

Diseño De Plan De Mantenimiento Según Metodología RCM Para Chiller Carrier Mod
30xwb3504-M203r Condensado Por Agua Para El Sistema De Climatización Del Hotel Radisson
Cartagena Ocean Pavillion

Sergio Enrique Montealegre Beltrán

Trabajo De Grado Para Optar El Titulo De Especialización En Gerencia De Mantenimiento
Bucaramanga

Director:

Daniel Ortiz Plata

Magister en Gerencia de Mantenimiento

Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela De Ingeniería Mecánica
Especialización En Gerencia De Mantenimiento
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mi querido hijo, eres mi razón, mi inspiración y el motor que me empuja a seguir adelante. Te amo con todo mi corazón.

Agradecimientos

En primer lugar, doy gracias a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y la paciencia para alcanzar este logro.

Al Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion, agradezco sinceramente por brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo, por su confianza en mí y por permitirme desarrollarme profesionalmente en un entorno tan estimulante y enriquecedor.

A mi madre, agradezco profundamente su apoyo y su fe inquebrantable en mí. Gracias por siempre darme la motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi familia, les agradezco por su paciencia, amor y comprensión. Gracias por su apoyo incondicional en los momentos en los que estuve ausente.

Tabla de Contenido

Introducción.....	12
2. Objetivo	13
2.1 Objetivo General	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3. Descripción de la Empresa y Antecedentes de Mantenimiento.....	14
3.1 Identificación De La Empresa.....	14
3.2 Estructura Organizacional Del Departamento De Mantenimiento	15
3.3 Estado De La Gestión De Mantenimiento	17
4. Marco Teórico	20
4.1. Introducción Al Mantenimiento Centrado En Confiabilidad (RCM)	20
4.2 Importancia Del Mantenimiento En Sistemas De Climatización	20
4.3 Principios De RCM Y Su Aplicación	20
4.4 Indicadores De Desempeño En Mantenimiento	21
4.5 Revisión De Estudios Previos	21
4.6 Desafíos Y Oportunidades En La Implementación De RCM	21
4.7 Árbol Lógico De Decisión	22
5. Metodología.....	23
6. Resolución Del Problema: Propuestas Y Estrategias.....	24
6.1 Antecedentes	24
6.2 Categorización De La Información Técnica.....	26
6.2.1 <i>Elementos Principales</i>	26
6.2.2 <i>Descripción Del Correctivo De La Falla Funcional</i>	31
6.3. Contexto Operacional.....	35
6.4. Conformación Del Equipo De Trabajo	41
6.5. Definición Equipo Y Area A Intervenir	41

6.5.1. <i>Definición Límites y Funciones de los Componentes</i>	41
6.5.2 <i>Matriz de Riesgos</i>	43
6.5.3 <i>Función del Sistema y Fallas Funcionales</i>	45
6.5.4 <i>Modos de Falla y Análisis de Efectos</i>	45
6.5.5 <i>Evaluación del Nivel de Riesgo</i>	46
6.6 Listado De Actividades Y/O Rutina De Mantenimiento.....	61
6.7 Listado De Actividades Para Implementación del RCM	66
7. Conclusiones.....	67
8. Recomendaciones.....	69
Referencias Bibliográficas	70

Lista de tablas

Tabla 1. Taxonomía de Equipos.....	28
Tabla 2. Disponibilidad de los Chiller año 2023.....	37
Tabla 3. Indicadores de Mantenimiento (KPIs).....	38
Tabla 4. Resumen de Ahorros Estimados Aplicando RCM.....	38
Tabla 5. Definición de Componentes.....	42
Tabla 6. Matriz de Impacto por Falla.....	43
Tabla 7. Matriz de Probabilidad de Ocurrencia de Riesgo.....	44
Tabla 8. Matriz de Riesgo.....	45
Tabla 9. Matriz de criticidad por componente.....	50
Tabla 10. Aplicación RCM (Condensador).....	51
Tabla 11. Aplicación RCM (Compresor).....	53
Tabla 12. Aplicación RCM (Evaporador).....	55
Tabla 13. Aplicación RCM (Sistema de Control)	57
Tabla 14. Aplicación RCM (Válvula de Expansión)	59
Tabla 15. Listado Actividades Mantenimiento Válvula de Expansión Chiller Carrier 30XWB3504-M203R.....	61
Tabla 16. Listado Actividades Mantenimiento Compresor Chiller Carrier 30XWB3504- M203R.....	62
Tabla 17. Listado Actividades Mantenimiento Evaporador Chiller Carrier 30XWB3504- M203R.....	63
Tabla 18. Listado Actividades Mantenimiento Condensador Chiller Carrier 30XWB3504- M203R.....	63
Tabla 19. Listado Actividades Mantenimiento Sistema de Control Chiller Carrier 30XWB3504- M203R.....	65
Tabla 20. Cronograma de Implementacion.....	66

Lista de Figuras

Figura 1. Vista fachada Hotel Radisson Cartagena Ocean Paviillion.....	14
Figura 2. Diagrama de Decisión de RCM.....	22
Figura 3. Chiller Carrier Modelo 30XWB3504-M203R.....	25
Figura 4. Presencia de Agua en la Línea del Refrigerante.....	26
Figura 5. Partes Chiller Carrier Modelo 30XWB3504-M203R.....	27
Figura 6. Ciclo Básico de Refrigeracion.....	30
Figura 7. Taponamiento de Tubos Averiados.....	31
Figura 8. Verificación de Presión Estatica.....	32
Figura 9. Estado del Compresor.....	32
Figura 10. Impurezas Evaporador.....	33
Figura 11. Limpieza Química Evaporador.....	33
Figura 12. Proceso de Deshumificacion.....	34
Figura 13. Estado de Contactores.....	35

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Tablas de análisis RCM por componente

Apéndice B. Registro fotográfico de fallas en chillers – año 2023

Apéndice C. Manual técnico del chiller Carrier 30XWB3504-M203R (extracto)

Glosario

AMEF: análisis de modos y efectos de falla. técnica que permite identificar fallas potenciales, sus causas y consecuencias.

Árbol lógico de decisión: herramienta que guía la selección de tareas de mantenimiento más adecuadas según las características del modo de falla.

Chiller: equipo de climatización encargado de enfriar agua o aire mediante un ciclo de refrigeración.

Criticidad: grado de impacto que una falla puede tener sobre la operación, seguridad o medio ambiente.

Confiabilidad: probabilidad de que un equipo funcione sin fallas durante un periodo específico bajo condiciones definidas.

Disponibilidad: medida de cuánto tiempo un sistema está en funcionamiento respecto al tiempo total.

Falla funcional: incapacidad de un activo para cumplir una función deseada según los parámetros requeridos.

RCM (Reliability Centered Maintenance): metodología sistemática que busca determinar las tareas necesarias para asegurar que un activo continúe cumpliendo su función en el contexto operacional actual.

Resumen

Título: Diseño De Plan De Mantenimiento Según Metodología RCM Para Chiller Carrier Mod 30xwb3504-M203r Condensado Por Agua Para El Sistema De Climatización Del Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion*

Autor: Sergio Enrique Montealegre Beltran**

Palabras clave: Chiller, intercambiador, evaporador, confiabilidad, RCM

Descripción:

El Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion cuenta con un sistema de climatización por agua helada de aproximadamente 12 años de operación compuesto por dos chillers de 350 TR cada uno condensados por torres de enfriamiento de igual capacidad y bombas de impulsión de flujo variable.

Durante los dos últimos años, el hotel ha experimentado averías sistemáticas que han afectado su operatividad, incluyendo la rotura del intercambiador del evaporador. Esta situación ha provocado un aumento del 20% en los costos de reparación y ha reducido la satisfacción de los huéspedes, con un 15% de reseñas negativas relacionadas con la temperatura en las habitaciones. La falta de una metodología de mantenimiento aplicada, que contemple un análisis de criticidad de los equipos, ha incrementado la probabilidad de fallas, comprometiendo la eficiencia operativa y la reputación del hotel.

Con base a lo anterior, se pretende diseñar un plan de mantenimiento bajo la metodología RCM con el objeto de aumentar la confiabilidad operacional del sistema y con ello minimizar el impacto a nivel económico y reputacional para la marca.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Daniel Ortiz Plata, Magister en Gerencia de Mantenimiento.

Abstract

Title: Design Of A Maintenance Plan According To The RCM Methodology For The Carrier Chiller Model 30xwb3504-M203r, Water-Cooled, For The Air Conditioning System At The Radisson Cartagena Ocean Pavillion Hotel*

Author: Sergio Enrique Montealegre Beltran**

Key Words: Chiller, Heat Exchanger, Evaporator, Reliability, RCM

Description: The Radisson Cartagena Ocean Pavillion Hotel has a chilled water air conditioning system that has been in operation for approximately 12 years. It consists of two 350 TR chillers, each cooled by cooling towers of the same capacity, along with variable flow pumps.

Over the past two years, the hotel has experienced systematic breakdowns that have affected its operations, including the failure of the evaporator heat exchanger. This situation has led to a 20% increase in repair costs and a decrease in guest satisfaction, with 15% of reviews mentioning issues related to room temperature. The lack of a preventive maintenance methodology, which includes an analysis of equipment criticality, has increased the likelihood of failures, compromising operational efficiency and the hotel's reputation.

Based on the above, the goal is to design a maintenance plan using the RCM methodology to improve the operational reliability of the system and, in doing so, minimize the economic and reputational impact on the brand.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Ing. Daniel Ortiz, Master's in Maintenance Management.

Introducción

El mantenimiento de equipos y sistemas críticos en hoteles es esencial para garantizar la continuidad operativa y mantener la satisfacción del cliente. En este contexto, el Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion, con su sistema de climatización basado en chillers Carrier de tecnología avanzada, enfrenta diversos desafíos operativos debido a averías recurrentes que afectan tanto la eficiencia como la experiencia del huésped a falta de una estrategia de mantenimiento adecuada, incrementando la probabilidad de fallas, elevando los costos de reparación y afectando directamente la experiencia del huésped.

La metodología RCM (Reliability-Centered Maintenance), que se enfoca en maximizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos mediante un análisis detallado de los modos de falla y sus riesgos, se presenta como una solución clave para optimizar el mantenimiento del sistema de climatización del hotel. Este enfoque no solo busca reducir los costos operativos, sino también mejorar la eficiencia y, lo más importante, garantizar la calidad del servicio ofrecido a los huéspedes.

Esta monografía tiene como propósito diseñar un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM, para aumentar la confiabilidad del sistema de climatización del hotel y reducir tanto el impacto económico como el reputacional de sus fallas. A través de este estudio, se analizarán los componentes críticos del sistema, se identificarán los posibles modos de falla y se propondrán las mejores prácticas para su mantenimiento preventivo y correctivo, contribuyendo a la mejora continua de los servicios ofrecidos por el Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion.

2. Objetivo

2.1 Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento bajo la metodología RCM para los chillers CARRIER MOD 30XWB3504-M203R del hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion con el fin de aumentar su confiabilidad operacional.

2.2 Objetivos Específicos

Categorizar la información técnica y manuales de operación de los equipos como información primaria para el desarrollo del plan de mantenimiento.

Identificar riesgos potenciales que puedan generar la indisponibilidad y una baja confiabilidad de los chillers a través de un análisis de modo y efecto de falla.

Determinar a través de la metodología RCM las actividades de mantenimiento, con sus frecuencias de programación, a aplicar a cada componente del equipo en función a su nivel de criticidad.

Cuantificar la potencial reducción de sobrecostos asociados al lucro cesante por un eventual cese de operación.

3. Descripción De La Empresa Y Antecedentes De Mantenimiento

3.1 Identificación De La Empresa

El Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion es un hotel ubicado en la costa norte de Colombia a aproximadamente 3 kilómetros del Aeropuerto Internacional Rafael Núñez en la ciudad de Cartagena. Este establecimiento ofrece una experiencia única, combinando comodidad, elegancia y una ubicación privilegiada frente al mar Caribe. Con su arquitectura moderna y espacios amplios, el hotel se destaca por su enfoque en el confort de sus huéspedes y su excepcional servicio.

Figura 1.

Vista fachada Hotel Radisson Cartagena Ocean Paviillion



Nota. Imagen de la fachada del Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion, ubicado en la ciudad de Cartagena,

Colombia. Fuente: Tomado de <https://lh3.googleusercontent.com/p/AF1QipMrJkmNj>

[OMQMVm88YUN3MJxYaFALbnILTJzgHM=s1360-w1360-h1020](https://lh3.googleusercontent.com/p/AF1QipMrJkmNj) .

Con una oferta de 233 habitaciones y suites, el Radisson Cartagena Ocean Pavillion está diseñado tanto para viajeros de negocios como para turistas que buscan disfrutar de la belleza histórica y cultural de Cartagena, mientras disfrutan de instalaciones de primer nivel. Entre sus principales características se incluyen una piscina al aire libre con vista al mar, un gimnasio completamente equipado, un spa de lujo y un par de restaurantes que ofrecen una variedad de opciones gastronómicas, desde platos típicos colombianos hasta cocina internacional.

