



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECÁNICA NAVAL

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN MECÁNICA NAVAL

TEMA:

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM ENFOCADA A LA TORRE DE
ENFRIAMIENTO DEL TALLER DE MOTORES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
MARÍTIMA

AUTORES:

INTRIAGO GARCÍA JESÚS SANTIAGO

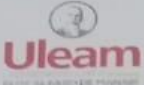
ARAÚZ LOOR BRYAN LEODAN

TUTOR:

ING. FOLKE ZAMBRANO VERA

MANTA-MANABÍ-ECUADOR

2026 (1

	NOMBRE DEL DOCUMENTO:	CÓDIGO: PAT-01-F-010
	CERTIFICADO DE TUTOR(A).	REVISIÓN: 2
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO.	Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

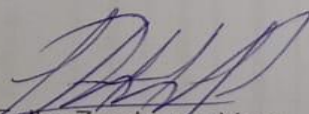
Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, cumpliendo el total de 400 horas, bajo la modalidad de proyecto técnico, cuyo tema del proyecto es "APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM ENFOCADA A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL TALLER DE MOTORES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA", el mismo que ha sido desarrollado de acuerdo a los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado corresponde al señor INTRIAGO GARCIA JESUS SANTIAGO, estudiante de la carrera de Ingeniería en Mecánica Naval, período académico 2026-1, quien se encuentra apto para la sustentación de su trabajo de titulación.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 27 de julio del 2026.

Lo certifico,



Ing. Folke Zambrano Vera
Docente Tutor
DOCENTE DE INGENIERÍA

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-01-F-010
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO.	REVISIÓN: 2
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

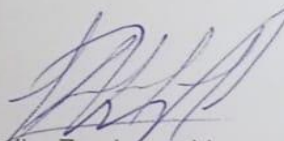
Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, cumpliendo el total de 400 horas, bajo la modalidad de proyecto técnico, cuyo tema del proyecto es "APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM ENFOCADA A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL TALLER DE MOTORES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA", el mismo que ha sido desarrollado de acuerdo a los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado, corresponde al señor ARAUZ LOOR BRYAN LEODAN, estudiante de la carrera de Ingeniería en Mecánica Naval, período académico 2026-1, quien se encuentra apto para la sustentación de su trabajo de titulación.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 27 de julio del 2026.

Lo certifico,



Ing. Folke Zambrano Vera
Docente Tutor
DOCENTE DE INGENIERÍA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

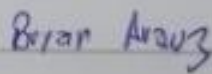
Se declara que el siguiente trabajo de titulación de modalidad "Proyecto Técnico" se desarrolló sobre la base del proyecto titulado 'APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM ENFOCADA A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL TALLER DE MOTORES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MARÍTIMA' siendo de nuestra absoluta autoría. Las definiciones y concepciones tomadas de los diferentes autores se encuentran correctamente citadas, respetando los derechos de propiedad intelectual con las respectivas citas que están incluidas en la bibliografía. El análisis de los resultados, conclusiones y recomendaciones que se narran son responsabilidad de los autores.

Por consiguiente, el autor es responsable por el contenido, fiabilidad y alcance científico del proyecto de grado que se menciona.

Manta, 30 de enero de 2026.



INTRIAGO GARCÍA JESÚS SANTIAGO



ARAÚZ LOOR BRYAN LEODAN



ING. FOLKE ZAMBRANO VERA
DOCENTE-TUTOR

Dedicatoria

Dedico este importante logro, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta. A mis padres, por su amor incondicional, sus enseñanzas y el apoyo constante que me han brindado a lo largo de mi vida. A mi hijo, quien es mi mayor motivación para seguir creciendo y superándome cada día. Y a mi mujer, por su comprensión, paciencia y compañía durante este camino. Gracias por ser los pilares fundamentales en esta etapa de mi vida y por impulsarme a alcanzar este objetivo. Este logro no es solamente mío; también les pertenece a ustedes, porque su apoyo y confianza hicieron posible que hoy pudiera cumplir esta meta.

Jesús Santiago Intriago García

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi formación personal y académica. Gracias por su amor, apoyo incondicional y confianza, que me han permitido alcanzar esta importante meta. A mi esposa, por su amor, comprensión y constante motivación para seguir adelante y cumplir mis objetivos. Asimismo, dedico este logro a todas las personas que, con sus consejos, apoyo y palabras de aliento, me acompañaron durante este proceso y contribuyeron a hacerlo posible.

Bryan Leodan Araúz Loo

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme culminar esta importante etapa de mi vida, por guiar mis pasos, brindarme sabiduría, fortaleza y perseverancia a lo largo de este camino académico. A mis padres, por su amor, apoyo incondicional y por estar presentes durante mi formación estudiantil, motivándome constantemente a seguir adelante y alcanzar esta importante meta en mi carrera universitaria. De manera especial, agradezco a mi familia, especialmente a mi mujer e hijo, quienes fueron los pilares fundamentales de este proceso. Su amor, comprensión y apoyo incondicional me dieron la fuerza necesaria para superar los desafíos y continuar avanzando hasta lograr este objetivo. Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el Ing. Folke Zambrano Vera, quien más que un tutor fue un amigo y guía durante este proceso. Gracias por sus enseñanzas, paciencia, consejos y motivación constante para culminar con éxito mi formación profesional. Asimismo, agradezco a mi amigo Carlos Pico, por su amistad, apoyo y disposición para ayudarme en todo momento. Su paciencia, colaboración y palabras de aliento fueron de gran valor durante esta etapa de mi vida. A todos quienes, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este logro, mi más profundo agradecimiento.

Jesús Santiago Intriago García

AGRADECIMIENTO

Manifiesto mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar con éxito esta importante etapa académica. A mi familia, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante durante mi formación profesional, siendo un respaldo fundamental en cada decisión y desafío enfrentado. A mis queridos docentes, por compartir sus conocimientos y experiencias, y por guiarme con paciencia, dedicación y compromiso, contribuyendo significativamente a mi aprendizaje y desarrollo académico. A todos quienes formaron parte de este proceso, mi más profundo agradecimiento por su valioso aporte al cumplimiento de esta meta

Bryan Leodan Araúz Loor

Resumen

La presente investigación integra el diseño, construcción y repotenciación de una torre de enfriamiento utilizada en el taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, con el propósito de mejorar el desempeño térmico, la confiabilidad y la eficiencia operativa del sistema.

Inicialmente, el proyecto contempló el desarrollo estructural y funcional de una torre de enfriamiento tipo lluvia y sistema forzado para motores de combustión interna, permitiendo establecer un sistema de disipación térmica adecuado para las prácticas académicas. Posteriormente, mediante la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), se realizó el análisis funcional del sistema, la identificación de modos y efectos de falla, la evaluación de criticidad y la formulación de estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo orientadas a optimizar la disponibilidad y prolongar la vida útil de los componentes críticos. La integración de ambas investigaciones fortalece la gestión técnica y operativa del sistema de enfriamiento, contribuyendo al uso eficiente de los recursos, la continuidad de las prácticas académicas y la sostenibilidad del taller de motores.

Palabras clave: torre de enfriamiento, RCM, confiabilidad, mantenimiento industrial, eficiencia térmica

Abstract

This research integrates the design, construction, and upgrading of a cooling tower used in the engine workshop of the Maritime Engineering program at Laica “Eloy Alfaro” University of Manabí, with the aim of improving the thermal performance, reliability, and operational efficiency of the system. Initially, the project involved the structural and functional development of a spray-type cooling tower with a forced-air system for internal combustion engines, establishing a suitable heat dissipation system for academic practices. Subsequently, through the application of Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology, a functional analysis of the system was performed, failure modes and effects were identified, criticality was assessed, and preventive, predictive, and corrective maintenance strategies were formulated to optimize availability and extend the useful life of critical components. The integration of both research phases strengthens the technical and operational management of the cooling system, contributing to the efficient use of resources, the continuity of academic practices, and the sustainability of the engine workshop.

Keywords: cooling tower, RCM, reliability, industrial maintenance, thermal efficiency

Tabla de contenidos

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
Dedicatoria	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
Tabla de contenidos.....	X
Índice de figuras	XIII
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Contexto y descripción del problema	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3. Objetivos de la investigación	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4 Justificación técnica, económica y ambiental.....	4
1.5. Alcance y delimitación del estudio	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Sistemas de enfriamiento industrial	7
2.2. Torres de enfriamiento: tipos y funcionamiento	8

2.3. Componentes principales de una torre de enfriamiento	10
2.4. Fundamentos del mantenimiento industrial	12
2.5. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	13
2.6. Análisis de modos y efectos de falla (AMFE)	15
2.7. Indicadores de confiabilidad y mantenimiento	17
CAPÍTULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA	20
3.1. Enfoque metodológico del proyecto técnico	20
3.2. Descripción técnica del sistema	23
3.3. Análisis funcional del sistema	27
3.4. Identificación de fallas y modos de falla	29
3.5. Evaluación de criticidad	32
3.6. Validación técnica del plan de mantenimiento	34
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
4.1. Selección de estrategias de mantenimiento	39
4.2. Elaboración del plan de mantenimiento preventivo	41
4.3. Elaboración del plan de mantenimiento predictivo	43
4.4. Plan de mantenimiento correctivo planificado	46
4.5. Plan de repotenciación de la torre de enfriamiento	48
4.6. Cronograma de mantenimiento	51
4.7. Recursos técnicos, humanos y materiales	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56

Conclusiones	56
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS.....	61

Índice de figuras

Figura 1	6
Figura 2	24
Figura 3	25
Figura 4	26
Figura 5	26

CAPÍTULO I

1.1 Contexto y descripción del problema

Las torres de enfriamiento son equipos esenciales dentro de los sistemas de refrigeración industrial, ya que permiten disipar el calor generado durante distintos procesos térmicos y mantener condiciones de operación seguras para los equipos. En instalaciones donde se utilizan motores de combustión interna, su correcto funcionamiento es clave para evitar sobrecalentamientos, pérdidas de eficiencia y fallas prematuras (Pritchard, 2014).

