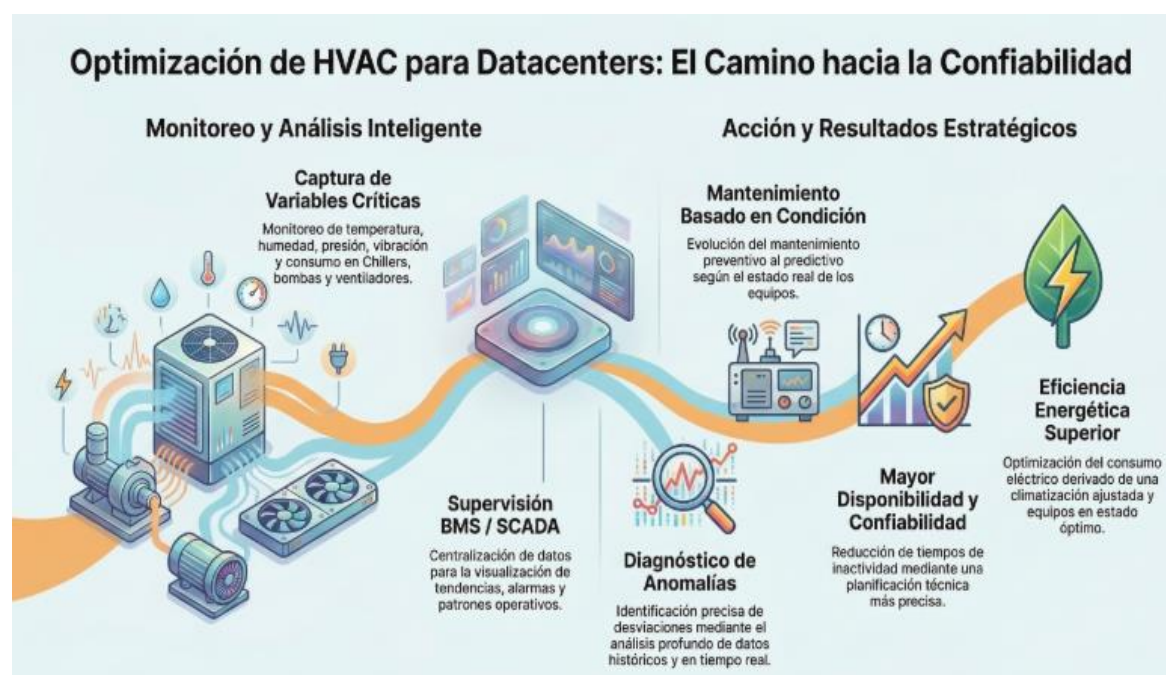
*Nota. Elaboración propia mediante Draw.io.*

La figura 1 detalla el flujo operativo para optimizar la infraestructura climática dentro de datacenter. El proceso comienza con el monitoreo constante de variables críticas en equipos como enfriadores y ventiladores mediante sistemas de supervisión avanzada. Al procesar esta

información, se identifican patrones y anomalías que permiten diagnosticar el estado real de los componentes. Esta estrategia facilita una planificación de mantenimiento proactiva, priorizando acciones preventivas y predictivas sobre las reactivas. Finalmente, la implementación de este ciclo garantiza una mayor disponibilidad del servicio y un uso más eficiente de la energía.

**Figura 2**

*Esquema General del Sistema de Climatización en un Datacenter*



*Nota. Elaboración propia mediante Draw.io.*

El diagrama presentado en la figura 2, ilustra el ciclo termodinámico y el proceso de distribución de refrigeración que permite mantener las condiciones térmicas adecuadas dentro de un centro de datos. Este flujo describe la interacción entre los principales componentes del sistema HVAC y evidencia cómo se integran con los mecanismos de monitoreo y mantenimiento utilizados para garantizar la continuidad operativa de la infraestructura tecnológica.