3.2 Estructura Organizacional Del Departamento De Mantenimiento

Jefe de Mantenimiento (1)

- **Responsabilidades:**
 - Coordina y supervisa las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo.
 - Asegura la disponibilidad y el rendimiento óptimo de los equipos e instalaciones.
 - Administra el presupuesto del departamento.
 - Toma decisiones estratégicas sobre las mejoras en los equipos o infraestructuras.
 - Gestiona el personal de mantenimiento y coordina con otros departamentos del hotel para garantizar la continuidad de la operación.

Coordinadores de Mantenimiento (2)

- **Responsabilidades:**
 - Organiza los turnos de trabajo y asigna tareas a los técnicos.
 - Supervisa el trabajo diario y se asegura de que las actividades de mantenimiento se lleven a cabo de acuerdo con los cronogramas establecidos.
 - Coordina con los proveedores y gestiona el inventario de repuestos.
 - Asegura que se sigan las normas de seguridad y calidad en todas las actividades.

Técnicos de Mantenimiento Especializados**• Técnico Electromecánico (2)**

- Se especializa en el mantenimiento de sistemas eléctricos y mecánicos.
- Se ocupa de la reparación y mantenimiento de equipos como motores, generadores, sistemas eléctricos de la planta y maquinaria automatizada.

• Técnico en Refrigeración/Aire Acondicionado (1)

- Se especializa en sistemas de refrigeración, climatización y aire acondicionado.
- Realiza el mantenimiento preventivo y correctivo de equipos de refrigeración industrial y comercial.
- Supervisa las actividades del outsourcing

• Técnico en Carpintería (1)

- Realizar reparaciones y mantenimiento de estructuras y muebles de madera dentro de la empresa (puertas, ventanas, paneles, estanterías, etc.).
- Inspeccionar las instalaciones y realizar reparaciones preventivas o correctivas en elementos de madera que puedan estar deteriorados o dañados.

Personal de Apoyo o Auxiliar de Mantenimiento (4)

- Preparan herramientas y materiales para los técnicos.
- Ayudan en tareas menores de mantenimiento y en la realización de tareas repetitivas o de bajo nivel técnico.
- Realizan tareas de limpieza y conservación de las instalaciones de mantenimiento.
- Aseguran que las áreas de trabajo estén ordenadas y seguras.

Piscinero (3)

Realizar la limpieza y mantenimiento diario de las piscinas, jacuzzis y otros sistemas acuáticos de la empresa.

- Comprobar y ajustar los niveles de productos químicos (cloro, pH, alcalinidad) para mantener el agua limpia, segura y en condiciones óptimas.
- Inspeccionar y mantener los sistemas de filtración, bombas, calefacción y otros equipos asociados a las piscinas.
- Realizar reparaciones menores en el revestimiento o bordes de las piscinas, incluyendo la reparación de grietas o daños en las baldosas.

Asistente de Mantenimiento (1)

- Gestionan la documentación de mantenimiento, como los registros de trabajos realizados, los informes de inspección, los contratos de proveedores y los informes financieros del departamento.

3.3 Estado De La Gestión De Mantenimiento

Lamentablemente, a la fecha el hotel dista de contar con herramientas que le permitan establecer buenas prácticas en una gestión de mantenimiento:

Sistema de Gestión de Mantenimiento sin Software Especializado

Hoy en día, la gestión del mantenimiento en la organización ha sido llevada a cabo de manera manual y fragmentada, sin el apoyo de un sistema de software especializado para el seguimiento, programación y control de las actividades. En lugar de contar con herramientas tecnológicas avanzadas, se ha dependido de métodos tradicionales que no permiten una gestión eficiente ni un análisis adecuado de las operaciones.

Uso de Hojas de Cálculo

En ausencia de un software adecuado, se ha recurrido a hojas de cálculo como la principal herramienta para gestionar los registros y las intervenciones de mantenimiento. Aunque este enfoque ha permitido llevar un control básico, presenta varias limitaciones:

- **Falta de Integración:** Las hojas de cálculo no están integradas con otras áreas del hotel, lo que dificulta la coordinación y actualización de información en tiempo real. Cada área o persona encargada debe actualizar de manera manual las hojas de cálculo, lo que puede llevar a errores, desactualización y falta de precisión.
- **Riesgo de Errores Humanos:** Debido a la naturaleza manual de las actualizaciones y entradas de datos, existe un alto riesgo de errores humanos que afectan la precisión de los registros y las decisiones basadas en estos.
- **Baja Capacidad de Análisis:** Las hojas de cálculo ofrecen una capacidad limitada para realizar análisis detallados, como la predicción de fallos o el análisis de tendencias de rendimiento de los equipos. Las intervenciones programadas no se basan en datos históricos, lo que puede llevar a realizar mantenimientos innecesarios o a descuidar equipos que realmente necesitan atención.
- **Falta de Visibilidad y Reportes:** Las hojas de cálculo no facilitan la generación de informes automáticos ni la visualización clara del estado del mantenimiento en tiempo real. La obtención de información completa requiere realizar búsquedas manuales y combinar datos de diferentes hojas, lo cual es un proceso lento y propenso a omisiones.

Rutinas de Intervención Programadas sin Fundamentación o Análisis

El mantenimiento del hotel ha sido gestionado principalmente a través de rutinas de intervención programadas que se establecen de forma predeterminada, sin un análisis profundo de

las necesidades reales de los equipos. Las rutinas de mantenimiento preventivo se basan en la frecuencia de intervenciones estándar, no en un análisis detallado del estado de cada máquina. Esto ha dado lugar a:

- **Mantenimiento Preventivo No Optimizado:** Las intervenciones programadas no se basan en el análisis de desempeño o en la recopilación de datos históricos sobre el uso o fallos de los equipos. Como resultado, algunos equipos reciben mantenimiento innecesario, mientras que otros que podrían estar en riesgo no reciben atención a tiempo.
- **Falta de Monitoreo en Tiempo Real:** Al no contar con herramientas para supervisar el estado de los equipos en tiempo real, las decisiones sobre cuándo y cómo intervenir se hacen basándose únicamente en fechas o intervalos de tiempo predefinidos, sin tener en cuenta las condiciones reales de los equipos.
- **Ausencia de Indicadores de Desempeño:** La falta de análisis detallado ha impedido identificar patrones de fallos recurrentes o áreas que podrían mejorar su eficiencia. No se han establecido indicadores clave de rendimiento que permitan medir la efectividad del mantenimiento y la optimización de recursos.

La falta de un sistema de software especializado en la gestión del mantenimiento ha generado una serie de desafíos operativos, como el manejo ineficiente de las intervenciones, el riesgo de errores humanos, la dificultad para realizar análisis predictivos y la falta de visibilidad en tiempo real de las operaciones. La dependencia de hojas de cálculo y rutinas de intervención programadas sin análisis ha limitado la capacidad del departamento para optimizar los recursos, reducir costos y asegurar el rendimiento adecuado de los equipos e instalaciones. Es necesario un cambio hacia un sistema de gestión de mantenimiento más moderno, que permita una planificación basada en datos, un mejor control y análisis de las actividades, y una mayor eficiencia operativa.

4. Marco Teórico

4.1. Introducción Al Mantenimiento Centrado En Confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es una metodología que busca optimizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos a través de un enfoque sistemático en la gestión del mantenimiento. Según Moubray (1997) el RCM se fundamenta en la identificación de funciones críticas de los equipos, análisis de modos y efectos de falla (FMEA) y el desarrollo de estrategias de mantenimiento adaptadas a las necesidades específicas de cada equipo.

4.2 Importancia Del Mantenimiento En Sistemas De Climatización

Los sistemas de climatización son esenciales para el confort en entornos hoteleros, afectando directamente la satisfacción del cliente. Un mantenimiento adecuado no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce costos operativos a largo plazo. La falta de mantenimiento puede resultar en fallas críticas, generando un impacto negativo en la operación y en la percepción del servicio por parte de los huéspedes (Li et al., 2021).

4.3 Principios De RCM Y Su Aplicación

La implementación de RCM implica un análisis exhaustivo de las funciones de los equipos y la identificación de las fallas potenciales que pueden comprometer estas funciones. Smith y Hawkins (2004) destacan que RCM permite a las organizaciones priorizar sus esfuerzos de mantenimiento, enfocándose en aquellos equipos cuyo fallo tendría las consecuencias más severas.

La metodología RCM aplicada cumple con los lineamientos establecidos por la norma SAE JA1011, la cual define los criterios que deben satisfacerse para considerar que un proceso sigue la filosofía del mantenimiento centrado en confiabilidad.

Esta norma establece que el análisis debe partir de funciones y fallas funcionales, evaluar consecuencias de falla, establecer tareas proactivas y aplicar una lógica estructurada de toma de decisiones.

Estudios de caso han mostrado que la implementación de RCM puede mejorar la disponibilidad en más de un 40% y reducir los costos de mantenimiento correctivo en un 25% (Nowlan & Heap, 1978; Moubray, 1997; Al-Busaidi et al., 2018).

4.4 Indicadores De Desempeño En Mantenimiento

La medición del rendimiento del mantenimiento es crucial para evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Los indicadores clave de desempeño (KPIs) incluyen el tiempo promedio entre fallas (MTBF), el tiempo promedio de reparación (MTTR) y el costo de mantenimiento por unidad de producción. Estos indicadores permiten a los gerentes tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos y la planificación del mantenimiento (Bokrantz et al., 2017).

4.5 Revisión De Estudios Previos

Varios estudios han documentado la efectividad de RCM en diversos sectores. Al-Busaidi y Al-Hamadi (2018) analizaron la implementación de RCM en la industria hotelera, concluyendo que su aplicación puede reducir significativamente las fallas y mejorar la satisfacción del cliente. Estos hallazgos son consistentes con las experiencias de otras organizaciones que han adoptado estrategias de mantenimiento centradas en la confiabilidad, evidenciando la aplicabilidad y beneficios de esta metodología en contextos similares.

4.6 Desafíos Y Oportunidades En La Implementación De RCM

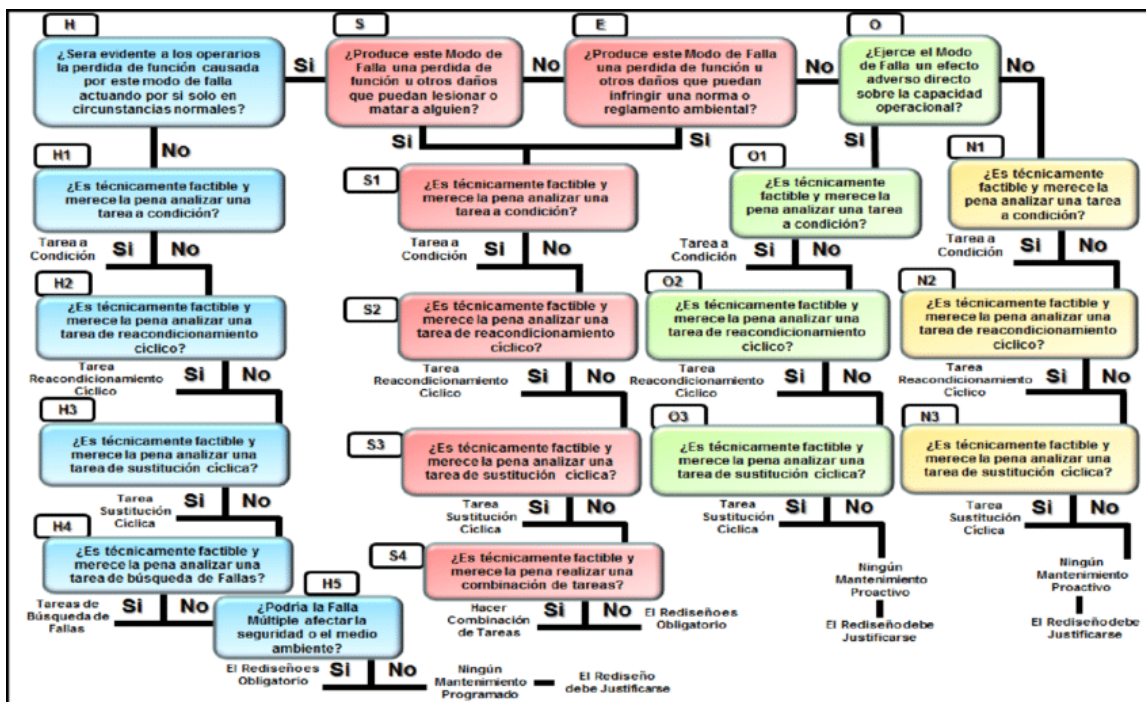
La implementación de RCM no está exenta de desafíos. Las organizaciones a menudo enfrentan resistencia al cambio y la falta de capacitación adecuada del personal. Sin embargo, las oportunidades que presenta la adopción de RCM, como la mejora en la sostenibilidad y la reducción de costos operativos, justifican su implementación. Un enfoque proactivo en el mantenimiento puede llevar a mejoras significativas en la eficiencia y la satisfacción del cliente en el sector hotelero.