Sin embargo, en muchos entornos industriales y académicos, estos sistemas continúan operando bajo esquemas de mantenimiento tradicionales, basados principalmente en acciones correctivas o mantenimientos preventivos generales. Este tipo de gestión, al no considerar el comportamiento real del equipo ni su nivel de confiabilidad, suele provocar intervenciones tardías, paradas no programadas y un uso poco eficiente de los recursos disponibles (Blanchard, 2004).

En la torre de enfriamiento objeto de estudio se han identificado diversas deficiencias relacionadas con la falta de un plan de mantenimiento estructurado. Componentes como el relleno, la bomba de recirculación, el ventilador y el sistema eléctrico presentan signos de desgaste y deterioro que afectan directamente la capacidad de disipación térmica. Como consecuencia, se producen variaciones en la temperatura del agua de enfriamiento, lo que compromete el desempeño general del sistema (Hastings, 2015).

Adicionalmente, la ausencia de criterios de criticidad y de indicadores de desempeño dificulta la planificación adecuada de las actividades de mantenimiento y limita la toma de decisiones oportunas. Esta situación incrementa el riesgo de fallas

operativas y reduce la disponibilidad del sistema, impactando negativamente en la continuidad de las operaciones. (Modarres, Kaminskiy, & Krivtsov, 2016)

Ante este escenario, surge la necesidad de implementar una metodología de mantenimiento más eficiente y orientada a la confiabilidad. En este sentido, la aplicación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) se plantea como una alternativa técnica adecuada para mejorar la gestión del mantenimiento de la torre de enfriamiento, optimizar su desempeño y prolongar su vida útil, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente del sistema de refrigeración (ASHRAE, 2020).

1.2 Formulación del problema

En la carrera de Ingeniería Marítima de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí (ULEAM), el taller de motores cumple un papel fundamental en la formación práctica de los estudiantes, al permitir la aplicación de los conocimientos teóricos relacionados con los sistemas de propulsión y refrigeración de motores de combustión interna. Dentro de este entorno, la torre de enfriamiento constituye un equipo clave para garantizar condiciones adecuadas de operación durante las prácticas académicas.

No obstante, la torre de enfriamiento del taller de motores presenta un desempeño operativo irregular, principalmente debido a la ausencia de un plan de mantenimiento estructurado y orientado a la confiabilidad. Las actividades de mantenimiento realizadas se ejecutan de manera empírica o reactiva, sin un análisis técnico previo de las funciones del sistema, de los modos de falla ni de la criticidad de sus componentes, lo que dificulta la detección oportuna de fallas y reduce la disponibilidad del equipo.

Esta situación genera variaciones en la temperatura del agua de enfriamiento, incrementa el riesgo de fallas mecánicas y eléctricas y limita la continuidad de las

prácticas académicas, afectando indirectamente el proceso de enseñanza–aprendizaje en la carrera de Ingeniería Marítima. Asimismo, la falta de indicadores de desempeño y de criterios técnicos para la toma de decisiones provoca un uso ineficiente de los recursos destinados al mantenimiento del taller.

Ante este escenario, surge la necesidad de aplicar una metodología que permita gestionar el mantenimiento de manera sistemática y eficiente. En este sentido, la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), enfocada a la torre de enfriamiento del taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima, se plantea como una alternativa técnica viable para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y desempeño operativo del sistema, alineando las actividades de mantenimiento con las condiciones reales de operación y con los objetivos académicos de la institución.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en la torre de enfriamiento del taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, para mejorar su confiabilidad y desempeño operativo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual de la torre de enfriamiento del taller de motores.
- Identificar las funciones y fallas funcionales del sistema de enfriamiento.
- Analizar los modos y efectos de falla de los componentes críticos de la torre.
- Definir estrategias de mantenimiento basadas en la metodología RCM.

- Proponer un plan de mantenimiento orientado a mejorar la eficiencia y disponibilidad del sistema.

1.4 Justificación técnica, económica y ambiental

La presente investigación se justifica desde el punto de vista técnico, ya que se desarrolla bajo la modalidad de proyecto técnico establecida por la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí (ULEAM), orientada a la solución de problemas reales dentro de los entornos académicos y productivos. En este sentido, la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en la torre de enfriamiento del taller de motores responde a una necesidad concreta de mejorar la gestión del mantenimiento y el desempeño operativo del sistema de refrigeración.

Desde el ámbito académico, el proyecto técnico resulta relevante para la carrera de Ingeniería Marítima, debido a que contribuye a garantizar condiciones adecuadas para el desarrollo de las prácticas formativas de los estudiantes. Asimismo, el estudio fortalece la integración entre teoría y práctica, al aplicar herramientas de ingeniería de mantenimiento en un equipo real utilizado dentro de la institución.

Desde el punto de vista económico, la implementación de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM permite optimizar el uso de los recursos destinados al mantenimiento del taller, reduciendo costos asociados a fallas imprevistas, reparaciones correctivas y tiempos de inactividad del sistema.

Finalmente, desde una perspectiva operativa y ambiental, el adecuado mantenimiento de la torre de enfriamiento favorece el uso eficiente del agua y la energía, contribuyendo a una operación más segura, sostenible y alineada con los principios de responsabilidad ambiental promovidos por la ULEAM.

1.5. Alcance y delimitación del estudio

El presente proyecto técnico se centra en la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en la torre de enfriamiento del taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí. El estudio abarca el análisis del estado actual del sistema, la identificación de sus funciones, fallas funcionales y modos de falla, así como la definición de estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar la confiabilidad y el desempeño operativo del equipo.

Dentro del alcance de la investigación se incluye la elaboración de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM, que contempla actividades de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo planificado, además de la propuesta de acciones de mejora y repotenciación del sistema de enfriamiento. Estas acciones están orientadas a optimizar el funcionamiento de la torre y garantizar su adecuada operación durante las prácticas académicas del taller de motores.

La investigación se delimita al análisis técnico de la torre de enfriamiento existente, sin considerar el rediseño estructural completo del equipo ni la implementación de nuevos sistemas de enfriamiento distintos al actual. Asimismo, no se incluyen evaluaciones económicas a gran escala ni estudios de impacto ambiental detallados, limitándose el estudio a un análisis técnico–operativo acorde con la modalidad de proyecto técnico establecida por la ULEAM.

Figura 1
Torre de rociado vertical

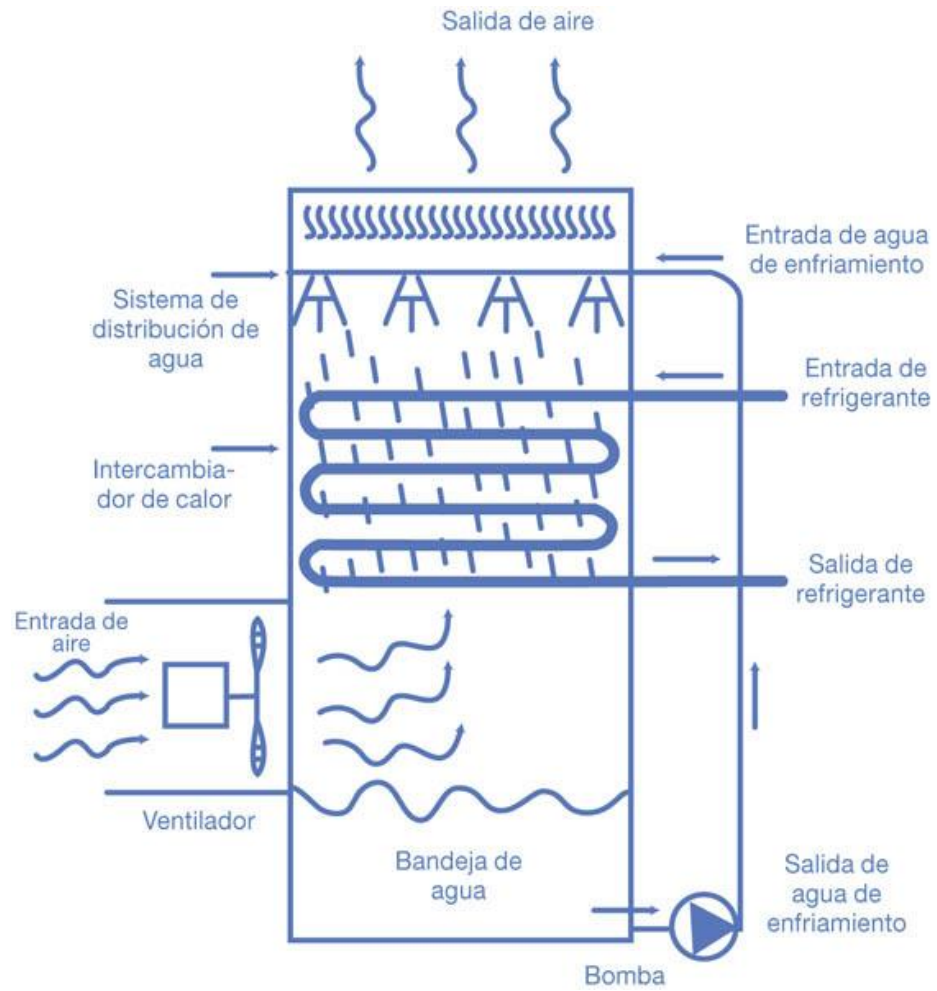


Imagen de una torre de enfriamiento vertical. Tomada de (Juan, 2016)

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas de enfriamiento industrial

Los sistemas de enfriamiento industrial cumplen una función esencial en los procesos donde se genera calor como resultado de la operación de equipos mecánicos, eléctricos o térmicos. Su principal objetivo es extraer el calor excedente y mantener las variables de operación dentro de rangos seguros, evitando el sobrecalentamiento de los componentes y garantizando la continuidad y eficiencia de los procesos productivos. (Green & Southard, 2019)

En el ámbito industrial y marítimo, estos sistemas son ampliamente utilizados en motores de combustión interna, intercambiadores de calor, compresores y equipos auxiliares, donde el control térmico resulta determinante para el correcto funcionamiento y la vida útil de los equipos. Un sistema de enfriamiento ineficiente puede provocar pérdidas de rendimiento, incremento del consumo energético y fallas prematuras, afectando directamente la confiabilidad del sistema.