En primer lugar, el proceso inicia con la producción y circulación del agua fría, la cual es generada por el chiller. Este equipo es responsable de extraer el calor del circuito de

refrigeración y producir el fluido a baja temperatura que será distribuido hacia los sistemas de climatización de precisión. Debido a su papel crítico dentro del sistema de enfriamiento, el chiller requiere un monitoreo permanente de variables operativas como el consumo energético, las presiones del refrigerante, la temperatura de operación y los niveles de vibración mecánica. El análisis de estas variables permite identificar desviaciones en el funcionamiento del equipo y realizar diagnósticos de condición que faciliten la planificación de actividades de mantenimiento preventivo y predictivo.

Posteriormente, el agua fría generada es impulsada a través del sistema mediante bombas de circulación, las cuales garantizan el flujo constante del refrigerante hacia las unidades de control climático. Estas bombas representan un elemento esencial dentro del sistema hidráulico del datacenter, ya que cualquier interrupción en su funcionamiento puede afectar la capacidad de enfriamiento de toda la instalación. Por esta razón, su operación es supervisada de manera continua mediante sistemas de monitoreo que registran parámetros como presión, caudal, consumo eléctrico y vibración. La información obtenida es procesada por el sistema de gestión del edificio, lo que permite detectar patrones de comportamiento anómalos y anticipar posibles fallas antes de que se produzcan interrupciones en el servicio.

Una vez que el agua fría llega a las unidades de climatización, entra en funcionamiento el sistema de control del aire mediante equipos CRAC o CRAH. Estas unidades reciben el fluido refrigerante y lo utilizan para reducir la temperatura del aire que será suministrado a la sala de equipos de tecnología de la información. En esta etapa, el control de variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa resulta fundamental para garantizar condiciones adecuadas de operación para los servidores y demás dispositivos electrónicos. El monitoreo de estas

variables permite mantener la estabilidad térmica del ambiente y prevenir situaciones de sobrecalentamiento que puedan comprometer la disponibilidad de los sistemas informáticos.

Posteriormente, el aire frío es distribuido hacia la sala de tecnología de la información (Sala TI), donde los servidores y equipos de procesamiento generan calor como resultado de su funcionamiento. Durante este proceso se produce el intercambio térmico entre el aire frío suministrado por las unidades de climatización y el aire caliente generado por los equipos informáticos. La eficiencia de este intercambio se evalúa mediante sensores que registran la temperatura de suministro y retorno del aire, lo que permite identificar posibles puntos calientes o problemas en la distribución del flujo de aire dentro del centro de datos.

Finalmente, el aire caliente retorna al sistema HVAC para ser enfriado nuevamente, cerrando así el ciclo de refrigeración. La supervisión continua de este flujo de retorno permite evaluar el desempeño térmico del sistema y realizar ajustes operativos que contribuyan a mejorar la confiabilidad y la disponibilidad de la infraestructura.

Todo este proceso físico de enfriamiento es respaldado por un sistema de supervisión y control, generalmente implementado mediante plataformas BMS o SCADA, que integran la información proveniente de sensores instalados en los distintos componentes del sistema. Estos sistemas permiten transformar los datos operativos en información útil para la gestión del mantenimiento y la operación del datacenter. A partir de estos registros es posible identificar anomalías en el flujo de agua o aire, generar alarmas ante desviaciones en variables críticas como temperatura o presión, y optimizar el desempeño energético global del sistema de climatización.

De esta manera, el monitoreo continuo de los equipos HVAC y el análisis de las variables operativas permiten implementar estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo

orientadas a mejorar la confiabilidad, la eficiencia energética y la disponibilidad de los sistemas de enfriamiento en los centros de datos.

**Tabla 7**

*Variables Críticas para Monitoreo Predictivo del Sistema HVAC*

Variable	Equipo asociado	Método de monitoreo	Interpretación operativa
Temperatura de suministro	CRAC / CRAH	Sensores térmicos	Verifica capacidad de enfriamiento
Temperatura de retorno	CRAC / CRAH	Sensores térmicos	Detecta carga térmica en sala
Humedad relativa	Sensores ambientales	BMS	Control de condiciones ambientales
Presión del refrigerante	Chiller	Sensores de presión	Identificación de fugas o pérdidas
Caudal de aire	Ventiladores	Medidores de flujo	Verifica distribución del aire
Consumo energético	Equipos HVAC	Medidores eléctricos	Identificación de ineficiencias
Vibración	Ventiladores / Bombas	Sensores de vibración	Detección temprana de desgaste
Alarmas del sistema	BMS / SCADA	Sistema de supervisión	Identificación de eventos críticos

*Nota. Elaboración propia con base en (Pech et al., 2021; Tian et al., 2023)*

Como se presenta en la Tabla 7, se identifican las principales variables operativas monitoreadas en el sistema HVAC, las cuales constituyen la base para la implementación del mantenimiento predictivo.