4.7 Árbol Lógico De Decisión

En el contexto del RCM, permite ayudar a los responsables del mantenimiento a tomar decisiones informadas acerca de cuándo y cómo realizar las actividades de mantenimiento. Esto implica evaluar el impacto de una posible falla, las consecuencias operativas, las alternativas de mantenimiento y los riesgos involucrados.

Figura 2.

Diagrama de decisión de RCM.



Nota: Diagrama de árbol de decisión utilizado para aplicar la metodología RCM en el análisis de fallas funcionales y planificación de mantenimiento. Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Asheville, North Carolina: Ed. Aladon, P. 204-205

5. Metodología

- Categorizar la información técnica y manuales de los equipos que componen el sistema de climatización del hotel como información primaria para el desarrollo del plan de mantenimiento.
- Recopilar la documentación técnica y manuales de operación y mantenimiento recomendado por el fabricante.
- Clasificar la información de los equipos requerida para el ejercicio.
- Definir las funciones y parámetros del equipo en su contexto operacional
- Establecer en que forma falla el equipo dentro de su contexto operacional.
- Identificar las causas de la falla funcional. Identificar los modos de falla con sus riesgos potenciales que puedan afectar la disponibilidad y confiabilidad de los chillers a través de un análisis de criticidad de los principales componentes del equipo.
- Determinar los efectos de cada falla funcional.
- Valorar los riesgos por la ocurrencia de falla.
- Formular tareas para reducir la probabilidad de falla.
- Determinar a través de la metodología RCM las actividades de mantenimiento, con sus frecuencias a aplicar a cada componente del equipo en función a su nivel de criticidad.
- Plantear procedimientos en caso de que no se conozca una tarea para reducir la probabilidad de falla.

6. Resolución Del Problema: Propuestas Y Estrategias

6.1 Antecedentes

Un sistema de agua helada como el que cuenta el hotel, consiste en utilizar agua como medio de transferencia de calor. Por medio de enfriadores o chillers, se reduce la temperatura del agua para posteriormente ser distribuida por una red de tuberías a los serpentines de cada manejadora de aire, fan coil, etc. a través de bombas de impulsión con la finalidad de retirar calor y humedad del espacio a acondicionar.

El sistema de climatización del hotel cuenta con dos chillers marca Carrier, modelo 30XWB3504-M203R. Cada chiller está compuesto por dos circuitos de refrigeración independientes (circuito A y circuito B), cada uno con una capacidad aproximada de 175 TR, para una capacidad total instalada de 700 TR.

La operación de los chillers se define en función de la demanda térmica del sistema. Ambos equipos pueden operar de manera simultánea compartiendo la carga térmica o de forma alternada, según las condiciones de operación y la estrategia de control implementada. Asimismo, cada chiller puede operar con uno o ambos circuitos activos, lo que permite una modulación de capacidad y un grado de respaldo interno ante la indisponibilidad de uno de los circuitos.

El sistema de control gestiona de manera automática el arranque y paro de los chillers y de sus circuitos, en función de la carga térmica requerida por el hotel. En caso de que uno de los chillers se encuentre fuera de servicio, el equipo restante permite cubrir parcialmente la demanda de enfriamiento, garantizando la continuidad del servicio.

Figura 3.

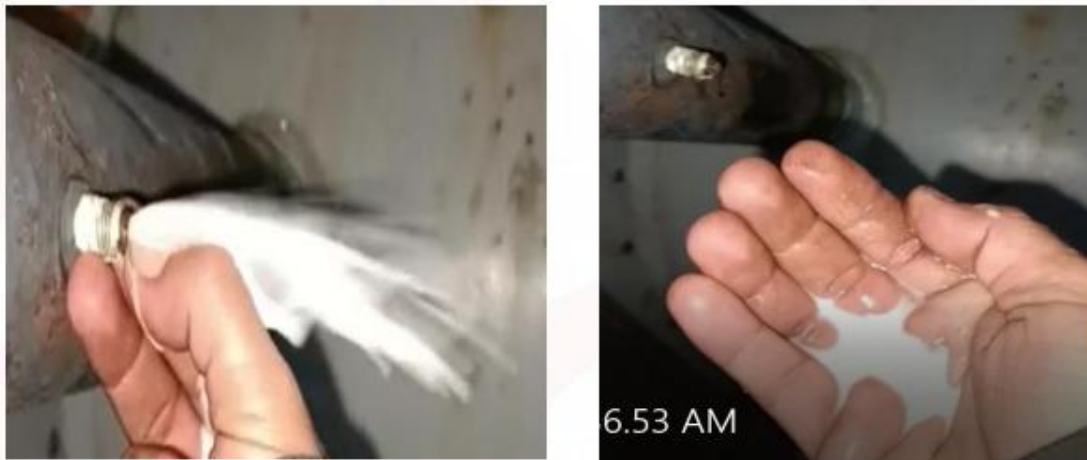
Chiller Carrier modelo 30XWB3504—M203R



Nota. Imagen ilustrativa del chiller Carrier modelo 30XWB3504—M203R utilizado en el sistema de climatización del hotel. Fuente: Catálogo Técnico CT-AquaForce-30XW-G-12-20-view.

El sábado 1 de abril de 2023 se presenta falla de funcionamiento en chiller N°2. Durante la revisión inicial, se evidencia que existe pérdida total de la carga de refrigerante y presencia de agua dentro del sistema de refrigeración circuito A.

Este tipo de daño se considera como pérdida total del circuito afectado por lo que se debe intervenir para confirmar el intercambiador con la fuga y encontrar la causa raíz del problema. El procedimiento para realizar es: Cerrar las válvulas de entrada y salida de agua fría y condensación, evacuar el agua de los dos intercambiadores para posteriormente presurizar el circuito afectado independizando el lado de alta y baja presión.

Figura 4.*Presencia de Agua en la Línea del Refrigerante*

Nota. Evidencia de la presencia de agua en la línea de refrigerante del chiller, como parte del diagnóstico inicial de la falla funcional. Fuente: Propia.

De acuerdo con lo encontrado se recomienda realizar pruebas de estado general de la tubería de los intercambiadores; esta prueba se conoce como EDDY CURRENT la cual, pese a su costo elevado, no garantiza la detección completa de las anomalías.

En la sección 6.2.2 se describe en detalle las observaciones, hallazgos y las acciones realizadas durante el proceso de verificación del Chiller 2, modelo 30XWB350. Este equipo fue sometido a un exhaustivo proceso de inspección donde se detectaron diversos problemas que comprometían el rendimiento y la operatividad del equipo.

6.2 Categorización De La Información Técnica

6.2.1 Elementos Principales

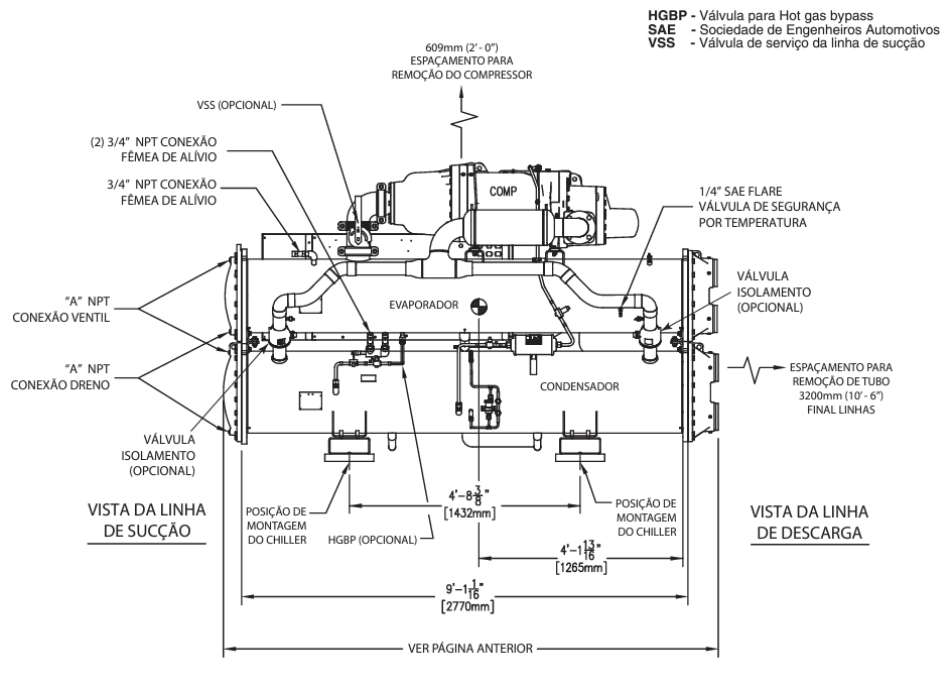
Un chiller con condensación por agua como lo es el objeto de este estudio, es un sistema de refrigeración industrial utilizado para enfriar líquidos, generalmente agua, y mantener una temperatura constante en procesos industriales, sistemas de aire acondicionado o instalaciones

comerciales. Este tipo de chiller utiliza agua como medio de disipación de calor del refrigerante.

A continuación, se describen las partes principales de un chiller con condensación por agua:

Figura 5.

Partes Chiller Carrier modelo 30XWB3504—M203R



Nota. Esta figura muestra las partes principales del chiller Carrier modelo 30XWB3504-M203R, ilustradas a partir del catálogo técnico CT-AquaForce-30XW-G-12-20-view, página 11.

Tabla 1.*Taxonomía de Equipos*

RADISSON OCEAN PAVILLION
EQUIPOS
REFRIGERACIÓN
PLANTA AGUA HELADA
CHILLERS
EVAPORADOR
COMPRESOR
CONDENSADOR
ECONOMIZADOR
VÁLVULAS DE EXPANSIÓN
SISTEMA DE CONTROL

Nota. Esta tabla presenta la clasificación de equipos relevantes para el análisis RCM, desarrollada por el autor.

6.2.1.1 Evaporador.

- **Función:** Es el componente donde el refrigerante absorbe calor del agua o del líquido que se va a enfriar. El refrigerante pasa de estado líquido a gaseoso en el evaporador, retirando el calor del líquido.
- **Características:** Está formado por una serie de serpentines o tubos a través de los cuales circula el refrigerante, y alrededor de ellos circula el agua que se va a enfriar.

6.2.1.2 Compresor.

- **Función:** El compresor es el corazón del sistema de refrigeración. Su tarea es comprimir el gas refrigerante, elevando su presión y temperatura, lo que permite que el calor capturado por el evaporador sea transferido al condensador.
- **Características:** Dependiendo del diseño del sistema, puede ser un compresor de tornillo, centrífugo o alternativo.

6.2.1.3 Condensador.

- **Función:** En el condensador, el refrigerante a alta presión y temperatura, que proviene del compresor, se enfría al ceder su calor al agua que circula por el sistema de enfriamiento. Durante este proceso, el refrigerante se condensa, pasando de estado gaseoso a líquido.
- **Características:** Consiste en una serie de tubos o serpentines por los cuales circula el agua de enfriamiento. El calor del refrigerante es transferido al agua, que luego es expulsada por un sistema de torres de enfriamiento o intercambiadores de calor.

6.2.1.4 Economizador.

- **Función:** El economizador es un dispositivo que optimiza el rendimiento del sistema al recuperar calor del refrigerante antes de que entre al compresor. Esto reduce la carga térmica del compresor y mejora la eficiencia general del sistema.
- **Características:** Su función es precalentar el refrigerante líquido utilizando parte del calor recuperado, lo que reduce la carga en el compresor.

6.2.1.5 Válvulas De Expansión.

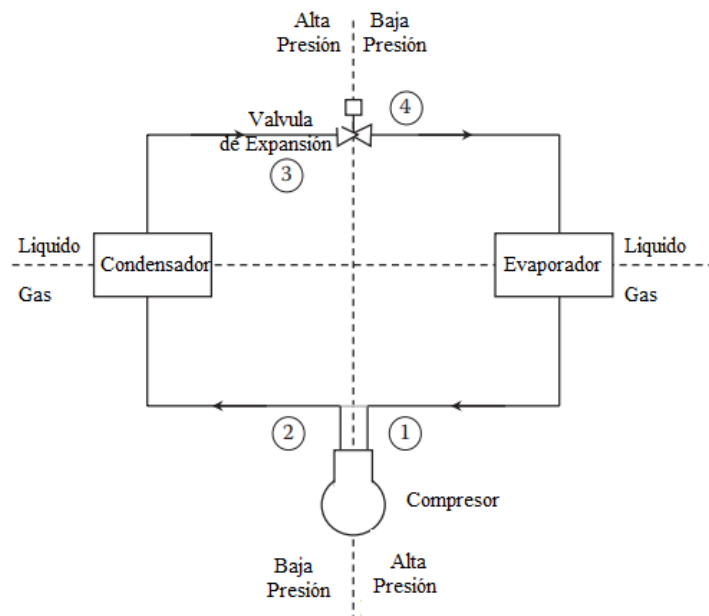
- **Función:** Estas válvulas controlan el flujo de refrigerante desde el condensador hacia el evaporador. Regulan la presión y el caudal del refrigerante para asegurar que el proceso de evaporación sea eficiente y constante.
- **Características:** Pueden ser electrónicas o termostáticas, y son clave para el control de la cantidad de refrigerante que llega al evaporador.