Los sistemas de enfriamiento industrial pueden clasificarse, de manera general, en sistemas de enfriamiento por aire y sistemas de enfriamiento por agua. Los sistemas por aire disipan el calor directamente hacia el ambiente mediante convección forzada o natural, mientras que los sistemas por agua utilizan un fluido intermedio para absorber el calor y transferirlo posteriormente al ambiente, generalmente a través de intercambiadores de calor o torres de enfriamiento.

En los sistemas de enfriamiento por agua, el control de la temperatura depende de la correcta circulación del fluido, la eficiencia de los equipos auxiliares y el adecuado mantenimiento de los componentes involucrados. La acumulación de incrustaciones, la presencia de contaminantes o la degradación de los equipos pueden reducir

significativamente la capacidad de disipación térmica, generando condiciones de operación inestables.

Dentro de este contexto, las torres de enfriamiento representan uno de los sistemas más utilizados para la disipación del calor en aplicaciones industriales, debido a su eficiencia y simplicidad operativa. Su correcto funcionamiento está directamente relacionado con una adecuada gestión del mantenimiento, ya que cualquier falla en sus componentes puede comprometer el desempeño del sistema de enfriamiento en su conjunto. (Pritchard, 2014)

Por lo tanto, el análisis y la optimización de los sistemas de enfriamiento industrial, mediante la aplicación de metodologías de mantenimiento orientadas a la confiabilidad, resultan fundamentales para asegurar un funcionamiento eficiente, seguro y continuo de los procesos industriales y académicos, como es el caso del taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima de la ULEAM.

2.2. Torres de enfriamiento: tipos y funcionamiento

Las torres de enfriamiento son equipos fundamentales dentro de los sistemas de enfriamiento industrial, ya que permiten reducir la temperatura del agua utilizada en distintos procesos térmicos, disipando el calor hacia el ambiente. Su uso es común en motores de combustión interna, intercambiadores de calor y otros sistemas donde el control térmico es determinante para asegurar una operación segura y eficiente.

El funcionamiento de una torre de enfriamiento se basa en el contacto directo entre el agua caliente y una corriente de aire. Durante este intercambio, una fracción del agua se evapora y absorbe calor del fluido restante, lo que provoca la disminución de su temperatura. El agua enfriada es posteriormente recolectada y recirculada al sistema, permitiendo la continuidad del proceso de enfriamiento. (Pritchard, 2014)

Según su diseño, las torres de enfriamiento pueden clasificarse de diferentes maneras. De acuerdo con el método de circulación del aire, se distinguen las torres de tiro natural y las de tiro mecánico. Las primeras aprovechan el movimiento ascendente del aire caliente, mientras que las segundas utilizan ventiladores para generar el flujo de aire necesario. Dentro de las torres de tiro mecánico, existen configuraciones de tiro forzado y tiro inducido, cuya diferencia principal radica en la ubicación del ventilador y en la forma en que el aire atraviesa el sistema.

Otra clasificación importante corresponde a la disposición relativa del flujo de aire y del agua. En las torres de flujo cruzado, el aire se desplaza de manera perpendicular al flujo de agua, mientras que en las torres de contraflujo ambos flujos circulan en sentidos opuestos, lo que generalmente favorece una mayor eficiencia térmica.

El desempeño de una torre de enfriamiento está estrechamente ligado al estado de sus componentes principales, entre los que destacan el relleno, los eliminadores de gotas, el sistema de distribución de agua, el ventilador y la bomba de recirculación. El desgaste, la acumulación de incrustaciones o la falta de mantenimiento adecuado en estos elementos puede reducir significativamente la capacidad de disipación de calor del sistema. (ASHRAE, 2020)

Por esta razón, resulta indispensable considerar no solo el diseño y la selección de la torre de enfriamiento, sino también su correcta operación y mantenimiento. La aplicación de metodologías de mantenimiento orientadas a la confiabilidad, como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), permite asegurar un funcionamiento eficiente del equipo, minimizar fallas operativas y garantizar la continuidad del sistema

de enfriamiento, especialmente en entornos académicos como el taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima de la ULEAM.

2.3. Componentes principales de una torre de enfriamiento

Una torre de enfriamiento está conformada por un conjunto de componentes que trabajan de manera integrada para garantizar la correcta disipación del calor del agua proveniente del proceso térmico. El adecuado funcionamiento de cada uno de estos elementos es determinante para alcanzar el rendimiento esperado del sistema y asegurar su operación continua. (Stoecker & Jones, 1982)

La estructura de la torre constituye el soporte físico del sistema y permite alojar los distintos componentes que intervienen en el proceso de enfriamiento. Generalmente se fabrica en materiales resistentes a la corrosión y a las condiciones ambientales, ya que se encuentra expuesta de forma permanente al agua y al flujo de aire.

El sistema de distribución de agua tiene la función de garantizar una adecuada dispersión del agua caliente sobre el relleno. Una distribución uniforme favorece el contacto eficiente entre el agua y el aire, lo que se traduce en una mayor capacidad de disipación térmica. La obstrucción o el deterioro de este sistema afecta directamente el rendimiento de la torre.

El relleno, también conocido como material de empaque, es uno de los componentes más importantes de la torre de enfriamiento. Su función principal es aumentar el área de contacto entre el aire y el agua, facilitando el proceso de evaporación y transferencia de calor. La acumulación de incrustaciones, suciedad o deformaciones en el relleno reduce significativamente la eficiencia del sistema. (ASHRAE , 2020)

Los eliminadores de gotas se encargan de retener las partículas de agua arrastradas por la corriente de aire, evitando pérdidas excesivas de fluido y reduciendo el impacto ambiental. Su correcto estado contribuye a un uso más eficiente del agua y a un mejor control del proceso de enfriamiento. (Perry & Green, 2019)

El sistema de ventilación, compuesto por el ventilador y su respectivo motor eléctrico, es responsable de generar el flujo de aire necesario para el intercambio térmico. El desempeño de este conjunto depende de factores como el balanceo del ventilador, el estado de los rodamientos y la correcta alimentación eléctrica del motor.

La bomba de recirculación permite el transporte del agua enfriada desde la base de la torre hacia el sistema que requiere la disipación de calor. Un funcionamiento deficiente de la bomba puede provocar caudales inadecuados y afectar el rendimiento global del sistema.

Finalmente, el sistema eléctrico y los elementos de control garantizan la operación segura de la torre de enfriamiento, protegiendo los equipos frente a sobrecargas y permitiendo el monitoreo de variables como temperatura y nivel de agua. El adecuado mantenimiento de estos componentes es esencial para evitar paradas inesperadas y asegurar la continuidad del servicio.

El análisis detallado de cada uno de estos componentes resulta fundamental para la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, ya que permite identificar elementos críticos, evaluar posibles modos de falla y establecer estrategias de mantenimiento acordes a las condiciones reales de operación de la torre de enfriamiento del taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima de la ULEAM.

2.4. Fundamentos del mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial se define como el conjunto de actividades técnicas y de gestión orientadas a preservar los equipos e instalaciones en condiciones adecuadas de funcionamiento, con el objetivo de asegurar la continuidad operativa, la seguridad y la eficiencia de los procesos. Una gestión de mantenimiento adecuada contribuye a reducir la ocurrencia de fallas, optimizar el uso de los recursos y prolongar la vida útil de los equipos. (Blanchard, 2004)

En sus etapas iniciales, el mantenimiento industrial se centró principalmente en la corrección de fallas después de su aparición. Este enfoque correctivo, aunque necesario en determinadas circunstancias, suele generar paradas imprevistas y elevados costos asociados a reparaciones urgentes. Como respuesta a estas limitaciones, se desarrolló el mantenimiento preventivo, basado en intervenciones programadas que buscan disminuir la probabilidad de fallas durante la operación.

Posteriormente, el avance tecnológico permitió la incorporación de técnicas de monitoreo de condición, dando lugar al mantenimiento predictivo. Este tipo de mantenimiento se apoya en la medición y análisis de variables operativas para anticipar fallas y planificar acciones de intervención antes de que se produzcan daños significativos en los equipos. (Levitt, 2003)

La evolución del mantenimiento industrial ha llevado a adoptar un enfoque más integral, en el cual las decisiones no se basan únicamente en la periodicidad de las tareas, sino en el comportamiento real de los equipos y en la criticidad de sus funciones dentro del sistema. Esta visión resulta especialmente relevante en sistemas industriales conformados por múltiples componentes interrelacionados, donde una falla individual puede afectar el desempeño global del proceso.