**Tabla 8**

*Impacto Esperado del Plan de Mantenimiento*

Indicador	Situación convencional	Con plan propuesto
Disponibilidad del sistema	96–97 %	> 99 %
Fallas imprevistas	3–4 anuales	< 1 anual
MTTR	Alto	Reducido
MTBF	Bajo	Incremento progresivo
Consumo energético	Variable	Optimizado

*Nota. Elaboración propia con base en (Gomes, 2017; Souza et al., 2022)*

Finalmente, la Tabla 8 muestra el impacto esperado de la implementación del plan de mantenimiento, evidenciando mejoras en indicadores clave como disponibilidad, reducción de fallas y optimización del consumo energético.

## Conclusiones

El desarrollo de esta investigación permitió evidenciar que los sistemas de control de temperatura constituyen uno de los componentes más críticos dentro de la infraestructura de un datacenter, debido a su influencia directa en la estabilidad operativa de los equipos de tecnología de la información. La adecuada gestión de estos sistemas resulta fundamental para prevenir condiciones de sobrecalentamiento, reducir el riesgo de fallas en los equipos y garantizar la continuidad de los servicios digitales que dependen de estas infraestructuras.

A partir del análisis del estado del arte y del estudio de las prácticas actuales de mantenimiento en sistemas HVAC para centros de datos, se identificó la necesidad de integrar enfoques preventivos y predictivos en la gestión del mantenimiento. Estos enfoques permiten pasar de esquemas reactivos a modelos de gestión basados en monitoreo continuo y análisis de variables operativas, lo cual contribuye a anticipar posibles fallas y optimizar la planificación de intervenciones técnicas.

La investigación permitió diseñar un plan de mantenimiento estructurado que integra el inventario técnico de los equipos, el análisis de criticidad de los componentes del sistema de climatización, la definición de variables críticas de monitoreo y la programación de actividades preventivas y predictivas. Este modelo facilita priorizar los equipos con mayor impacto en la continuidad del servicio, tales como las unidades CRAC/CRAH, los chillers, los sensores ambientales y los sistemas de supervisión BMS/SCADA.

Asimismo, la incorporación de indicadores de gestión como disponibilidad operativa, tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio de reparación (MTTR) proporciona herramientas para evaluar el desempeño del sistema de mantenimiento y orientar procesos de

mejora continua. Estos indicadores permiten realizar un seguimiento cuantitativo de la efectividad del plan y apoyar la toma de decisiones técnicas en la gestión de la infraestructura.

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de monitoreo basado en condición, análisis de criticidad de activos y planificación estructurada del mantenimiento constituye una estrategia efectiva para mejorar la confiabilidad operativa de los sistemas de climatización en centros de datos. De igual manera, la articulación del plan con sistemas de supervisión como BMS y SCADA favorece el análisis de datos operativos y la identificación temprana de anomalías en los equipos.

En términos generales, el trabajo desarrollado evidencia que la implementación de un modelo de mantenimiento preventivo y predictivo fundamentado en buenas prácticas de ingeniería puede contribuir significativamente a mejorar la disponibilidad del sistema de climatización, optimizar el consumo energético y fortalecer la resiliencia operativa de la infraestructura térmica de un datacenter.

## Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda que la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo se realice de manera progresiva, priorizando inicialmente los equipos con mayor nivel de criticidad dentro del sistema de climatización. Esta estrategia permitirá validar los procedimientos propuestos, ajustar parámetros operativos y optimizar la aplicación del plan antes de su implementación completa en toda la infraestructura.