6.2.1.6 Sistema De Control Y Monitoreo.

- Función: Este sistema gestiona el funcionamiento del chiller, ajustando parámetros como la temperatura, la presión y el flujo del refrigerante y el agua. Asegura que el sistema opere dentro de los parámetros deseados y avisa en caso de fallos o desviaciones.
- Características: Puede incluir sensores de temperatura, presión, flujo y otros dispositivos para monitorear el desempeño del sistema y protegerlo de posibles daños.

Figura 6.

Ciclo Básico de Refrigeración



Nota. Representación esquemática del ciclo básico de refrigeración, extraída de HEBERT, W. HVAC Water Chillers and Cooling Towers: Fundamentals, Application, and Operation, Second Edition, Herbert W. Stanford III. Editorial. United Kingdom. 2004.

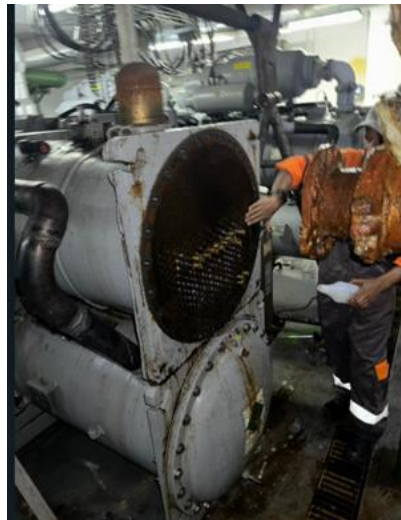
6.2.2 Descripción Del Correctivo De La Falla Funcional

6.2.2.1 Revisión Previa. Durante la inspección inicial se evidenció la inundación del equipo, afectando el evaporador, compresor, condensador, economizador y el sistema de refrigeración del circuito A del Chiller #2. Como consecuencia, se identificó la ruptura de 14 tubos del evaporador, lo que comprometió la integridad del sistema y su operación normal.

6.2.2.2 Taponamiento Evaporador. Se realizó el sellado de los tubos averiados mediante la instalación de tapones en ambos extremos del evaporador, con el fin de aislar las fugas y evitar el ingreso de agua al sistema de refrigeración. Durante esta intervención se identificaron seis tubos adicionales dañados, los cuales fueron sellados de manera preventiva. Posteriormente, se ejecutó una prueba de presurización, obteniendo estabilidad del sistema durante un período de ocho días.

Figura 7.

Taponamiento de Tubos Averiados



Nota. Muestra el procedimiento de sellado de tubos en el evaporador, realizado para evitar el ingreso de agua al sistema. Fuente: Propia.

Figura 8.*Verificación de Presión Estática*

Nota. Ilustra la prueba de presurización del sistema de refrigeración para detectar fugas, obteniendo presión estable durante los 8 días de prueba. Fuente: Propia.

6.2.2.3 Inspección Del Compresor. El compresor fue desmontado y enviado a taller especializado, donde se evidenció oxidación interna severa y daños mecánicos y eléctricos, incluyendo afectación de rodamientos, bobina y componentes del sistema de carga y descarga. Las fallas detectadas fueron corregidas mediante reparación mecánica y rebobinado eléctrico, restableciendo la capacidad operativa del equipo.

Figura 9.*Estado del Compresor*

Nota. Evidencia la condición del compresor tras desmontaje, con signos de oxidación avanzada y daños mecánicos.

Fuente: Propia.

6.2.2.4 Lavado Químico Del Evaporador. Durante la inspección interna del sistema se detectó oxidación y presencia de partículas sólidas, por lo que se realizó un lavado químico del evaporador mediante el método de recirculación. Este procedimiento se ejecutó en varias sesiones con el objetivo de eliminar impurezas y recuperar las condiciones adecuadas de operación del intercambiador de calor.

Figura 10.

Impurezas Evaporador



Nota. Evidencia la condición del compresor tras desmontaje, con signos de oxidación avanzada y daños mecánicos.

Fuente: Propia.

Figura 11.

Limpieza Química Evaporador



Nota. Presenta el proceso de limpieza química por recirculación aplicado al evaporador para eliminar impurezas.

Fuente: Propia.

6.2.2.5 Deshumidificación Del Sistema Y Desplazamiento De Humedad. Con el fin de eliminar la humedad residual del sistema de refrigeración, se realizó un proceso de deshumidificación utilizando olla de vacío, hielo seco y bomba de vacío. Como resultado, se alcanzó un nivel de vacío de 594 micrones, cumpliendo con las especificaciones del fabricante.

Figura 12.

Proceso de Des humificación



Nota. Documenta la deshumidificación del sistema de refrigeración utilizando olla de vacío y hielo seco. Fuente:

Propia.

6.2.2.6 Instalación De Sensores Y Mantenimiento Electrónico Del Chiller.

Se efectuó el reemplazo de la tarjeta, sensores de temperatura y transductores de presión, así como el mantenimiento eléctrico de los contactores en los cuales se evidenciaron signos de sobrecalentamiento.

Figura 13.

Estado de Contactores



Nota. Muestra el estado de los contactores eléctricos del sistema de refrigeración, con evidencia de recalentamiento.

Fuente: Propia.

6.2.2.7 Recarga De Refrigerante Y Pre-arranque

Se realizó la recarga de refrigerante conforme a la cantidad especificada por el fabricante, así como el cambio del filtro de aceite y la inyección de aceite lubricante. Posteriormente, se ejecutó el arranque del sistema, verificándose durante las primeras 48 horas parámetros de operación dentro de los valores esperados, concluyendo la recuperación operativa del circuito A del Chiller #2.

6.3. Contexto Operacional

El sistema de refrigeración del hotel tiene como objetivo garantizar el suministro continuo de agua helada para la climatización de las áreas operativas, habitaciones y zonas comunes, asegurando condiciones adecuadas de confort térmico para los huéspedes y el correcto funcionamiento de las operaciones del hotel.

El hotel requiere que el sistema de climatización opere de manera confiable y continua, con capacidad de respuesta ante variaciones de carga térmica, minimizando las interrupciones del servicio y priorizando la atención de las áreas críticas en caso de fallas o indisponibilidad parcial del sistema.

La operación del sistema se desarrolla bajo un esquema de control automático, en el cual los chillers entran en funcionamiento de acuerdo con la demanda térmica, compartiendo la carga o alternando su operación, lo que permite mantener niveles aceptables de servicio incluso ante la salida de uno de los equipos o de uno de sus circuitos.

En este contexto, la disponibilidad del sistema de refrigeración se considera un indicador clave de desempeño, ya que refleja la capacidad del equipo para cumplir con las exigencias operativas del hotel. La disponibilidad se calcula como el porcentaje del tiempo en el que el equipo está disponible para operar en relación con el tiempo total, teniendo en cuenta los tiempos de funcionamiento y los tiempos de inactividad por mantenimiento o fallas. La disponibilidad se calcula con la siguiente expresión:

$$D=(MTBF/MTBF+MTTR)\times 100\%$$

Donde:

- MTBF (Mean Time Between Failures, en inglés) es una métrica utilizada para evaluar la confiabilidad de un sistema o componente. En español, se traduce como "Tiempo Medio Entre Fallas". Esta medida indica el tiempo promedio que transcurre entre dos fallas sucesivas de un equipo o sistema en condiciones de operación normales.

- El MTTR (Mean Time To Repair, en inglés) o Tiempo Medio de Reparación es una métrica utilizada para medir el tiempo promedio que se tarda en reparar un sistema o equipo después de una falla.

Tabla 2.*Disponibilidad de los Chiller Año 2023*

2023	Tiempo Requerido	Tiempo Fuera de Servicio	Tiempo Operativo	Fallas Por Año	MTBF	MTRR	Disponibilidad $D=(MTBF/MTBF+MTTR)\times 100\%$
Equipo	Horas/Año	Horas/Año	Horas/Año		Tiempo Operativo/ Número de Fallas	Tiempo Fuera de Servicio/Número de Fallas	
Chiller 1	6048	72	5976	1	5976	72	98,7%
Chiller 2	6048	4391	1657	3	552,384	1463,616	27,4%

Nota. Disponibilidad operativa mensual del sistema chiller durante el año 2023, calculada según datos de operación continua.

Como puede verse en la tabla 2, para el caso del chiller 2, la disponibilidad del equipo fue extremadamente baja, ya que la falla se presentó a principios de abril y, debido a la complejidad de la reparación, permaneció fuera de servicio durante el resto del año. Esto tuvo un impacto negativo en el confort del hotel y, por ende, en su promesa de valor.

Con base en el comportamiento histórico del chiller 2 durante el año 2023, donde se evidenció una disponibilidad del 27,4% y una pérdida operativa superior a 4.000 horas, se estima que la implementación del plan de mantenimiento basado en RCM podría evitar al menos una falla crítica

anual. Esto representa una reducción potencial de costos cercana a los \$450.000 USD anuales, considerando los gastos por reparación y las pérdidas de ingresos asociadas al lucro cesante.

Tabla 3.

Indicadores de Mantenimiento (KPIs)

Indicador	Fórmula	Resultado Esperado
Disponibilidad	$MTBF / (MTBF + MTTR)$	Chiller 1: 98.7%, Chiller 2: 27.4%
Porcentaje de mantenimientos preventivos	$(N^{\circ} MP / \text{Total mantenimiento}) \times 100\%$	> 70% en 2025
Costo total de mantenimiento anual	Suma de correctivos + preventivos	\leq \$150.000 USD
Tiempo promedio de reparación	$\text{Tiempo total de reparación} / N^{\circ} \text{ de fallas}$	< 48 horas por falla
Tasa de fallas por mes	$N^{\circ} \text{ de fallas} / \text{Meses de operación}$	< 1 falla / mes

Nota. Resume los principales indicadores clave de mantenimiento como disponibilidad, costos y frecuencia de fallas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.

Resumen de Ahorros Estimados Aplicando RCM

Concepto	Sin RCM	Con RCM	Ahorro Estimado
Costos por reparación anual	\$550.000 USD	\$100.000 USD	\$450.000 USD
Ingresos perdidos por fallas	\$120.000 USD	\$0 USD	\$120.000 USD
Costo total de mantenimiento	\$670.000 USD	\$100.000 USD	\$570.000 USD

Nota. Comparación de costos de reparación, ingresos perdidos y mantenimiento con y sin la implementación de la metodología RCM. Fuente: Elaboración propia.

Los valores incluidos en la tabla 3 de ahorro estimado fueron obtenidos con base en información operativa real del Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion durante el año 2023, combinada con proyecciones fundamentadas en el plan de mantenimiento propuesto bajo metodología RCM. A continuación, se detalla la metodología aplicada para cada uno de los componentes del cálculo:

1. **Costos por reparación anual sin RCM (\$550.000 USD aprox.)**

Corresponde a la suma de gastos incurridos en reparaciones correctivas mayores, según registros del caso documentado en el chiller N.º 2:

- Fallo del compresor y rebobinado del motor eléctrico.
- Fuga interna en el evaporador y limpieza química.
- Cambio de sensores y tarjetas electrónicas.
- Recarga completa de refrigerante R-134A.
- Mano de obra especializada y pruebas de hermeticidad.

Estas cifras fueron estimadas a partir de órdenes de servicio y cotizaciones recibidas por el hotel.

2. **Ingresos perdidos por lucro cesante (\$120.000 USD aprox.)**

Calculado considerando:

- Impacto directo sobre disponibilidad de habitaciones (mínimo 10 habitaciones por día afectadas durante 20 días):

$$10 \text{ hab} \times \$150 \text{ USD} \times 20 \text{ días} = \$30.000 \text{ USD}$$

- Impacto en eventos, servicios complementarios (SPA, restaurantes, salones) y cancelaciones, con una proyección adicional de \$90.000 USD. La suma representa una estimación conservadora del ingreso dejado de percibir por baja disponibilidad y confort térmico reportado por los huéspedes.

3. Costo total de mantenimiento proyectado con RCM (\$100.000 USD)

Incluye:

- Implementación de actividades preventivas periódicas según el análisis RCM.
- Monitoreo de condiciones y ensayos no destructivos.
- Reemplazo programado de componentes menores (sensores, filtros, sellos).
- Capacitación del personal técnico interno. Este valor considera una ejecución gradual del plan y está por debajo de los costos anuales correctivos del escenario actual.