A partir de estos principios surge la necesidad de aplicar metodologías estructuradas que permitan analizar de manera sistemática las funciones de los equipos, los modos de falla y sus consecuencias. Entre estas metodologías destaca el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el cual proporciona una base técnica para la selección de estrategias de mantenimiento acordes con las condiciones reales de operación y el nivel de riesgo asociado a cada componente. (Levitt, 2003; Mobley, 2002)

De esta forma, los fundamentos del mantenimiento industrial constituyen el soporte conceptual para la aplicación de metodologías orientadas a la confiabilidad, estableciendo el marco teórico necesario para el desarrollo de análisis más detallados y su posterior aplicación práctica en sistemas industriales.

2.5. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, conocido como RCM (Reliability Centered Maintenance), es una metodología de gestión del mantenimiento desarrollada con el objetivo de asegurar que los sistemas continúen cumpliendo sus funciones esenciales dentro de un contexto operativo determinado. Este enfoque fue formalizado inicialmente en la industria aeronáutica y posteriormente adaptado a diversos sectores industriales debido a sus resultados en términos de confiabilidad y optimización de recursos (Moubray, 1997).

A diferencia de los enfoques tradicionales, el RCM no se basa únicamente en la programación periódica de tareas de mantenimiento, sino en el análisis detallado del comportamiento funcional de los equipos. Según Moubray (1997), la metodología RCM se fundamenta en responder una serie de preguntas clave relacionadas con las funciones del sistema, las fallas funcionales, los modos de falla, las causas y las consecuencias

asociadas a dichas fallas. Este análisis permite comprender de manera estructurada cómo y por qué falla un sistema. (Smith & Hinchcliffe, 2004)

Uno de los principios centrales del RCM es que el mantenimiento debe enfocarse en preservar las funciones del equipo y no únicamente en evitar fallas físicas. En este sentido, se reconoce que un componente puede encontrarse en buen estado físico y, aun así, no cumplir adecuadamente su función dentro del sistema. Esta visión funcional permite una evaluación más precisa del desempeño real del equipo (Nowlan & Heap, 1978).

El análisis de las consecuencias de las fallas constituye otro elemento clave dentro de la metodología RCM. Las fallas pueden tener distintos impactos, como riesgos para la seguridad, afectación a la operación del sistema, pérdidas económicas o impactos ambientales. De acuerdo con Smith y Hinchcliffe (2004), la clasificación de las consecuencias de falla permite establecer prioridades y seleccionar estrategias de mantenimiento acordes con el nivel de riesgo asociado a cada componente.

El RCM integra de manera racional los distintos tipos de mantenimiento existentes. Las tareas preventivas se aplican cuando es posible prevenir la falla mediante intervenciones programadas; las tareas predictivas se emplean cuando el monitoreo de condición permite detectar el deterioro antes de que ocurra la falla; y el mantenimiento correctivo planificado se considera cuando no existe una estrategia preventiva o predictiva técnicamente viable o económicamente justificable (Mobley, 2002).

La aplicación del RCM resulta especialmente adecuada en sistemas industriales complejos, donde múltiples componentes interactúan y una falla localizada puede comprometer el desempeño global del sistema. En estos casos, el RCM permite

identificar los componentes críticos y concentrar los esfuerzos de mantenimiento en aquellos elementos cuya falla genera mayores consecuencias operativas (Dhillon, 2006).

En términos de gestión, la implementación de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM contribuye a mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, reducir fallas no programadas y optimizar el uso de los recursos destinados al mantenimiento. Asimismo, proporciona una base técnica sólida para la toma de decisiones, alineando las actividades de mantenimiento con los objetivos operativos del sistema (Wireman, 2014).

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad se presenta como una metodología que integra los principios del mantenimiento industrial con un enfoque sistemático basado en el análisis de funciones, fallas y consecuencias. Su aplicación permite estructurar la gestión del mantenimiento de manera coherente con las condiciones reales de operación de los sistemas, facilitando la selección de estrategias técnicas orientadas a mejorar el desempeño y la confiabilidad de los equipos. Estos fundamentos metodológicos sirven como base para el desarrollo de estudios aplicados en sistemas industriales, en los cuales resulta necesario adaptar la teoría a las características específicas del equipo analizado.

2.6. Análisis de modos y efectos de falla (AMFE)

El Análisis de Modos y Efectos de Falla, conocido como AMFE o FMEA por sus siglas en inglés (Failure Modes and Effects Analysis), es una herramienta sistemática utilizada para identificar y evaluar los posibles modos de falla de un sistema, sus causas y los efectos que dichas fallas generan sobre el funcionamiento del equipo. Esta técnica se emplea ampliamente en el ámbito industrial como un medio para anticipar problemas,

mejorar la confiabilidad y apoyar la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento (Stamatis, 2003).

El AMFE se basa en el estudio detallado de cada componente que conforma un sistema, analizando la forma en que puede fallar y las consecuencias que dicha falla tendría sobre la operación. Según Smith y Hinchcliffe (2004), este análisis permite comprender la relación entre las fallas individuales de los componentes y el comportamiento global del sistema, lo cual resulta especialmente importante en equipos donde la interacción entre elementos es determinante para el desempeño operativo.

Uno de los aspectos centrales del AMFE es la identificación de los modos de falla, entendidos como las maneras específicas en que un componente puede dejar de cumplir su función. Estos modos de falla pueden estar asociados a desgaste, fatiga, corrosión, errores de operación o deficiencias en el mantenimiento. El análisis de las causas que originan estos modos de falla proporciona información relevante para establecer acciones preventivas y correctivas más efectivas (Mobley, 2002).

El estudio de los efectos de falla permite evaluar las consecuencias que una falla puede generar a nivel del componente, del sistema y del proceso en el que se encuentra integrado. Estas consecuencias pueden manifestarse como pérdidas de eficiencia, interrupciones operativas, daños a otros componentes o riesgos para la seguridad. De acuerdo con Dhillon (2006), la evaluación de los efectos de falla constituye un elemento clave para determinar la severidad de cada modo de falla y su impacto potencial.

En el contexto del mantenimiento industrial, el AMFE se utiliza como una herramienta complementaria a metodologías orientadas a la confiabilidad, como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Moubray (1997) señala que el AMFE facilita la identificación de los modos de falla dominantes y apoya la selección de estrategias de

mantenimiento acordes con el comportamiento real del equipo. De esta manera, el análisis no se limita a describir fallas, sino que contribuye a estructurar planes de mantenimiento más eficientes.

El AMFE puede aplicarse tanto en la etapa de diseño de un sistema como durante su operación. En sistemas existentes, su aplicación permite evaluar el estado actual de los componentes, identificar debilidades en la gestión del mantenimiento y priorizar acciones de mejora. Esta característica lo convierte en una herramienta especialmente útil en estudios técnicos orientados a la optimización del mantenimiento de equipos industriales (Wireman, 2014).

Asimismo, el AMFE proporciona una base técnica para la evaluación de la criticidad de los componentes, al relacionar la probabilidad de ocurrencia de una falla con la severidad de sus efectos. Esta información resulta fundamental para establecer prioridades en la planificación del mantenimiento y asignar recursos de manera más eficiente, evitando intervenciones innecesarias en componentes de bajo impacto operativo.

Desde una perspectiva metodológica, el Análisis de Modos y Efectos de Falla constituye un elemento clave dentro del enfoque RCM, ya que permite estructurar de forma ordenada la información relacionada con las fallas y su impacto en el sistema. Su aplicación facilita el desarrollo de análisis funcionales y la posterior definición de tareas de mantenimiento basadas en criterios técnicos, adaptables a las características específicas del equipo analizado.

2.7. Indicadores de confiabilidad y mantenimiento

Los indicadores de confiabilidad y mantenimiento constituyen herramientas fundamentales para evaluar el desempeño de los equipos industriales y la efectividad de

las estrategias de mantenimiento implementadas. Estos indicadores permiten cuantificar el comportamiento operativo de los sistemas, facilitando el análisis de fallas, la disponibilidad de los equipos y la eficiencia de las acciones de mantenimiento, aspectos clave en la gestión moderna de activos industriales (Mobley, 2002).

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo o sistema cumpla su función requerida durante un período determinado y bajo condiciones específicas de operación. Desde el punto de vista del mantenimiento, la confiabilidad se relaciona directamente con la frecuencia de fallas y el tiempo de operación libre de interrupciones. Según Ebeling (2010), el análisis de la confiabilidad permite identificar tendencias de falla y evaluar el impacto de las estrategias de mantenimiento sobre el desempeño del sistema.

Entre los indicadores más utilizados se encuentra el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF, por sus siglas en inglés), el cual representa el promedio de tiempo de operación de un equipo antes de que ocurra una falla. Este indicador es ampliamente empleado para evaluar la confiabilidad de equipos reparables y permite estimar la frecuencia con la que se presentan fallas en un sistema. Un incremento del MTBF suele asociarse con mejoras en las prácticas de mantenimiento y en las condiciones de operación (Smith y Hinchcliffe, 2004).

Otro indicador relevante es el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), que expresa el tiempo promedio requerido para restaurar un equipo a condiciones operativas después de una falla. Este indicador refleja la eficiencia de las actividades de mantenimiento correctivo, así como la disponibilidad de recursos técnicos, repuestos y personal capacitado. De acuerdo con Wireman (2014), la reducción del MTTR contribuye directamente a mejorar la disponibilidad operativa de los equipos.

La disponibilidad es un indicador que integra la confiabilidad y la mantenibilidad del sistema, y se define como la proporción de tiempo en la que un equipo se encuentra disponible para operar respecto al tiempo total considerado. Este indicador resulta especialmente útil para evaluar el impacto global de las fallas y de las actividades de mantenimiento sobre la operación del sistema. Su análisis permite identificar cuellos de botella y componentes críticos dentro del proceso productivo (Dhillon, 2006).