Asimismo, se recomienda fortalecer los procesos de capacitación del personal técnico encargado de la operación y mantenimiento de los sistemas HVAC. El uso adecuado de herramientas de supervisión, análisis de datos operativos y plataformas de monitoreo como BMS o SCADA resulta fundamental para aprovechar plenamente las ventajas del mantenimiento basado en condición y mejorar la capacidad de detección temprana de fallas.

Se sugiere también establecer mecanismos periódicos de revisión y actualización del inventario técnico de equipos, así como de la matriz de criticidad de activos. Los centros de datos suelen experimentar cambios en su infraestructura tecnológica, incrementos en la carga computacional o modificaciones en la distribución de equipos, lo cual puede alterar la importancia relativa de los componentes del sistema de climatización y requerir ajustes en las estrategias de mantenimiento.

Otra recomendación importante consiste en fortalecer la gestión de datos operativos mediante el almacenamiento y análisis sistemático de información proveniente de sensores y sistemas de supervisión. La consolidación de registros históricos permitirá desarrollar análisis de tendencias, identificar patrones de comportamiento en los equipos y mejorar progresivamente la precisión de las estrategias de mantenimiento predictivo.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones exploren la integración de técnicas avanzadas de análisis de datos, inteligencia artificial y gemelos digitales en la gestión del mantenimiento de centros de datos. Estas tecnologías tienen el potencial de mejorar significativamente la capacidad de predicción de fallas, optimizar la eficiencia energética de los sistemas de climatización y fortalecer la resiliencia de infraestructuras críticas en entornos de alta demanda tecnológica.

### Referencias Bibliográficas

Agonafer, A. (2023). Single Phase Immersion Cooling for Hyper Scale Data Centers: Challenges and Opportunities. *ASME Heat Transfer Summer Conference*.

<https://doi.org/10.1115/ht2023-107598>

Almobarek, M. ; A., S. ; Alshammari, A. (2022). Predictive maintenance 4.0 for chilled water systems in commercial buildings: A systematic literature review. *Buildings*.

<https://doi.org/10.3390/buildings12081229>

Beitelmal & Patel, A. ; P., C. (2010). Airflow and cooling in a data center. *Journal of Heat Transfer*. <https://doi.org/10.1115/1.4000703>

Bendiab, M. (2022). Thermal Management in Large Data Centers: Security Threats and Mitigation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2108.13261>

Biemann, M. (2023). Data center HVAC control using reinforcement learning. *IEEE Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3263261>

Blume, C. (2020). Data-driven digital twins for technical building services. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. <https://doi.org/10.3390/jmmp4040097>

Capozzoli, A. ; P., G. (2015). Cooling systems in data centers: State of art and emerging technologies. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.168>

Chang, Q. (2024). Optimization control strategies and evaluation metrics of cooling systems in data centers. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16167222>

Cho & Kim, J. ; K., B. (2011). Evaluation of air management system thermal performance for high-density data centers. *Energy and Buildings*.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.025>

Cho, Choi & Hong, J. ; C., J. ;. Hong, J. (2008). Cooling Systems for IT Environment Heat Removal in (Internet) Data Centers. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. <https://doi.org/10.3130/JAABE.7.387>

Cho, J., & Lim, J. (2019). Thermal performance evaluation of a data center cooling system under fault conditions. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en12152996>

Cruz & Rincón, R., A. (2019). Unidades de climatización para centros de datos. *Redes de Ingeniería*. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/2322939X.15273>

Das, D. (2025). Real-time IoT data analysis for HVAC maintenance. *Engineering Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ae0107>

Dong, H., Zhang, X., & Wang, Y. (2019). Numerical investigation into airflow distribution in modular data centers. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2018-0139>

Fakhim, B., Behnia, M., & Armfield, S. W. (2010). Addressing Thermal Challenges in Design of Data Centres. *Engineering Systems Design and Analysis Conference (ESDA)*. <https://doi.org/10.1115/ESDA2010-24690>

Fathi, S., Patel, C., & Beitelmal, A. (2015). Fast and accurate evaluation of cooling in data centers. *Journal of Heat Transfer*, 137(7). <https://doi.org/10.1115/1.4028315>

Fulpagare & Bhargava, Y. ; B., P. (2015). Advances in data center thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.056>