4. Ahorro estimado total (\$570.000 USD)

Representa la diferencia entre los costos actuales (correctivos + lucro cesante) y el escenario proyectado con mantenimiento planificado y confiable.

Nota: Estos valores pueden ajustarse según variaciones del mercado, tarifas del hotel, políticas internas de mantenimiento y evolución de la carga térmica en temporadas específicas.

6.4. Conformación Del Equipo De Trabajo

Dentro del ejercicio de RCM, es esencial que participen profesionales que trabajen de manera constante con el equipo objeto de estudio y por tanto su papel es crucial para el correcto desarrollo de la metodología. Así las cosas, los siguientes miembros formaron conformaron el equipo:

- Jefe de Mantenimiento
- Coordinador de Mantenimiento
- Técnico de Refrigeración
- Técnico Electricista
- Contratistas especialistas en chillers Carrier

6.5. Definición Equipo Y Area A Intervenir

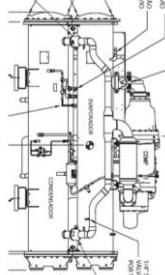
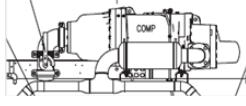
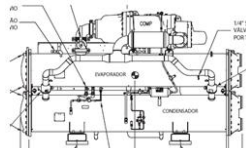
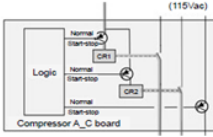
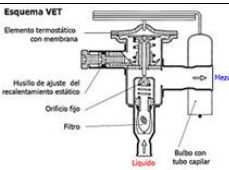
Dado que el chiller número 2 ha mostrado una mayor incidencia de fallos a lo largo del tiempo, y además presentó una falla funcional importante, se enfocará la aplicación del RCM en esta máquina, específicamente en el intercambiador de calor.

6.5.1. Definición Límites y Funciones de los Componentes

En la Tabla 2 se detallan las funciones específicas de cada uno de los componentes a evaluar, incluyendo las condiciones de diseño y operación incluyendo las condiciones externas que podrían afectar su correcto desempeño.

Tabla 5.

Definición de Componentes

ELEMENTO DE ESTUDIO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ELEMENTO	CONDICIONES OPERACIONALES (RANGOS GENERALES)	CONDICIONES AMBIENTALES	FRONTERAS (PLANO-DIAGRAMA)	INTERFACES (ENTRADAS / SALIDAS)	FUNCIONES
Condensador	Intercambiador de calor tipo carcasa y tubos, condensado por agua, diseñado para el refrigerante del chiller Carrier 30XWB3504-M203R.	Operación continua durante la demanda térmica del sistema, con presión y temperatura de condensación dentro de los rangos normales de diseño, flujo de agua de enfriamiento estable y suficiente para garantizar la disipación del calor.	Ambiente de sala de máquinas, con presencia de humedad, posible exposición a agentes corrosivos del agua y temperatura ambiente controlada.		Entrada: refrigerante en fase gaseosa, agua de enfriamiento. Salida: refrigerante en fase líquida, agua de enfriamiento con mayor temperatura.	Permitir la transferencia de calor del refrigerante hacia el agua de enfriamiento, asegurando la correcta condensación del refrigerante dentro de los rangos de presión y temperatura establecidos por el fabricante.
Compresor	Compresor del chiller Carrier 30XWB3504-M203R, accionado por motor eléctrico, diseñado para comprimir el refrigerante del sistema.	Operación intermitente o continua según la demanda del sistema, con presiones de succión y descarga dentro de los rangos normales de operación, lubricación adecuada y consumo eléctrico acorde a la carga aplicada.	Ambiente de sala de máquinas, expuesto a vibraciones mecánicas, temperatura ambiente moderada y condiciones eléctricas estables.		Entrada: refrigerante en fase gaseosa, energía eléctrica. Salida: refrigerante en fase gaseosa a mayor presión y temperatura.	Comprimir el refrigerante en estado gaseoso, elevando su presión y temperatura para permitir la continuidad del ciclo de refrigeración y el transporte del calor hacia el condensador.
Evaporador	Intercambiador de calor tipo carcasa y tubos, diseñado para enfriar el agua del sistema de climatización mediante refrigerante.	Operación continua durante la demanda de enfriamiento, con flujo de agua constante y balanceado, y temperatura de salida del agua dentro del rango operativo definido por el sistema de control.	Ambiente de sala de máquinas con humedad controlada y condiciones térmicas estables.		Entrada: refrigerante a baja presión, agua del sistema de climatización. Salida: refrigerante en fase gaseosa, agua fría hacia el sistema.	Absorber el calor del agua del sistema de climatización mediante el intercambio térmico con el refrigerante, garantizando la temperatura de salida del agua fría según el setpoint definido.
Sistema de Control	Sistema electrónico compuesto por controladores, sensores, actuadores y software de gestión del chiller.	Operación continua, con monitoreo permanente de variables de presión, temperatura y flujo, ejecutando lógicas de control y protección dentro de los rangos operativos programados.	Ambiente de sala de máquinas, expuesto a humedad, polvo y variaciones térmicas moderadas.		Entrada: señales de sensores, energía eléctrica. Salida: señales de control, alarmas y comandos a los actuadores.	Supervisar, controlar y proteger la operación del chiller mediante la medición de variables operativas y la ejecución de la lógica de control, asegurando una operación segura y eficiente del sistema.
Válvula de Expansión	Válvula de expansión diseñada para regular el flujo de refrigerante hacia el evaporador.	Operación automática en función de la carga térmica del sistema, manteniendo el flujo de refrigerante y el sobrecalentamiento dentro de rangos normales de operación.	Ambiente de sala de máquinas con condiciones térmicas estables.		Entrada: refrigerante en fase líquida. Salida: refrigerante a baja presión y temperatura.	Regular el flujo de refrigerante hacia el evaporador, reduciendo su presión y garantizando condiciones adecuadas de evaporación para una transferencia térmica eficiente.

Nota. Descripción y funciones de los componentes principales que conforman el chiller Carrier modelo 30XWB3504-M203R.

6.5.2 Matriz de Riesgos

En la tabla 3, se toma en cuenta distintos tipos de consecuencias (económicas, operativas, humanas y ambientales) y asigna una escala de probabilidad para cada nivel siendo 5 el de mayor impacto a partir de su consecuencia.

Tabla 6.

Matriz de Impacto por Falla

Consecuencias	Costos de Reparación (Estimado)	Pérdidas por Fallas en Operación	Impacto Humanos	Impacto Ambiental	Probabilidad
Falla crítica: pérdida total de operación del chiller	\$250,000 a \$400,000	\$100,000 a \$300,000 por pérdida de ingresos (habitación y eventos)	Más de un muerto, lesiones graves	Efectos irreversibles por emisión de gases o uso de energía adicional	5
Interrupción prolongada (24 a 48 horas)	\$150,000 a \$250,000	\$50,000 a \$150,000 por pérdida de ingresos de servicios (restaurantes, SPA, eventos)	Incapacidad permanente, efectos graves en salud	Uso excesivo de generadores de respaldo, posible impacto negativo	4
Interrupción parcial (8 a 24 horas)	\$50,000 a \$100,000	\$20,000 a \$60,000 por pérdida de ingresos (habitaciones y reducción de confort)	Incapacidad temporal, efectos menores en salud	Incremento en la huella de carbono por uso de generadores	3
Interrupción leve (1 a 8 horas)	\$10,000 a \$50,000	\$5,000 a \$20,000 por pérdida parcial de servicios	Lesiones menores, sin impacto grave en la salud	Efecto leve en el medio ambiente (emisiones menores)	2
Sin interrupción significativa (poco o nada de impacto)	Menos de \$10,000	Menos de \$5,000	Ningún impacto en la salud o seguridad	No tiene impacto ambiental notable	1

Nota. Evaluación cualitativa de los efectos o consecuencias de posibles fallas en cada componente del chiller.

Así mismo, se propone una matriz de riesgo que se basa en una escala de probabilidad de ocurrencia y los niveles de impacto.

Tabla 7.

Matriz de Probabilidad de Ocurrencia de Riesgo

Nivel	Probabilidad	Descripción	Frecuencia
5	Casi seguro	El evento se espera que ocurra en la mayoría de las circunstancias, debido a condiciones normales o fallas recurrentes.	Más de 1 vez en los últimos 6 meses.
4	Probable	Es probable que el evento ocurra en muchas de las circunstancias, aunque con menor frecuencia.	Al menos 1 vez en el último año y mayor a 6 meses.
3	Posible	El evento tiene una probabilidad moderada de ocurrir en algún momento, pero no es frecuente.	Al menos 1 vez entre los últimos 3 años y mayor a 1 año.
2	Improbable	El evento podría ocurrir, pero con baja probabilidad.	Al menos 1 vez en los últimos 5 años y mayor a 3 años.
1	Rara vez	El evento solo ocurre en circunstancias excepcionales o anormales, casi nunca se presenta.	No se ha presentado en los últimos 5 años.

Nota. Clasificación de la probabilidad con que ocurren las fallas identificadas en el análisis RCM.

Tabla 8.*Matriz de Riesgo*

Consecuencia	Nivel	PROBABILIDAD					
		Imposible	Improbable	Remoto	Ocasional	Moderado	Frecuente
Catastrófico	5						
Critico	4						
Marginal	3						
Insignificante	2						
Ninguno	1						
		> 10 Años	< 10 Años	< 5 Años	< 2 Años	< 6 Meses	± 1 Mes

Nota. Combinación entre la probabilidad de ocurrencia y el impacto para determinar el nivel de riesgo de las fallas en el sistema.

6.5.3 Función del Sistema y Fallas Funcionales

En las columnas 2 y 3 de las Tablas 5, 6, 7 y 8 se presenta una descripción detallada de las funciones y fallas funcionales del equipo, enfocándose en la pérdida de dichas funciones. Para este análisis, se desglosaron las partes del equipo en componentes individuales, lo que permitió examinar de manera más específica los modos de falla que podrían afectar el rendimiento adecuado del equipo.

6.5.4 Modos de Falla y Análisis de Efectos

En esta etapa, el objetivo fue identificar los componentes del equipo cuya falla pudiera impactar en la pérdida de capacidad operativa. En la columna 4 de las Tablas 5, 6, 7 y 8 se detallan los modos de falla, que representan las formas específicas en las que un componente puede fallar y afectar el funcionamiento del equipo. Además, en la columna 7 se describe en qué consiste el

análisis de efectos y consecuencias, consolidando la información sobre cómo la materialización de cada modo de falla podría influir en el medio ambiente, la seguridad, la producción y los daños físicos.

6.5.5 Evaluación del Nivel de Riesgo

Después de completar la hoja de información para el RMC, es necesario realizar un análisis detallado para determinar qué fallos deben ser abordados con mayor urgencia. Esto permitirá establecer el tipo de mantenimiento necesario y la frecuencia con la que debe realizarse.

Los resultados obtenidos de la matriz de riesgo, que se reflejan en la columna 11 (Nivel de riesgo) de las Tablas 5, 6, 7 y 8, indican el grado de riesgo asociado a cada componente, representado mediante colores: verde para un riesgo bajo, amarillo para riesgo medio y rojo para riesgo alto. A continuación, se presentan los principales hallazgos:

Condensador:

- **Riesgo Bajo:**

- Acumulación de sedimentos o suciedad en las superficies de intercambio térmico
- Baja concentración de productos químicos en el agua de enfriamiento
- Baja concentración de productos químicos en el agua de enfriamiento

- **Riesgo Medio:**

- Corrosión moderada en las tuberías o componentes del intercambiador de calor.
- Obstrucción parcial en las tuberías del sistema de agua
- Baja circulación de agua de enfriamiento debido a fallos en la bomba de agua

- **Riesgo Alto:**

- Fugas grandes en el sistema de agua de enfriamiento
- Corrosión severa o incrustaciones en el intercambiador de calor
- Fallos en las válvulas de control de agua o en el sistema de distribución de agua

Las columnas 12 a 16 de la Tabla 5 describen las acciones que se deben tomar en función del impacto que podría tener un fallo en la operación del sistema. Aquí se especifica el tipo de intervención a realizar (monitoreo, mantenimiento preventivo, por frecuencia o por condición) y la frecuencia con la que debe ejecutarse, además de los recursos humanos necesarios para llevar a cabo cada tarea.