Además de estos indicadores clásicos, en la gestión del mantenimiento se emplean otros parámetros relacionados con la eficiencia del mantenimiento, tales como el índice de cumplimiento del mantenimiento preventivo, la relación entre mantenimiento correctivo y preventivo, y los costos asociados al mantenimiento. Estos indicadores permiten evaluar no solo el desempeño técnico del equipo, sino también la efectividad de la planificación y gestión del mantenimiento (Mobley, 2002).

En el marco de metodologías orientadas a la confiabilidad, como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, los indicadores de confiabilidad y mantenimiento adquieren un papel relevante al proporcionar información objetiva para la toma de decisiones. El análisis de estos indicadores permite validar las estrategias de mantenimiento seleccionadas, así como identificar oportunidades de mejora en función del comportamiento real del sistema durante su operación.

Desde una perspectiva técnica, el uso sistemático de indicadores de confiabilidad y mantenimiento facilita el seguimiento del desempeño de los equipos a lo largo del tiempo, permitiendo comparar escenarios antes y después de la implementación de estrategias de mantenimiento.

CAPÍTULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

3.1. Enfoque metodológico del proyecto técnico

El presente trabajo se desarrolla bajo la modalidad de proyecto técnico de aplicación, orientado a la mejora del desempeño operativo de un sistema industrial existente mediante la implementación estructurada de una metodología de mantenimiento. Este tipo de proyecto se distingue por integrar fundamentos teóricos consolidados con procedimientos técnicos específicos, cuyo propósito es intervenir de manera directa sobre un equipo real, optimizando su confiabilidad, disponibilidad y condiciones de operación. En este contexto, la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se plantea como eje metodológico para el análisis y reformulación de las prácticas de mantenimiento asociadas a la torre de enfriamiento objeto de estudio.

Desde una perspectiva metodológica, el desarrollo del proyecto adopta un enfoque sistémico, entendiendo el equipo como un conjunto organizado de componentes interdependientes que cumplen funciones dentro de límites operativos definidos. La ingeniería de mantenimiento moderna reconoce que los sistemas industriales no deben evaluarse únicamente por la condición física de sus componentes, sino por su capacidad de cumplir funciones bajo condiciones específicas de servicio (Nowlan & Heap, 1978). En consecuencia, el análisis parte de la identificación clara de las funciones principales y secundarias del sistema, estableciendo el marco sobre el cual se evaluarán sus posibles fallas.

El enfoque metodológico se sustenta en los principios establecidos por Moubray (1997), quien plantea que el RCM debe estructurarse a partir de siete preguntas fundamentales relacionadas con las funciones del sistema, las fallas funcionales, los modos de falla y sus consecuencias. Este procedimiento permite transformar el mantenimiento tradicional, frecuentemente basado en rutinas periódicas generalizadas, en un proceso racional orientado por criterios técnicos y análisis de riesgo. La adopción de este esquema metodológico implica la recopilación y organización sistemática de información técnica, registros operativos y datos históricos de fallas, elementos esenciales para la toma de decisiones fundamentadas.

El desarrollo del proyecto contempla una secuencia metodológica estructurada en fases técnicas claramente definidas. En primera instancia, se realiza la delimitación del sistema, estableciendo sus fronteras físicas y funcionales, así como sus condiciones normales de operación. Posteriormente, se procede a la descomposición del sistema en subsistemas y componentes, facilitando su análisis detallado. Esta etapa resulta clave en la aplicación del RCM, ya que permite identificar con precisión los elementos cuya falla puede comprometer el desempeño global del equipo (Smith & Hinchcliffe, 2004).

Una fase fundamental del enfoque metodológico es la aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMFE), herramienta reconocida en la literatura técnica como un instrumento eficaz para anticipar y evaluar posibles escenarios de falla (Stamatis, 2003). El AMFE permite identificar modos de falla específicos, analizar sus causas probables y determinar los efectos asociados, proporcionando una base estructurada para la evaluación de criticidad. Esta evaluación considera la severidad de la falla, su probabilidad de ocurrencia y la capacidad de detección, elementos que permiten establecer prioridades técnicas dentro del plan de mantenimiento.

El enfoque metodológico también incorpora el análisis de indicadores de desempeño relacionados con la confiabilidad y la mantenibilidad del sistema. Indicadores como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) y la disponibilidad operativa constituyen parámetros cuantitativos ampliamente utilizados en la gestión de activos industriales (Mobley, 2002; Dhillon, 2006). La integración de estos indicadores dentro del proceso metodológico permite evaluar el comportamiento real del sistema y sustentar técnicamente la selección de tareas de mantenimiento.

Desde el punto de vista de la gestión de activos, la aplicación del RCM se alinea con los principios establecidos en normas internacionales como la ISO 55000, que promueve una administración sistemática de los activos físicos orientada a maximizar su valor y desempeño a lo largo del ciclo de vida. En este sentido, el enfoque metodológico adoptado no solo busca reducir fallas o intervenciones correctivas, sino también optimizar los recursos técnicos y económicos asociados al mantenimiento.

El carácter técnico del proyecto implica que la metodología no se limita a un análisis conceptual, sino que requiere su adaptación a las condiciones reales de operación del sistema estudiado. Factores como la carga térmica, las condiciones ambientales, la frecuencia de uso y el estado actual de los componentes influyen directamente en la definición de las estrategias de mantenimiento. Por ello, el enfoque metodológico contempla la evaluación de estas variables como parte integral del proceso de análisis.

La estructuración del proyecto bajo este enfoque metodológico garantiza coherencia entre los fundamentos teóricos desarrollados en el capítulo anterior y su aplicación práctica en el sistema objeto de estudio. La integración de herramientas

analíticas, indicadores cuantitativos y criterios de criticidad permite desarrollar una propuesta técnica sustentada en principios de confiabilidad y gestión del mantenimiento, adaptada a las características específicas del equipo intervenido.

3.2. Descripción técnica del sistema

La torre de enfriamiento objeto de estudio constituye un sistema auxiliar destinado a la disipación de calor generado durante la operación de equipos térmicos en el taller de motores. Su función principal consiste en reducir la temperatura del agua utilizada en procesos de intercambio térmico, permitiendo su recirculación dentro del sistema y garantizando condiciones operativas estables.

Desde el punto de vista constructivo, la torre corresponde a un sistema de enfriamiento por evaporación, principio ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a su eficiencia energética y capacidad de disipación térmica (ASHRAE, 2016). El funcionamiento se basa en el contacto directo entre el agua caliente proveniente del proceso y una corriente de aire inducida mecánicamente, produciéndose la transferencia de calor mediante evaporación parcial del fluido. Este fenómeno permite disminuir la temperatura del agua hasta valores cercanos a la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

El sistema está conformado por un conjunto estructural que incluye carcasa externa, relleno o material de empaque, sistema de distribución de agua, ventilador axial (blower), motor eléctrico, bandeja colectora y sistema de tuberías de entrada y salida. Cada uno de estos componentes cumple una función específica dentro del proceso de enfriamiento y su desempeño influye directamente en la eficiencia térmica global del equipo.

Figura 2

Torre de rociado ubicada en las instalaciones de la ULEAM



Torre de rociado ubicada en las instalaciones de la ULEAM. Elaborado por los autores.

El ventilador axial, accionado por un motor eléctrico, genera el flujo de aire necesario para favorecer la evaporación del agua. La eficiencia de este componente depende de factores como la velocidad de rotación, el estado de las aspas y la correcta alineación del conjunto motriz. Fallas en este subsistema pueden provocar disminución del flujo de aire, aumento de la temperatura del agua de salida y sobrecarga térmica en el proceso asociado (Stoecker & Jones, 1982).

Figura 3

Ventilador axila (blower) de la torre de enfriamiento.



Imagen de un ventilador axial (blower). Elaborado por los autores.

El sistema de distribución de agua tiene la función de dispersar uniformemente el fluido caliente sobre el relleno, maximizando la superficie de contacto aire-agua. Una distribución deficiente puede generar zonas de baja eficiencia térmica y acumulación localizada de incrustaciones. El material de relleno, por su parte, incrementa el área de intercambio térmico, favoreciendo la transferencia de calor y mejorando el rendimiento del sistema.

Figura 4

Sistema de distribución de agua (rociadores)



Sistema de distribución de agua (rociadores) de la torre de enfriamiento. Elaborado por los autores.

La bandeja colectora ubicada en la parte inferior de la torre almacena el agua enfriada antes de su recirculación. Este elemento debe mantener niveles adecuados para evitar cavitación en la bomba asociada al sistema. Asimismo, la acumulación de sedimentos o contaminantes puede afectar la calidad del agua y acelerar procesos de corrosión en componentes metálicos.

Figura 5

Bandeja recolectora.



Bandeja recolectora de la torre de enfriamiento. Elaborado por los autores.

Desde el punto de vista operativo, el desempeño de la torre depende de variables como temperatura de entrada del agua, temperatura ambiente, humedad relativa, caudal de circulación y condiciones de mantenimiento. La eficiencia térmica se evalúa comúnmente a través del rango de enfriamiento y la aproximación térmica, parámetros utilizados en ingeniería de refrigeración y climatización para determinar el comportamiento del sistema (ASHRAE, 2016).

En términos estructurales, el equipo presenta características propias de sistemas expuestos a condiciones ambientales variables, lo que implica riesgos asociados a corrosión, incrustaciones, desgaste mecánico y acumulación de residuos. Estos factores influyen directamente en la confiabilidad del sistema y justifican la necesidad de una estrategia de mantenimiento estructurada.