Gao, Y. ; C., J. ;. Hilburn, K. J. L. (2013). Dynamic analysis of hybrid cooling data centers subjects to the failure of CRAC units. *ASME International Technical Conference and*

*Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (IPACK).*

<https://doi.org/10.1115/IPACK2013-73196>

García, J. M. (2014). Hacia la conciencia social del consumo energético en el centro de datos. *Revista de Ingeniería de Sistemas.*

Gholamhosseinian & Khalaj, M. ; K., S. (2012). Cloud Computing and Sustainability: Energy Efficiency Aspects. *International Journal of Cloud Computing and Services Science.*

Gomes, P. (2017). Evaluating the cooling subsystem availability on a cloud data center. *IEEE International Symposium on Computers and Communications.*

<https://doi.org/10.1109/ISCC.2017.8024615>

Huang & Wang. (2019). Performance and maintenance strategy of a data center cooling system under equipment aging. *Energy and Buildings.*

Islam, R. (2019). Predictive models of PUE in hyperscale data centers. *Energies.*  
<https://doi.org/10.3390/en12183438>

Joshi & Kumar. (2012). Energy efficient thermal management of data centers. *Springer.* <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7124-1>

Kabir & Ahmed, M. A. ; A., S. (2022). Optimizing data center operations with artificial intelligence and machine learning. *International Journal of Computing and Digital Systems.* <https://doi.org/10.63125/xewz7g58>

Koronen, C. (2020). Data centres in future European energy systems. *Energy Efficiency.* <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09833-8>

Lin, C. (2021). Optimal thermal management of next-generation data centers. *Case Studies in Thermal Engineering.* <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101031>

Mobley, R. (2011). Maintenance fundamentals. *Elsevier.*

- Nadjahi, C. (2018). Thermal management and cooling strategies for data centers. *Sustainable Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.05.002>
- Panagiotakis et al, S. (2020). Digital twins in energy-efficient data center design. *Springer*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44907-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44907-0_6)
- Patnaik, D. (2010). Data mining for modeling chiller systems in data centers. *Intelligent Data Analysis*. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-13062-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-13062-5_13)
- Patterson, S. (2013). A Field Investigation Into the Limits of High-Density Air-Cooling. *ASME InterPACK*. <https://doi.org/10.1115/IPACK2013-73163>
- Pech, M. (2021). Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factories. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s21041470>
- Pourgol & Rahat, M. ; R., S. J. M. S. E. (2023). Innovative and Effective Prognostics and Health Management in Data Center Cooling Systems. *Journal of Maintenance Engineering*.
- Puchkova et al, A. (2024). Maintenance optimisation of HVAC systemsPuchkova et al. *IFAC-PapersOnLine*. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.052>
- Scaife, A. (2024). Artificial intelligence applications in predictive maintenance. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101645>
- Schmidt, R. (2005). Challenges of data center thermal management. *IBM Journal of Research and Development*. <https://doi.org/10.1147/rd.494.0709>
- Song, Z. (2016). Thermal performance of contained data centers. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.157>
- Souza, L. ; L., R. M. F. ;. Maciel, P. R. M. (2022). Dependability evaluation and sensitivity analysis of data center cooling systems. *Reliability Engineering & System Safety*.

Tahmasebinia, F. (2023). Benefits and limitations of digital twin systems. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app13158814>

Tian, R. (2023). Health prognostics classification with autoencoders for HVAC systems. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16207094>

Wang, T. (2006). Cooling challenges and best practices for high density data and telecommunication centers. *International Conference on High Density Packaging and Microsystem Integration*. <https://doi.org/10.1109/HDP.2006.1707564>

Wang, Y. (2021). Digital twins for cyber-physical systems resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0369>

Yang, T. (2021). Numerical study of fluid flow in data center racks. *Case Studies in Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101405>

Yuan, H. (2025). Intelligent thermal management strategy using digital twins. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app15147675>

Zhang, C. (2024). Data center air conditioning system with heat recovery. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130294>

Zhang et al, Y. ; C., Y. ;. Wu, J. (2022). Cold Plate Liquid Cooling Technology and Its Applications in Data Center Thermal Management. *Frontiers in Energy Research*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.954718>