Compresor:

- **Riesgo Bajo:**

- Desgaste gradual de los amortiguadores
- Fugas menores de aceite
- Vibraciones menores debido a desbalance en los componentes rotatorios

- **Riesgo Medio:**

- Fugas de refrigerante
- Desgaste de los sellos del compresor
- Problemas con el sistema de arranque (relé o contactores)

- **Riesgo Alto:**

- Fallo total del motor eléctrico

- Compresor bloqueado debido a la acumulación de suciedad o daños internos
- Fallo en el sistema de lubricación (bomba de aceite)

De manera similar al condensador, las columnas 12 a 16 de la Tabla 10 detallan las decisiones de mantenimiento, especificando las intervenciones necesarias según el nivel de riesgo, así como la frecuencia recomendada y el personal requerido.

Evaporador:

- **Riesgo Bajo:**

- Obstrucción parcial en los filtros del evaporador
- Fugas menores en las conexiones de agua
- Acumulación de suciedad o sedimentos

- **Riesgo Medio:**

- Fugas moderadas en el sistema de refrigerante
- Desbalance en el flujo de agua debido a problemas en la bomba
- Corrosión moderada en las superficies de intercambio térmico

- **Riesgo Alto:**

- Fugas significativas en el sistema de refrigerante
- Bloqueo completo del flujo de agua
- Fallo total del intercambiador de calor

Las columnas 12 a 16 de la Tabla 11 también describen las decisiones de mantenimiento necesarias, especificando el tipo de acción a seguir según el impacto que tendría un fallo en el funcionamiento del equipo, la frecuencia con la que se debe realizar y los recursos humanos que se necesitan.

Sistema De Control:

1. Riesgo Bajo:

- a. Fallo temporal de sensores o lecturas incorrectas
- b. Problemas menores en la programación del sistema de control
- c. Conexión intermitente en las comunicaciones entre componentes

2. Riesgo Medio:

- a. Desajustes en las configuraciones de control (temperatura, presión, flujo)
- b. Fallo de un controlador o módulo de comunicación
- c. Problemas con las válvulas de control o actuadores del sistema

3. Riesgo Alto:

- a. Fallo total del sistema de control
- b. Pérdida de comunicación entre el sistema de control y los componentes del chiller
- c. Mal funcionamiento del software de control

En la Tabla 12, columnas 12 a 16, se detallan las medidas a tomar para cada componente crítico, teniendo en cuenta los posibles efectos que un fallo podría tener sobre el sistema. Se especifican las decisiones de mantenimiento a realizar, la frecuencia recomendada y los recursos humanos necesario.

Tabla 9.

Matriz de criticidad por componente

Componente	Consecuencia (1-5)	Probabilidad (1-5)	Criticidad = C × P	Nivel
Compresor	5	4	20	Alta
Condensador	4	3	12	Media
Evaporador	5	3	15	Alta
Control	4	2	8	Media
Válvula expansión	3	2	6	Baja

Nota. Evaluación de la importancia relativa de cada componente para la operación del chiller, considerando riesgo y impacto.

Tabla 10.

Aplicación RCM (Condensador)

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falta Funcional	4. Modo de Falta	5. Falta oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico o total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Intercambiador	Permitir transferencia de calor del refrigerante al medio de enfriamiento	Reduce la capacidad de transferencia de calor del refrigerante	Superficies internas del intercambiador incrustadas por acumulación de sedimentos	Sí	Aumento de temperatura del refrigerante, sobrepresión	Mayor consumo energético, sobrecarga del compresor, baja eficiencia	Limpieza física y química, tratamiento de agua	\$100.000 USD	4	Medio	Preventivo y Monitoreo	Limpieza, tratamiento químico, filtros	Anual	Técnico de servicios
			Caudal de agua reducido en el circuito hidráulico	No	Alarmas por sobrepresión, cavitación en bombas	Paro del sistema, daño en sellos y compresor	Verificar filtros, bombas, válvulas	\$60.000 USD	4	Medio	Preventivo	Inspección y mantenimiento del sistema de agua	Semestral	Técnico de servicios
Tuberías y conexiones	Transportar el agua de enfriamiento entre el condensador y sistema	El sistema no transporta adecuadamente el agua	Tuberías y conexiones fisuradas que provocan fuga de agua	No	Reducción de agua, aumento de temperatura del refrigerante	Aumento de presión, fallo del sistema	Reparación o reemplazo de tuberías	\$5.000 USD	2	Bajo	Monitoreo	Inspección visual y pruebas de presión	Mensual	Técnico de servicios
			Tuberías del sistema hidráulico obstruidas por incrustaciones internas	Sí	Circulación inexistente, caída de presión	Mayor consumo energético, fallos del sistema	Limpieza e inspección periódica	\$5.000 USD	5	Alto	Preventivo	Mantenimiento de red hidráulica	Trimestral	Técnico de servicios

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Sensores y transductores	Medir temperatura, presión y flujo de agua	No miden o transmiten datos correctamente	Sensores y transductores descalibrados	No	Lecturas inexactas, mal control	Mala regulación, mayor consumo, fallos	Recalibración anual	\$10.000 USD	4	Medio	Preventivo	Calibración y limpieza	Mensual	Técnico de servicios
			Componentes electrónicos del sensor deteriorados por sobrecarga eléctrica Falla electrónica o eléctrica	No	Pérdida de señal, errores del sistema	Paros, sobrecargas, descontrol térmico	Revisión y limpieza	\$8.000 USD	3	Medio	Correctivo	Mantenimiento electrónico	Semestral	Técnico de servicios
			Cableado y conectores del sistema de medición deteriorados por fatiga o corrosión Daño en cableado/conectores	Sí	Interrupción de comunicación	Mal funcionamiento, fallos intermitentes	Revisión y cambio de cableado	\$6.000 USD	3	Medio	Correctivo	Inspección visual y pruebas de continuidad	Trimestral	Técnico de servicios
Válvula de control	Regular el caudal de agua en el condensador	No regula correctamente el caudal	Válvula de control atascada por desgaste mecánico o acumulación de sedimentos	Sí	Ruidos, fluctuación de temperatura y presión	Apagado, sobrepresión, pérdida de eficiencia	Limpieza, cambio de sellos o válvula completa	\$50.000 USD	1	Bajo	Monitoreo	Verificación de actuador y pruebas de caudal	Semestral	Técnico de servicios

Nota. Análisis detallado de funciones, modos de falla, efectos y tareas correctivas para el condensador.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.
Aplicación RCM (Compresor)

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Motor del compresor	Comprimir el gas refrigerante para permitir el ciclo de refrigeración	El motor no puede generar la compresión necesaria	Bobinados del motor eléctrico degradados por envejecimiento del aislamiento	No	Paro del equipo, alarmas eléctricas, medición de corriente/frecuencia	Pérdida total de enfriamiento, inactividad del chiller, afectación al confort del hotel, pérdida de ingresos	Reemplazo o rebobinado del motor, prueba de aislamiento, pruebas funcionales eléctricas	\$25.000 USD	3	Alto	Correctivo y Condición	Pruebas de resistencia eléctrica, inspección termográfica	Trimestral	Técnico electricista
			Motor eléctrico sobrecalentado por deficiencia en ventilación o sobrecarga eléctrica	No	Temperatura fuera de rango, disparos frecuentes del breaker	Riesgo de incendio, daño a los devanados	Mantenimiento preventivo en ventilación y análisis de carga eléctrica	\$15.000 USD	2	Medio	Preventivo	Limpieza de rejillas, verificación de consumo por fases	Trimestral	Técnico electricista
			Contactos eléctricos principales deteriorados por calentamiento y arco eléctrico	No	Chispas, calentamiento en terminales, ruidos eléctricos	Paros intermitentes, desgaste acelerado del motor	Reemplazo de contactores y terminales	\$2.000 USD	3	Medio	Correctivo	Inspección y ajuste de terminales, termografía	Semestral	Técnico electricista
Compresor rotativo	Transferir el refrigerante comprimido al condensador	El compresor no gira o se bloquea mecánicamente	Compresor bloqueado por partículas o residuos	No	Ruidos internos, presión desbalanceada, alarma de fallo mecánico	Paro total, daño progresivo, riesgo para otros componentes	Limpieza interna, revisión de filtros, análisis de aceite	\$30.000 USD	3	Alto	Correctivo	Revisión y limpieza de filtros de succión, análisis de aceite	Anual	Especialista Carrier
			Rodamientos internos desgastados por fricción y pérdida de lubricación	No	Vibración, ruido mecánico al arranque	Riesgo de colapso del eje, daño a carcasa, reducción de eficiencia	Cambio de rodamientos	\$10.000 USD	3	Medio	Correctivo	Inspección vibracional, revisión anual	Anual	Técnico mecánico
			Válvula de descarga deteriorada por desgaste.	No	Alta presión en descarga, paro por protección	Riesgo al condensador y sobrecarga al sistema	Reemplazo de válvula	\$8.000 USD	2	Medio	Correctivo	Revisión válvulas de descarga	Anual	Técnico de refrigeración

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falta Funcional	4. Modo de Falla	5. Falta oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Sistema de lubricación	Lubricar internamente el compresor y sus partes móviles	No se distribuye el aceite adecuadamente	Bomba de aceite deteriorada que genera presión insuficiente de lubricación	No	Presión de aceite fuera de rango, alarmas, apagado de seguridad	Sobrecalentamiento del compresor, daño progresivo	Reemplazo de bomba, cambio de aceite	\$15.000 USD	2	Medio	Preventivo	Verificación de presión de aceite, mantenimiento bomba	Semestral	Técnico electromecánico
			Filtro de aceite obstruido por acumulación de partículas contaminantes	No	Caída de presión, temperatura elevada, vibraciones	Riesgo de fallo total	Cambio de filtro, limpieza interna	\$5.000 USD	3	Medio	Preventivo	Cambio programado del filtro de aceite	Trimestral	Técnico electromecánico
			Aceite de lubricación degradado por oxidación y contaminación	No	Aceite oscuro, viscosidad alterada, aumento de temperatura	Daños en partes móviles, fallas catastróficas	Análisis y cambio de aceite, revisión de refrigerante	\$6.000 USD	2	Medio	Preventivo	Análisis semestral de aceite y refrigerante	Semestral	Técnico de refrigeración
Sellos del compresor	Prevenir fugas de refrigerante y mantener presión en el sistema	No mantiene la hermeticidad del sistema de refrigeración	Sellos del compresor desgastados por envejecimiento del material	No	Caída de presión, baja capacidad de enfriamiento	Aumento del consumo energético, contaminación interna	Reemplazo de sellos y juntas	\$5.000 USD	3	Medio	Preventivo	Pruebas de hermeticidad y revisión de sellos	Anual	Técnico de refrigeración
			Uniones de componentes con sellado deficiente por aflojamiento o deterioro	No	Detectadas por prueba de burbujas o sensor electrónico	Pérdida de refrigerante, aumento de carga sobre el sistema	Ajuste o sellado	\$3.000 USD	3	Bajo	Correctivo	Inspección periódica de uniones	Trimestral	Técnico de refrigeración
			Conexiones del compresor deformadas por montaje incorrecto o torsión mecánica	No	Fugas recurrentes, daño visible en acoples	Daño crónico, afectación a la presión del sistema	Reajuste o reemplazo	\$4.000 USD	2	Medio	Correctivo	Revisión estructural de montajes	Semestral	Técnico mecánico

Nota: Análisis detallado de funciones, modos de falla, efectos y tareas correctivas para el compresor.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12.