La caracterización técnica realizada en esta sección establece la base para el análisis funcional del sistema y la posterior identificación de fallas dentro del esquema metodológico RCM. La comprensión detallada de los componentes, su interacción y condiciones de operación permite delimitar con precisión el alcance del análisis de confiabilidad que se desarrollará en los apartados siguientes.

3.3. Análisis funcional del sistema

El análisis funcional constituye la primera etapa formal dentro de la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), ya que permite definir con precisión qué se espera que el sistema haga y bajo qué condiciones debe hacerlo. Según Nowlan y Heap (1978), el mantenimiento debe orientarse a preservar las funciones del equipo, por lo que resulta indispensable establecerlas de manera clara antes de identificar posibles fallas. En este sentido, el análisis funcional no se limita a describir

componentes, sino que se enfoca en el propósito operativo del sistema dentro de su contexto de servicio.

La función principal de la torre de enfriamiento analizada consiste en disipar el calor contenido en el agua proveniente del proceso térmico del taller de motores, reduciendo su temperatura hasta un valor que permita su recirculación segura y eficiente. Esta función debe cumplirse dentro de parámetros operativos definidos, tales como caudal nominal, temperatura de entrada y salida, condiciones ambientales y continuidad del servicio. El incumplimiento de esta función puede afectar directamente el desempeño del sistema térmico asociado.

Además de la función principal, el sistema presenta funciones secundarias o de soporte, necesarias para garantizar la estabilidad y seguridad de la operación. Entre estas se incluyen mantener una distribución uniforme del agua sobre el relleno, asegurar un flujo de aire constante mediante el ventilador, evitar pérdidas excesivas de agua por arrastre y mantener la integridad estructural del equipo frente a condiciones ambientales variables. Estas funciones complementarias contribuyen al cumplimiento eficiente de la función primaria y deben considerarse dentro del análisis RCM (Moubray, 1997).

El análisis funcional también implica la definición de los límites físicos y operativos del sistema. En este caso, los límites incluyen las tuberías de entrada y salida de agua, el sistema de ventilación mecánica, la bandeja colectora y la estructura de soporte. Establecer estos límites permite delimitar el alcance del estudio y evitar ambigüedades en la identificación de fallas. Smith y Hinchcliffe (2004) señalan que una definición clara de fronteras funcionales es esencial para garantizar la coherencia del análisis de confiabilidad.

Una vez definidas las funciones, se procede a identificar las fallas funcionales, entendidas como la incapacidad del sistema para cumplir total o parcialmente sus funciones dentro de los parámetros establecidos. En el caso de la torre de enfriamiento, una falla funcional puede manifestarse como una reducción insuficiente de la temperatura del agua, disminución del caudal de circulación, interrupción del flujo de aire o presencia de fugas significativas. Estas condiciones representan desviaciones respecto al desempeño esperado del sistema.

El análisis funcional permite también reconocer condiciones de operación anormales que, sin constituir una falla total, pueden afectar progresivamente la eficiencia del sistema. La acumulación de incrustaciones en el relleno, el desgaste de aspas del ventilador o la obstrucción en el sistema de distribución de agua pueden provocar pérdidas de rendimiento que, de no ser atendidas, derivan en fallas mayores. Este enfoque preventivo se alinea con los principios de confiabilidad operacional descritos por Dhillon (2006).

La estructuración del análisis funcional facilita la transición hacia la identificación de modos de falla específicos en cada componente. Al establecer qué funciones deben preservarse, se genera un marco de referencia técnico que permite evaluar de manera objetiva las consecuencias asociadas a cada posible evento de falla. Esta lógica constituye la base sobre la cual se desarrollará el análisis detallado de modos y efectos de falla en el apartado siguiente.

3.4. Identificación de fallas y modos de falla

La identificación de fallas y modos de falla constituye una etapa central dentro de la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, ya que permite analizar

de manera estructurada cómo y por qué un sistema puede dejar de cumplir sus funciones establecidas. De acuerdo con Moubray (1997), una vez definidas las funciones y fallas funcionales, el siguiente paso consiste en determinar los modos de falla específicos que pueden originar dichas desviaciones en el desempeño del sistema.

En términos técnicos, una falla funcional se entiende como la incapacidad del sistema para cumplir una función dentro de los parámetros operativos definidos, mientras que el modo de falla describe la forma concreta en que dicha falla puede manifestarse. Esta diferenciación es fundamental en el enfoque RCM, ya que permite pasar de una visión general del problema a un análisis detallado de los mecanismos físicos o mecánicos que lo originan (Nowlan & Heap, 1978).

En el caso de la torre de enfriamiento analizada, la identificación de fallas parte de las funciones previamente establecidas. Una falla funcional asociada a la función principal puede consistir en la incapacidad de reducir la temperatura del agua hasta el valor requerido para su recirculación segura. A partir de esta falla funcional, pueden identificarse diversos modos de falla, tales como disminución del flujo de aire por desgaste o desbalance del ventilador, obstrucción del material de relleno por incrustaciones, distribución irregular del agua o fallas en el motor eléctrico.

El análisis se realiza mediante la descomposición del sistema en sus principales subsistemas: sistema de ventilación, sistema de distribución de agua, estructura y carcasa, bandeja colectora y conexiones hidráulicas. Para cada componente se identifican posibles modos de falla considerando factores como desgaste mecánico, corrosión, acumulación de sedimentos, fatiga de materiales y fallas eléctricas. Este procedimiento coincide con lo descrito por Stamatis (2003), quien señala que el análisis detallado por componente facilita la identificación sistemática de escenarios de falla.

La evaluación de las causas asociadas a cada modo de falla constituye un elemento complementario del análisis. Las causas pueden estar relacionadas con condiciones de operación inadecuadas, mantenimiento insuficiente, variaciones ambientales o envejecimiento natural de los materiales. Mobley (2002) sostiene que comprender las causas raíz de las fallas permite orientar de manera más efectiva las estrategias de mantenimiento, evitando intervenciones superficiales que no solucionan el origen del problema.

Asimismo, la identificación de los efectos de cada modo de falla permite determinar su impacto sobre el sistema. En una torre de enfriamiento, los efectos pueden manifestarse como aumento de la temperatura de salida del agua, incremento del consumo energético, vibraciones excesivas, fugas o incluso interrupción total del servicio. Dhillon (2006) señala que la evaluación técnica de los efectos resulta esencial para establecer la severidad de la falla y priorizar acciones correctivas o preventivas.

La aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMFE) dentro de esta etapa proporciona una estructura organizada para registrar la información técnica recopilada. Esta herramienta permite relacionar cada función con su posible falla funcional, identificar modos de falla asociados, determinar causas probables y describir efectos observables. La sistematización de esta información facilita la posterior evaluación de criticidad y la selección de tareas de mantenimiento técnicamente justificadas (Smith & Hinchcliffe, 2004).

Es importante señalar que el proceso de identificación de fallas no se limita a eventos evidentes o de ocurrencia frecuente. También se consideran fallas potenciales que, aunque poco probables, puedan generar consecuencias significativas en términos de seguridad, operación o costos. Este enfoque preventivo responde al principio

fundamental del RCM de analizar las consecuencias antes de definir la estrategia de mantenimiento.

La estructuración técnica de los modos de falla identificados en la torre de enfriamiento permite establecer una base sólida para el análisis de criticidad que se desarrollará en el siguiente apartado, en el cual se evaluará la importancia relativa de cada componente dentro del sistema.

3.5. Evaluación de criticidad

La evaluación de criticidad constituye una etapa fundamental dentro de la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, ya que permite establecer prioridades técnicas en función del impacto que puede generar la falla de cada componente sobre el sistema. Esta etapa no se limita a identificar qué elementos fallan con mayor frecuencia, sino que analiza las consecuencias asociadas a dichas fallas, considerando criterios de severidad, probabilidad de ocurrencia y capacidad de detección (Moubray, 1997).

En términos metodológicos, la criticidad se determina a partir de la información obtenida en el análisis de modos y efectos de falla (AMFE). Cada modo de falla identificado es evaluado bajo parámetros que permiten estimar su nivel de riesgo relativo dentro del sistema. De acuerdo con Stamatis (2003), la combinación estructurada de estos factores facilita la jerarquización de los componentes y orienta la asignación eficiente de recursos de mantenimiento.

Uno de los criterios principales en la evaluación de criticidad es la severidad, la cual representa el grado de impacto que tendría la ocurrencia de una falla sobre la operación del sistema. En el caso de la torre de enfriamiento, una falla que impida la

disipación adecuada del calor puede comprometer el funcionamiento de los equipos asociados, generando sobrecalentamientos o interrupciones operativas. La severidad se relaciona directamente con las consecuencias técnicas, económicas y, en algunos casos, de seguridad que puedan derivarse del evento de falla (Dhillon, 2006).

El segundo criterio corresponde a la probabilidad de ocurrencia, que estima la frecuencia con la que un modo de falla puede presentarse durante la operación normal del sistema. Esta evaluación puede basarse en registros históricos de mantenimiento, experiencia operativa o análisis técnico del comportamiento de los componentes. Smith y Hinchcliffe (2004) señalan que la probabilidad debe analizarse considerando las condiciones reales de servicio y no únicamente supuestos teóricos, ya que factores ambientales y de carga influyen significativamente en la tasa de fallas.

El tercer criterio está relacionado con la detectabilidad, entendida como la capacidad de identificar una falla o su condición precursora antes de que genere consecuencias graves. Un componente cuya falla no puede ser detectada fácilmente mediante inspecciones o monitoreo presenta un nivel de riesgo mayor, aun cuando su probabilidad de ocurrencia sea moderada. Mobley (2002) destaca que la incorporación de técnicas de monitoreo de condición mejora la detectabilidad y reduce la incertidumbre en la gestión del mantenimiento.