Aplicación RCM (Evaporador)

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Intercambiador	Absorber calor del agua circulante mediante refrigerante	Reducción de capacidad de transferencia térmica	Superficies internas del evaporador incrustadas por acumulación de suciedad	Sí	Baja eficiencia, temperaturas elevadas	Menor capacidad de enfriamiento, sobrecarga del sistema	Limpieza química/física	\$12.000 USD	3	Medio	Preventivo	Limpieza interna y externa del evaporador	Anual	Técnico de refrigeración
			Tubos del evaporador corroídos internamente por agua sin tratamiento químico	No	Daños en tubos, fugas localizadas	Riesgo de perforación y pérdida de refrigerante	Tratamiento químico, recubrimiento o cambio parcial	\$10.000 USD	3	Medio	Correctivo	Análisis de calidad del agua	Anual	Técnico químico
			Tubos del evaporador fisurados por fatiga térmica cíclica	Sí	Caída de presión progresiva	Fugas ocultas, menor eficiencia, contaminación interna	Revisión por ultrasonido, cambio de secciones	\$8.000 USD	2	Medio	Correctivo	Ensayos no destructivos	Anual	Especialista NDT
Tuberías hidráulicas	Conducir agua fría hacia los manejadores	Flujo insuficiente	Tuberías hidráulicas obstruidas parcial o totalmente por incrustaciones internas	No	Alarmas de caudal, diferencia de presión	Disminución en el enfriamiento, paro del sistema	Limpieza hidráulica interna	\$6.000 USD	3	Medio	Correctivo	Lavado de tuberías, inspección visual	Trimestral	Técnico de mantenimiento
			Juntas del sistema hidráulico deterioradas por envejecimiento del material	No	Goteo, humedad en gabinete o piso	Pérdida de presión, deterioro estructural	Sellado o reemplazo de juntas	\$3.000 USD	3	Bajo	Correctivo	Revisión de conexiones	Trimestral	Técnico de refrigeración
			Tuberías y uniones hidráulicas sometidas a sobrepresiones transitorias por golpes de ariete	No	Ruidos mecánicos, vibraciones	Daños en válvulas, uniones y estructura	Instalación de eliminadores o válvulas de alivio	\$5.000 USD	2	Medio	Correctivo	Verificación dinámica del flujo	Semestral	Técnico mecánico

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Aislantes térmicos	Minimizar pérdida de frío en tuberías y cuerpo del evaporador	Pérdida de aislamiento térmico	Aislamiento térmico externo deteriorado por envejecimiento del material	No	Condensación exterior, aumento de humedad	Pérdida energética, riesgo de hongos/moho	Sustitución del aislamiento	\$1.000 USD	4	Bajo	Preventivo	Inspección visual y reposición de aislante	Anual	Técnico de mantenimiento
			Material aislante desprendido por degradación del adhesivo o mala fijación	Sí	Puntos fríos al tacto, condensación puntual	Ineficiencia del sistema, corrosión superficial	Recolocación o pegado de material	\$500 USD	3	Bajo	Correctivo	Inspección de estado del pegamento	Anual	Técnico de mantenimiento
			Material aislante desprendido por degradación del adhesivo o mala fijación	No	Presencia de agua, olor a moho	Daño progresivo por hongos, corrosión	Reemplazo de secciones afectadas	\$1.500 USD	3	Medio	Correctivo	Pruebas de humedad en material	Anual	Técnico de servicios
Bandeja de drenaje	Evacuar el agua de condensación generada en el evaporador	No evacua el agua de condensación generada durante la operación	Tubería de drenaje obstruida por sedimentos, biofilm o suciedad	Sí	Acumulación de agua, rebosamiento	Riesgo biológico, proliferación de bacterias (Legionella)	Limpieza y desinfección	\$800 USD	3	Medio	Preventivo	Lavado de tubería y bandeja	Trimestral	Técnico de mantenimiento
			Bandeja de drenaje perforada por corrosión del material	No	Fugas, humedad bajo la unidad	Daño a la estructura y componentes eléctricos	Cambio de bandeja o aplicación de sellante	\$1.200 USD	2	Bajo	Correctivo	Inspección visual y sellado	Anual	Técnico de servicios
			Bandeja de drenaje mal nivelada por asentamiento o montaje incorrecto	Sí	Estancamiento de agua, drenaje incompleto	Malos olores, corrosión localizada	Reajuste de nivelación	\$600 USD	3	Medio	Correctivo	Verificación del nivel de instalación	Anual	Técnico de mantenimiento

Nota. Análisis detallado de funciones, modos de falla, efectos y tareas correctivas para el evaporador.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13.*Aplicación RCM (Sistema de Control)*

1. Parte	2. Función	3. Descripción en Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Sensores	Medir temperatura, presión, caudal	No entrega señales de medición confiables para el control automático del chiller	Sensor descalibrado por envejecimiento del elemento de medición	Sí	Datos erráticos en pantalla BMS	Funcionamiento errático, mal control del sistema	Calibración o reemplazo del sensor	\$2.000 USD	3	Bajo	Preventivo	Calibración de sensores críticos	Semestral	Técnico en control
			Sensor con cortocircuito interno por sobrevoltaje o humedad	No	Sensor sin señal, alarma de error	Paro del sistema por seguridad	Sustitución inmediata del sensor	\$3.000 USD	3	Medio	Correctivo	Revisión de sensores eléctricos	Trimestral	Técnico electricista
			Conectores eléctricos sulfatados o flojos por ingreso de humedad	Sí	Señal intermitente, fallos aleatorios	Lecturas no confiables, errores de control	Ajuste, secado o cambio de conector	\$1.500 USD	3	Bajo	Correctivo	Revisión y limpieza de conectores	Trimestral	Técnico de mantenimiento
Controladores	Ejecutar la lógica de automatización del chiller	No ejecuta la lógica de control requerida para la operación del chiller	Tarjeta lógica dañada por sobrevoltaje o falla electrónica interna	No	Chiller sin respuesta o parada por error crítico	Pérdida de control del sistema completo	Sustitución del PLC o tarjeta lógica	\$10.000 USD	2	Alto	Correctivo	Backup de programación y monitoreo de señales	Anual	Especialista en automatización
			Parámetros de control modificados incorrectamente durante ajustes o mantenimiento	No	Alarmas por límites erróneos	Funcionamiento fuera de rango óptimo	Reprogramación o restauración de parámetros	\$5.000 USD	3	Medio	Correctivo	Verificación de programación del controlador	Semestral	Técnico en automatización
			Display o interfaz HMI inoperativa por falla electrónica o de comunicación	No	Sin acceso a menú o configuración	Imposibilidad de monitoreo local	Reemplazo de display o cable de comunicación	\$4.000 USD	2	Bajo	Correctivo	Verificación de interfaz de usuario	Anual	Técnico en automatización

1. Parte	2. Función	3. Descripción de Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Red de comunicación	Transmitir datos entre los sensores y el controlador	No transmite de forma continua y confiable los datos entre sensores y controlador	Interrupciones de señal por interferencia electromagnética en el cableado de comunicación	Sí	Alarmas de fallo de comunicación	Paros aleatorios, pérdida de datos	Mejorar apantallamiento, ajustar canal de comunicación	\$3.000 USD	2	Bajo	Preventivo	Revisión de red de datos y conexiones	Trimestral	Técnico de redes
			Conectores RJ45 o terminales dañados por fatiga mecánica o mala manipulación	No	Sin señal, fallos continuos	Pérdida de monitoreo, descoordinación de subsistemas	Cambio de cables y conectores	\$2.000 USD	3	Medio	Correctivo	Verificación física y test de red	Trimestral	Técnico de redes
			Bus de comunicación saturado por exceso de dispositivos o tráfico no priorizado	Sí	Lentitud, pérdida de paquetes de datos	Fallos de sincronización y lentitud en control	Segmentación de red, configuración de prioridades	\$4.000 USD	3	Medio	Correctivo	Diagnóstico de tráfico en la red	Anual	Técnico en control
Software de gestión	Visualizar, analizar y registrar la operación del chiller	No permite la visualización ni supervisión de la operación del chiller	Bloqueo del software SCADA/BMS por fallo del servicio o del sistema operativo	No	Pantalla sin respuesta, pérdida de gráficos	Imposibilidad de gestión remota	Reinicio del sistema, verificación de servicios	\$6.000 USD	3	Medio	Correctivo	Verificación del sistema operativo	Trimestral	Técnico en TI
			Licencias de software vencidas o actualizaciones incompletas del sistema	Sí	Funcionalidades deshabilitadas	Riesgo de incumplimiento normativo	Renovación de licencia y soporte técnico	\$1.000 USD	2	Bajo	Preventivo	Auditoría de software y estado de licencias	Anual	Técnico de TI
			Falla en el sistema de almacenamiento o base de datos del SCADA/BMS	No	Faltan datos en gráficas o registros históricos	Falta de trazabilidad en diagnósticos	Configuración de backup automático	\$2.500 USD	2	Medio	Correctivo	Revisión de base de datos y respaldo	Trimestral	Técnico en TI

Nota. Análisis detallado de funciones, modos de falla, efectos y tareas correctivas para el sistema de control. Fuente: Elaboración propia

Tabla 14.*Aplicación RCM (Válvula de Expansión)*

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Válvula TXV / EXV	Regular el paso del refrigerante hacia el evaporador	No regula de forma estable el caudal de refrigerante hacia el evaporador	Orificio de la válvula obstruido por partículas sólidas o residuos del sistema	No	Caída de presión, sobrecalentamiento anormal	Reducción de capacidad, riesgo de daño al compresor	Limpieza del sistema o reemplazo de válvula	\$6.000 USD	3	Medio	Correctivo	Revisión funcional, inspección de filtros	Anual	Técnico de refrigeración
			Aguja u orificio de expansión desgastados por operación prolongada	No	Inestabilidad en ciclos térmicos	Consumo energético elevado, pérdida de eficiencia	Sustitución de la válvula	\$5.000 USD	3	Medio	Correctivo	Inspección de componentes móviles	Anual	Técnico de refrigeración
			Cuerpo de la válvula fisurado o sellos internos deteriorados	Sí	Presión baja, baja carga de refrigerante	Riesgo de pérdida completa de refrigerante	Reparación o cambio de válvula	\$8.000 USD	3	Medio	Correctivo	Prueba de hermeticidad	Semestral	Técnico de refrigeración
Filtro de entrada	Evitar el ingreso de contaminantes al orificio de expansión	No permite el paso adecuado de refrigerante hacia la válvula de expansión	Elemento filtrante saturado por partículas metálicas del sistema	Sí	Baja presión en entrada, diferencial de presión anormal	Ciclo incompleto, reducción de enfriamiento	Reemplazo del filtro	\$2.000 USD	3	Bajo	Preventivo	Cambio programado de filtro de entrada	Trimestral	Técnico de refrigeración
			Elemento filtrante bloqueado por aceite oxidado o contaminado	No	Presión inestable, acumulación de aceite	Interrupción del ciclo frigorífico	Lavado químico del sistema	\$4.000 USD	3	Medio	Correctivo	Análisis de aceite y limpieza del circuito	Anual	Técnico químico
			Elemento filtrante deformado o colapsado por diferencial de presión excesivo	No	Flujo interrumpido o completamente	Paro total del sistema	Reemplazo urgente	\$3.500 USD	2	Medio	Correctivo	Inspección estructural de filtros	Semestral	Técnico de refrigeración

Nota. Análisis detallado de funciones, modos de falla, efectos y tareas correctivas para la válvula de expansión.

Fuente: Elaboración propia.

1. Parte	2. Función	3. Descripción Falla Funcional	4. Modo de Falla	5. Falla oculta	6. Evidencia	7. Descripción Efectos y Consecuencias	8. Correctivo	9. Impacto económico total del riesgo (\$)	10. Probabilidad	11. Nivel del riesgo	12. Tipo de decisión	13. Descripción de la tarea	14. Valor	15. Recursos
Sensor de bulbo / NTC	Detectar temperatura para controlar apertura de válvula	No detecta correctamente la temperatura del refrigerante para el control de la válvula de expansión	Sensor NTC descalibrado o con degradación del elemento sensible por envejecimiento	Sí	Apertura o cierre fuera de fase	Sobrecalentamiento o subenfriamiento	Calibración o cambio del sensor	\$1.000 USD	3	Bajo	Preventivo	Revisión y calibración de sensores	Semestral	Técnico en control
		Cableado o conector del sensor interrumpido por fatiga mecánica o corrosión	Cableado o conector del sensor interrumpido por fatiga mecánica o corrosión	No	Señal nula, error de lectura	Apertura incorrecta de la válvula	Reemplazo de cableado	\$1.500 USD	3	Medio	Correctivo	Prueba de continuidad eléctrica	Trimestral	Técnico en control
		Sensor instalado en una ubicación incorrecta o con fijación deficiente	Sensor instalado en una ubicación incorrecta o con fijación deficiente	Sí	Medición imprecisa, desfase térmico	Fallo en la lógica de expansión	Reinstalación adecuada del sensor	\$800 USD	2	Bajo	Correctivo	Inspección física del montaje	Anual	Técnico de refrigeración
Actuador electrónico	Ejecutar la apertura/cierre controlado (EXV)	No se abre o cierra la válvula en el momento adecuado	Motor paso a paso del actuador dañado por sobrecarga o desgaste interno	No	Válvula bloqueada, sin variación de flujo	Sobrepresión o pérdida de eficiencia	Sustitución del actuador	\$6.000 USD	3	Medio	Correctivo	Verificación funcional del actuador	Semestral	Técnico en automatización
		Señal de control interrumpida entre el PLC y el actuador	Señal de control interrumpida entre el PLC y el actuador	Sí	Sin respuesta, alarma de comunicación	Inestabilidad en el sistema de expansión	Revisión de red de control	\$2.500 USD	3	Medio	Correctivo	Prueba de conectividad y señal	Trimestral	Técnico en automatización
		Circuito electrónico dañado por sobrevoltaje eléctrico	Circuito electrónico dañado por sobrevoltaje eléctrico	No	Actuador dañado, sin respuesta	Interrupción total del control	Sustitución del actuador y protección eléctrica	\$7.000 USD	2	Medio	Correctivo	Verificación de protecciones eléctricas	Anual	Técnico electricista

6.6 Listado De Actividades Y/O Rutina De Mantenimiento

El plan de mantenimiento diseñado para el chiller Carrier 30XWB3504-M203R condensado por agua está basado en tareas proactivas y correctivas estructuradas según el análisis RCM realizado en los principales componentes del sistema: compresor, evaporador, condensador, válvula de expansión y sistema de control.

Las tareas están clasificadas por frecuencia de ejecución (diarias, semanales, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales), así como por el tipo de recurso humano requerido (técnico de mantenimiento, refrigeración, electricista, etc.).

Estas acciones buscan asegurar la confiabilidad operativa del sistema de climatización y están diseñadas para integrarse al plan maestro de mantenimiento del hotel.

A continuación, se presenta el resumen estructurado de tareas de mantenimiento:

Tabla 15.

Listado Actividades Mantenimiento Válvula de Expansión chiller Carrier 30XWB3504-M203R

LISTADO DE ACTIVIDADES VÁLVULA DE EXPANSIÓN			
Frecuencia	Parte del equipo	Descripción de la tarea	Recurso humano
Diaria	TXV/EXV	Observación de apertura/cierre por comportamiento térmico	Técnico de refrigeración
Semanal	Sensor de temperatura	Revisión de respuesta del bulbo o sensor electrónico	Técnico de control
Trimestral	Filtro de entrada	Revisión y limpieza o cambio si aplica	Técnico de refrigeración
Trimestral	Actuador electrónico	Prueba de señal y movimiento (válvulas EXV)	Técnico de automatización
Semestral	Línea de líquido	Verificación de presión, ruidos o señales de obstrucción	Técnico de refrigeración
Anual	TXV/EXV	Reemplazo preventivo si presenta desgaste o fugas	Técnico de refrigeración

Nota. Actividades programadas de mantenimiento preventivo para la válvula de expansión del chiller.

Tabla 16.**Listado Actividades Mantenimiento Compresor chiller Carrier 30XWB3504-M203R**

LISTADO DE ACTIVIDADES COMPRESOR			
Frecuencia	Parte del equipo	Descripción de la tarea	Recurso humano
Diaria	Compresor	Verificación visual de fugas de aceite, vibraciones anormales y ruidos	Técnico de mantenimiento
Diaria	Compresor	Revisión de presiones de succión y descarga en pantalla de control	Técnico de operación
Semanal	Motor del compresor	Revisión de temperatura del motor (tacto/IR si aplica), ventilación y consumo	Técnico electricista
Trimestral	Motor del compresor	Inspección termográfica de conexiones y pruebas de aislamiento	Técnico electricista
Trimestral	Lubricación	Revisión y cambio de filtros de aceite, verificación de bomba y presión	Técnico de refrigeración
Semestral	Sistema de arranque	Revisión de contactores, relés térmicos, tiempo de arranque	Técnico electricista
Anual	Lubricación	Análisis de aceite (viscosidad, color, residuos), cambio si aplica	Técnico de refrigeración
Anual	Eje y rodamientos	Evaluación vibracional y física, inspección del estado mecánico	Técnico mecánico
Anual	Montajes y fijaciones	Ajuste de pernos, revisión de amortiguadores y nivelación	Técnico de mantenimiento

Nota. Actividades programadas de mantenimiento preventivo para el compresor del chiller.

Tabla 17.

Listado Actividades Mantenimiento Evaporador chiller Carrier 30XWB3504-M203R

LISTADO DE ACTIVIDADES EVAPORADOR			
Frecuencia	Parte del equipo	Descripción de la tarea	Recurso humano
Diaria	Intercambiador	Verificación visual de humedad anormal o condensación externa	Técnico de mantenimiento
Semanal	Bandeja de drenaje	Verificación de flujo de agua sin obstrucción	Técnico de mantenimiento
Mensual	Intercambiador	Medición de temperaturas de entrada y salida (delta T) y revisión de eficiencia	Técnico de operación
Trimestral	Tuberías hidráulicas	Revisión de presión, fugas visibles y limpieza si aplica	Técnico de mantenimiento
Trimestral	Bandeja y drenaje	Limpieza profunda de bandeja, sifón y desinfección	Técnico de mantenimiento
Semestral	Intercambiador	Verificación de pérdida de carga o suciedad interna	Técnico de refrigeración
Anual	Intercambiador	Limpieza química (recirculación con bomba) y/o limpieza mecánica	Técnico de refrigeración
Anual	Aislantes térmicos	Verificación de continuidad, sellado y condensación en el aislante	Técnico de mantenimiento
Anual	Tuberías	Verificación de nivelación, soporte y ausencia de golpes de ariete	Técnico mecánico

Nota. Actividades programadas de mantenimiento preventivo para el evaporador del chiller.

Tabla 18.

Listado Actividades Mantenimiento Condensador chiller Carrier 30XWB3504-M203R

LISTADO DE ACTIVIDADES CONDENSADOR			
Frecuencia	Parte del equipo	Descripción de la tarea	Recurso humano
Diaria	Intercambiador	Lectura de temperatura y presión del agua de entrada/salida	Técnico de operación
Semanal	Tuberías de agua	Verificación de fugas visibles, vibraciones y ruidos hidráulicos	Técnico de mantenimiento
Semanal	Sensores de presión/flujo	Verificación de lectura y calibración básica	Técnico de control
Trimestral	Tuberías y conexiones	Prueba de presión en la red de agua del condensador	Técnico de mantenimiento
Trimestral	Válvulas de control	Revisión de funcionamiento, actuador y fugas	Técnico de servicios
Trimestral	Tratamiento del agua	Control químico: pH, conductividad, cloruros, dureza	Técnico químico
Semestral	Intercambiador	Evaluación del rendimiento térmico	Técnico de refrigeración
Anual	Intercambiador	Limpieza química del condensador	Técnico de refrigeración
Anual	Válvulas y actuadores	Verificación completa de estado interno	Técnico de mantenimiento

Nota. Actividades programadas de mantenimiento preventivo para el condensador del chiller.

Tabla 19.

Listado Actividades Mantenimiento Sistema de Control chiller Carrier 30XWB3504-M203R

LISTADO DE ACTIVIDADES SISTEMA DE CONTROL			
Frecuencia	Parte del equipo	Descripción de la tarea	Recurso humano
Diaria	Panel de control	Verificación de alarmas activas	Operador / Técnico
Semanal	Sensores de operación	Validación cruzada de lecturas (temp, presión, flujo)	Técnico de control
Trimestral	PLC / tarjeta lógica	Verificación de tiempos de respuesta y salidas	Técnico en automatización
Trimestral	Red de comunicación	Comprobación de conectividad, interferencias y saturación	Técnico de redes
Semestral	SCADA / BMS	Verificación de funcionamiento del sistema gráfico y back-up	Técnico de TI
Semestral	Interfaz de usuario	Comprobación de alarmas, gráficas, accesos y eventos	Técnico de control
Anual	Controladores	Prueba de entradas/salidas, actualización de firmware	Especialista en automatización
Anual	Base de datos	Mantenimiento de registros históricos, optimización de espacio	Técnico de TI

Nota. Actividades programadas de mantenimiento preventivo para el sistema de control del chiller.

Se recomienda consolidar todas las actividades en el software de gestión de mantenimiento del hotel o en una hoja de cálculo organizada por fecha, equipo y responsable, con campos para observaciones. También se sugiere mantener un stock mínimo de repuestos críticos como válvulas de expansión, sensores, contactores, filtros y termistores para respuesta oportuna ante fallos.

6.7 Listado De Actividades Para Implementación del RCM

A continuación, se presenta un cronograma tentativo de implementación del plan de mantenimiento basado en RCM, distribuido por fases operativas mensuales para facilitar su ejecución progresiva:

Tabla 20.

Cronograma de Implementación

Fase	Actividades principales	Mes estimado
Diagnóstico inicial	Revisión técnica, priorización de activos	Mes 1
Capacitación técnica	Entrenamiento del personal y socialización del plan	Mes 2
Implementación piloto	Aplicación de RCM en compresor y evaporador	Mes 3-4
Evaluación y ajustes	Revisión de indicadores, ajustes al plan	Mes 5
Expansión total	Aplicación del plan completo al sistema y mejora continua	Mes 6-12

Nota. Cronograma las etapas, actividades y tiempos estimados para la implementación de la metodología RCM en el sistema de mantenimiento del chiller Carrier 30XWB3504-M203R.

7. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo permitió estructurar un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM, aplicando sus principios al chiller Carrier modelo 30XWB3504-M203R, equipo fundamental para la climatización del Hotel Radisson Cartagena Ocean Pavillion. A partir de una revisión detallada de la información técnica, el análisis de criticidad de sus componentes y la evaluación de los modos de falla, se diseñaron estrategias de mantenimiento que permiten optimizar la confiabilidad del sistema, reducir los costos operativos y mejorar la satisfacción del cliente.

Se logró dar respuesta al objetivo general planteado al estructurar un plan de mantenimiento confiable, soportado en la categorización técnica de los componentes críticos del sistema, entre los que se destacan el compresor, evaporador, condensador, sistema de control y válvula de expansión. Asimismo, se respondieron los objetivos específicos mediante la aplicación de un análisis sistemático de modos y efectos de falla, la definición de frecuencias de mantenimiento por criticidad, y la estimación del impacto económico derivado de las fallas más representativas.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del RCM tiene el potencial de aumentar significativamente la disponibilidad del chiller, como lo demuestra el contraste entre el comportamiento de los dos equipos similares en el año 2023, donde el chiller intervenido presentó una disponibilidad inferior al 30%, debido a la ausencia de una estrategia de mantenimiento efectiva. El nuevo plan propone tareas preventivas específicas, recursos asignados y frecuencias adaptadas al riesgo, lo cual permitirá anticiparse a fallas críticas y mejorar la eficiencia energética del sistema.

Además, con la implementación del plan RCM diseñado, se proyecta una reducción significativa en los sobrecostos operativos. Tomando como referencia los datos del año 2023, se estima que el hotel podría evitar pérdidas superiores a \$450.000 USD anuales, derivadas tanto de reparaciones como de ingresos no percibidos por la indisponibilidad del sistema de climatización.

Finalmente, este trabajo contribuye de manera tangible al contexto local y regional, ofreciendo una metodología replicable en otras instalaciones hoteleras de Cartagena y el Caribe colombiano que enfrenten retos similares. A nivel institucional, representa un avance hacia una cultura de mantenimiento basado en confiabilidad, con impacto directo sobre la sostenibilidad operativa y la percepción del servicio por parte de los huéspedes. En futuras aplicaciones, este enfoque podrá ser escalado a otros sistemas críticos del hotel, fortaleciendo la gestión integral del mantenimiento.

8. Recomendaciones

Con base en los hallazgos y resultados obtenidos en este trabajo de grado, se proponen las siguientes recomendaciones para garantizar la efectividad del plan de mantenimiento y su evolución en el tiempo:

1. Implementar el plan RCM de manera progresiva, priorizando los componentes de mayor criticidad (compresor y sistema de control), para obtener resultados tangibles en la confiabilidad del sistema en el corto plazo.
2. Capacitar al personal técnico del hotel en la metodología RCM y en el uso de los procedimientos definidos, con el fin de asegurar una adecuada ejecución, seguimiento y retroalimentación del plan.
3. Monitorear y registrar continuamente los indicadores operativos y de mantenimiento (disponibilidad, frecuencia de fallas, costos), para evaluar el impacto del plan y ajustar las rutinas según el comportamiento real del sistema.
4. Extender la aplicación del RCM a otros sistemas críticos del hotel, como plantas eléctricas y sistemas de bombeo con el fin de elevar el nivel de confiabilidad general de la infraestructura.
5. Revisar y actualizar el plan de mantenimiento RCM cada 12 meses, incorporando nuevas fallas observadas, cambios operativos y mejoras tecnológicas que puedan surgir.
6. Desarrollar herramientas digitales o integraciones con software de mantenimiento asistido por computadora (CMMS) para facilitar la planificación, ejecución y trazabilidad del mantenimiento programado.
7. Implementar estrategias de mantenimiento predictivo, incorporando tecnologías como el monitoreo remoto, análisis de vibraciones y plataformas inteligentes de gestión. Estas herramientas permitirían anticipar fallas antes de su ocurrencia, optimizando aún más la disponibilidad del sistema y reduciendo los costos de operación.

Referencias bibliográficas

- Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación – ICONTEC. NTC 1486:
Documentación. Presentación de trabajos académicos. Bogotá: ICONTEC, 2022. 84 p.
- Manual de operación y mantenimiento del chiller 30XWB3504-M203R. (2022). Edición técnica.
Estados Unidos: Carrier Corporation, 2022. 110 p.
- Mora, L. (2014). Gestión logística integral. Las mejores prácticas en la cadena de
abastecimiento. 3 ed. Bogotá: Ecoe Ediciones, 110 p.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. Traducido por Ellmann &
Asociados. Ed. Aladon Ltd.
- Noguera, É. (2018). Gestión del mantenimiento industrial. Bogotá: Ecoe Ediciones, 245 p.
- SAE International. (2002). *SAE JA1012: A Guide to the Reliability-Centered Maintenance
(RCM) Standard*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.