La combinación de estos tres criterios permite establecer un índice de criticidad o nivel de prioridad, el cual sirve como base para definir la estrategia de mantenimiento más adecuada para cada componente. Los elementos clasificados como críticos requieren intervenciones preventivas o predictivas más rigurosas, mientras que aquellos con baja criticidad pueden gestionarse mediante mantenimiento correctivo planificado,

siempre que las consecuencias de falla sean aceptables dentro del contexto operativo (Moubray, 1997).

En la torre de enfriamiento analizada, la evaluación de criticidad permite identificar componentes cuya falla tendría un impacto significativo en la eficiencia térmica del sistema, tales como el motor del ventilador, el sistema de distribución de agua y el material de relleno. Estos elementos influyen directamente en el intercambio térmico y, por lo tanto, en la capacidad del sistema para cumplir su función principal. La priorización técnica de estos componentes facilita la elaboración de un plan de mantenimiento enfocado en la preservación de la confiabilidad operacional.

La aplicación estructurada de la evaluación de criticidad dentro del proyecto técnico contribuye a transformar el mantenimiento en un proceso basado en análisis y datos, alejándolo de decisiones intuitivas o intervenciones generalizadas. Este enfoque permite establecer una relación coherente entre la importancia funcional de cada componente y el nivel de atención que debe recibir dentro del plan de mantenimiento propuesto.

La información derivada de esta etapa proporciona los criterios necesarios para la selección de tareas de mantenimiento técnicamente justificadas, las cuales se desarrollarán en el apartado siguiente como parte de la estructuración del plan de mantenimiento basado en RCM.

3.6. Validación técnica del plan de mantenimiento

La formulación del plan de mantenimiento basado en la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) constituye la etapa donde el análisis técnico desarrollado previamente se transforma en acciones concretas orientadas a

preservar las funciones del sistema. Esta fase no se limita a establecer rutinas periódicas, sino que implica la selección estructurada de tareas técnicamente justificadas en función de las consecuencias de falla identificadas (Moubray, 1997).

El principio fundamental del RCM establece que el mantenimiento debe orientarse a gestionar las consecuencias de las fallas y no únicamente a prevenirlas indiscriminadamente. Nowlan y Heap (1978) demostraron que no todos los componentes requieren intervenciones periódicas programadas, y que en muchos casos la estrategia más adecuada depende del comportamiento real del modo de falla y del impacto que genera sobre la operación. En este sentido, la estructuración del plan parte directamente de la evaluación de criticidad realizada en el apartado anterior.

El proceso de formulación contempla la clasificación de las tareas de mantenimiento en función de su naturaleza técnica. Entre las principales categorías se encuentran el mantenimiento preventivo programado, el mantenimiento predictivo basado en condición, el mantenimiento correctivo planificado y, cuando corresponda, la adopción de rediseños o mejoras técnicas. Smith y Hinchcliffe (2004) señalan que la correcta selección entre estas alternativas constituye el núcleo metodológico del RCM, ya que permite optimizar recursos y maximizar la confiabilidad del sistema.

Para los componentes clasificados como críticos, cuya falla genera consecuencias operativas significativas, se establecen tareas preventivas o predictivas orientadas a reducir la probabilidad de ocurrencia del modo de falla identificado. En el caso de la torre de enfriamiento, esto puede incluir inspecciones periódicas del sistema de ventilación, verificación de alineación y vibraciones del motor, limpieza programada del material de relleno y control del sistema de distribución de agua. Estas actividades

se fundamentan en el principio de detección temprana del deterioro, ampliamente respaldado por la literatura de mantenimiento predictivo (Mobley, 2002).

Cuando los modos de falla presentan patrones de desgaste progresivo, el mantenimiento basado en condición resulta técnicamente viable. Esta estrategia implica monitorear parámetros como vibraciones, temperatura del motor, consumo de corriente eléctrica o acumulación de incrustaciones. Según Dhillon (2006), el monitoreo de condición permite intervenir el equipo en el momento óptimo, evitando tanto fallas inesperadas como intervenciones prematuras.

En aquellos casos donde no existe una tarea preventiva técnicamente efectiva o económicamente justificable, el RCM contempla la posibilidad de aceptar la falla y gestionarla mediante mantenimiento correctivo planificado. Moubray (1997) sostiene que esta decisión es válida cuando las consecuencias de la falla son tolerables y no comprometen la seguridad ni la operación crítica del sistema. Este enfoque evita la sobrecarga de tareas innecesarias dentro del plan de mantenimiento.

La estructuración del plan también considera la definición de frecuencias de intervención, las cuales deben establecerse en función del comportamiento esperado del componente, condiciones ambientales y nivel de exigencia operativa. La determinación de intervalos no debe basarse exclusivamente en recomendaciones genéricas del fabricante, sino en el análisis técnico derivado del AMFE y la evaluación de criticidad (Smith & Hinchcliffe, 2004).

Desde el punto de vista documental, el plan de mantenimiento debe organizarse de manera sistemática, especificando para cada componente: función asociada, modo de falla identificado, tarea de mantenimiento seleccionada, frecuencia de ejecución,

responsable técnico y recursos necesarios. Esta estructuración facilita la trazabilidad de las decisiones adoptadas y permite realizar ajustes futuros en función del comportamiento real del sistema.

La implementación del plan requiere además la definición de indicadores de seguimiento, tales como MTBF, MTTR y disponibilidad operativa, los cuales permiten evaluar el desempeño del sistema posterior a la aplicación del RCM (Mobley, 2002). El análisis continuo de estos indicadores proporciona retroalimentación técnica para ajustar frecuencias, redefinir tareas o incorporar mejoras adicionales.

En el contexto de la torre de enfriamiento analizada, la estructuración del plan basado en RCM permite concentrar los esfuerzos de mantenimiento en los elementos que influyen directamente en la eficiencia térmica y confiabilidad del sistema. La priorización técnica de actividades reduce la probabilidad de fallas imprevistas, mejora la estabilidad operativa y contribuye a la optimización del consumo energético asociado al funcionamiento del equipo.

La formulación del plan de mantenimiento bajo el enfoque RCM integra de manera coherente los resultados del análisis funcional, la identificación de modos de falla y la evaluación de criticidad, consolidando un esquema de gestión técnica orientado a la preservación de las funciones del sistema dentro de su contexto operativo.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo desarrolla la aplicación práctica de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) sobre la torre de enfriamiento utilizada en el taller de motores de la carrera de Ingeniería Marítima. A partir del análisis funcional, la identificación de modos de falla y la evaluación de criticidad desarrollados en el capítulo anterior, se establecen las estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa del sistema.

La aplicación del enfoque RCM permite estructurar un conjunto de actividades técnicas enfocadas en preservar las funciones principales de la torre de enfriamiento dentro de sus condiciones normales de operación. En este contexto, el análisis realizado considera las condiciones actuales del equipo, los componentes de mayor impacto operativo y las consecuencias asociadas a posibles fallas que puedan afectar el desempeño térmico del sistema.

En este capítulo se presentan las estrategias de mantenimiento seleccionadas para cada subsistema crítico de la torre de enfriamiento, integrando acciones preventivas, predictivas y correctivas planificadas. Asimismo, se desarrolla una propuesta de repotenciación orientada a optimizar el funcionamiento del sistema mediante mejoras técnicas aplicables a sus componentes estructurales, mecánicos e hidráulicos.

De igual manera, se establece un cronograma de mantenimiento y la identificación de los recursos técnicos, humanos y materiales necesarios para la implementación del plan propuesto. La estructuración de estas actividades busca garantizar una gestión de mantenimiento técnicamente sustentada, alineada con los principios de confiabilidad operacional y orientada a prolongar la vida útil de la torre de

enfriamiento dentro del entorno académico y operativo del taller de motores. (Moubray, 1997)

4.1. Selección de estrategias de mantenimiento

La selección de estrategias de mantenimiento constituye una etapa fundamental dentro de la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), debido a que permite definir las acciones más adecuadas para preservar las funciones operativas de la torre de enfriamiento y minimizar la ocurrencia de fallas que afecten su desempeño térmico. Esta selección se realiza considerando el análisis funcional del sistema, los modos de falla identificados, las condiciones de operación y el nivel de criticidad asociado a cada componente. (Moubray, 1997)

El enfoque RCM establece que las estrategias de mantenimiento deben orientarse principalmente a gestionar las consecuencias de las fallas y no únicamente a intervenir componentes de manera periódica sin justificación técnica. En este sentido, la selección de las tareas de mantenimiento para la torre de enfriamiento se desarrolló considerando el impacto operativo de cada subsistema sobre la capacidad de disipación térmica y la continuidad de funcionamiento del sistema.

A partir del análisis técnico realizado en el capítulo anterior, se identificó que los componentes con mayor influencia sobre la eficiencia operacional de la torre corresponden al sistema de ventilación, el sistema de distribución de agua, el material de relleno y el sistema de recirculación hidráulica. La falla de estos elementos puede generar disminución del intercambio térmico, incremento de la temperatura de salida del agua, aumento del consumo energético y reducción de la confiabilidad del sistema. (SAE International, 2021)

En función de estas condiciones, se establecieron diferentes estrategias de mantenimiento de acuerdo con el comportamiento operativo de cada componente. Para aquellos elementos sometidos a desgaste progresivo o acumulación de deterioro, se seleccionaron tareas de mantenimiento preventivo orientadas a reducir la probabilidad de falla mediante inspecciones periódicas, limpieza programada y ajustes operativos. Estas actividades permiten mantener condiciones adecuadas de funcionamiento y disminuir la aparición de fallas asociadas a corrosión, incrustaciones y desgaste mecánico. (Nowlan, Stanley F. & Heap, Howard F., 1978)

De igual manera, para los componentes cuya condición puede ser monitoreada durante la operación, se consideró la aplicación de estrategias de mantenimiento predictivo. Este enfoque permite evaluar parámetros como vibraciones, temperatura, ruido y comportamiento eléctrico del sistema de ventilación, facilitando la detección temprana de anomalías antes de que se produzcan fallas funcionales severas. La aplicación del mantenimiento predictivo contribuye a optimizar los intervalos de intervención y reducir paradas inesperadas del sistema. (Rausand, 1998)

En aquellos casos donde las consecuencias de falla no representan riesgos críticos para la operación general de la torre, se estableció la aplicación de mantenimiento correctivo planificado. Esta estrategia permite gestionar determinadas fallas mediante intervenciones programadas, evitando la ejecución de actividades preventivas innecesarias y optimizando el uso de recursos técnicos y económicos. (Ebeling, 2010)

La combinación de estrategias preventivas, predictivas y correctivas planificadas permite estructurar un sistema de mantenimiento integral adaptado a las condiciones reales de operación de la torre de enfriamiento. Este enfoque contribuye a mejorar la

disponibilidad operativa del sistema, incrementar la confiabilidad de los componentes críticos y prolongar la vida útil de los equipos asociados al proceso de intercambio térmico. (Jardine, Andrew K. S., Lin, Daming , & Banjevic, Dragan, 2006)

La selección de estrategias desarrollada en esta sección constituye la base para la elaboración del plan de mantenimiento propuesto en los apartados siguientes, donde se establecerán las actividades específicas, frecuencias de intervención y recursos necesarios para la implementación del modelo de mantenimiento basado en RCM. (Mobley, 2002)

4.2. Elaboración del plan de mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo constituye una de las principales estrategias seleccionadas dentro del enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) aplicado a la torre de enfriamiento. Su finalidad consiste en reducir la probabilidad de ocurrencia de fallas mediante la ejecución periódica de actividades de inspección, limpieza, ajuste y conservación de los componentes que intervienen en el proceso de disipación térmica. (Moubray, 1997)

La aplicación de mantenimiento preventivo en la torre de enfriamiento se justifica debido a las condiciones operativas y ambientales a las que se encuentra expuesto el sistema. Factores como humedad, variaciones térmicas, acumulación de sedimentos, corrosión y desgaste mecánico generan un deterioro progresivo en los componentes, afectando directamente la eficiencia del intercambio térmico y la continuidad operativa del equipo. (Dhillon, 2006)

El desarrollo del plan preventivo se realizó considerando los componentes con mayor influencia sobre el funcionamiento general de la torre, entre los cuales se encuentran el ventilador axial, el motor eléctrico, el sistema de distribución de agua, el

material de relleno, la bandeja colectora, las tuberías y el sistema de recirculación hidráulica. Cada uno de estos elementos requiere actividades específicas de mantenimiento orientadas a conservar sus condiciones normales de operación. (Smith, Anthony M. & Hinchcliffe, Glenn R., 2004)

En el sistema de ventilación se establecieron inspecciones periódicas orientadas a verificar el estado de las aspas, alineación del conjunto motriz, fijaciones mecánicas y presencia de vibraciones anormales. Estas actividades permiten detectar desgastes prematuros, desbalances o condiciones que puedan afectar el flujo de aire necesario para el proceso de enfriamiento. (ASHRAE, 2020)

Para el motor eléctrico se definieron actividades relacionadas con limpieza externa, verificación de conexiones eléctricas, control de temperatura de operación y revisión del sistema de alimentación eléctrica. Estas tareas buscan prevenir sobrecalentamientos, fallas eléctricas y pérdidas de eficiencia energética asociadas al funcionamiento continuo del sistema. (Mobley, 2002)

En el sistema de distribución de agua se programaron inspecciones orientadas a verificar el estado de las boquillas, uniformidad de distribución y posibles obstrucciones ocasionadas por sedimentos o incrustaciones. El correcto funcionamiento de este subsistema resulta fundamental para garantizar una adecuada superficie de contacto entre el agua y el flujo de aire dentro de la torre. (Green & Southard, 2019)

El material de relleno requiere actividades periódicas de limpieza y control de incrustaciones, debido a que la acumulación de residuos minerales o contaminantes disminuye la capacidad de intercambio térmico del sistema. Asimismo, se contempla la revisión de deformaciones o deterioros estructurales que puedan afectar la circulación del agua y el flujo de aire. (ASHRAE, 2020)

En relación con la bandeja colectora y las tuberías, se establecieron actividades de inspección visual para detectar fugas, corrosión, acumulación de sedimentos y deterioro estructural. Estas tareas permiten mantener condiciones adecuadas de almacenamiento y circulación del agua enfriada dentro del sistema.

La frecuencia de las actividades preventivas se definió considerando las condiciones de operación de la torre, el nivel de exigencia del sistema y las características de deterioro de cada componente. Las inspecciones visuales y actividades básicas de limpieza se programaron con mayor frecuencia, mientras que las revisiones técnicas de mayor complejidad se establecieron en intervalos mensuales, trimestrales o semestrales, dependiendo del comportamiento operativo del componente. (International Organization for Standardization , 2014)

La implementación del plan de mantenimiento preventivo permite reducir la ocurrencia de fallas inesperadas, disminuir tiempos de parada y prolongar la vida útil de los componentes críticos de la torre de enfriamiento. Además, contribuye a mantener condiciones estables de operación y mejorar la eficiencia térmica del sistema dentro del entorno académico y operativo del taller de motores.

Como parte de la estructuración del plan preventivo, posteriormente se establecerán las actividades específicas, frecuencias de ejecución, responsables técnicos y recursos requeridos para la correcta aplicación del mantenimiento dentro del esquema general de gestión basado en RCM.

4.3. Elaboración del plan de mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo constituye una estrategia complementaria dentro del enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), orientada al monitoreo continuo de las condiciones operativas de los componentes críticos de la

torre de enfriamiento. Su finalidad principal consiste en detectar anomalías o procesos de deterioro antes de que evolucionen hacia fallas funcionales que comprometan la eficiencia térmica y la continuidad operativa del sistema. (Mobley, 2002)

A diferencia del mantenimiento preventivo tradicional, el mantenimiento predictivo se basa en la evaluación de parámetros reales de funcionamiento, permitiendo intervenir los equipos únicamente cuando las condiciones operativas indiquen la presencia de desviaciones o tendencias anormales. Este enfoque contribuye a optimizar recursos técnicos y económicos, reduciendo intervenciones innecesarias y minimizando tiempos de parada no programados.

La aplicación del mantenimiento predictivo en la torre de enfriamiento se enfoca principalmente en aquellos componentes cuya condición puede ser evaluada mediante monitoreo operacional. Entre los elementos más relevantes se encuentran el motor eléctrico, el ventilador axial, el sistema de recirculación hidráulica y los componentes asociados al flujo de agua y aire. (Jardine, Andrew K. S., Lin, Daming , & Banjevic, Dragan, 2006)

En el caso del motor eléctrico, se estableció el monitoreo periódico de parámetros como temperatura de operación, consumo de corriente y presencia de ruidos anormales. El incremento excesivo de temperatura o variaciones inusuales en el comportamiento eléctrico pueden indicar sobrecargas, desalineaciones o deterioro interno de los componentes del motor. La detección temprana de estas condiciones permite programar intervenciones antes de que ocurra una falla total del sistema.

Para el ventilador axial se contempla el monitoreo de vibraciones mecánicas, estado de las aspas y comportamiento dinámico del conjunto motriz. Vibraciones excesivas pueden estar asociadas a desbalances, desgaste mecánico, aflojamiento de

fijaciones o deformaciones estructurales, afectando directamente la capacidad de circulación de aire dentro de la torre de enfriamiento. (Randall, 2011)

En el sistema hidráulico y de distribución de agua, el mantenimiento predictivo considera la evaluación del caudal de circulación, presión de operación y comportamiento del flujo de agua sobre el material de relleno. Variaciones en estos parámetros pueden indicar obstrucciones, acumulación de sedimentos o pérdidas de eficiencia en la recirculación del sistema.

Asimismo, el control visual periódico del estado del material de relleno permite identificar acumulación progresiva de incrustaciones, deformaciones o deterioro superficial que puedan disminuir la capacidad de intercambio térmico. Estas inspecciones facilitan la programación de actividades de limpieza o reemplazo antes de que se produzcan pérdidas significativas de rendimiento. (Jardine, Andrew K. S., Lin, Daming , & Banjevic, Dragan, 2006)

La implementación del mantenimiento predictivo requiere la utilización de instrumentos básicos de monitoreo, tales como termómetros infrarrojos, pinzas amperimétricas, medidores de vibración y herramientas de inspección visual. La aplicación de estas técnicas permite obtener información objetiva sobre el comportamiento operativo del sistema y mejorar la capacidad de detección temprana de fallas. (Dhillon, 2006)

Desde el punto de vista operacional, el mantenimiento predictivo contribuye a incrementar la confiabilidad y disponibilidad de la torre de enfriamiento, debido a que permite anticipar fallas potenciales y reducir la probabilidad de interrupciones inesperadas del servicio. Asimismo, facilita la optimización de las frecuencias de

mantenimiento y mejora la planificación de recursos técnicos y humanos dentro del sistema de gestión basado en RCM.

La incorporación de estrategias predictivas dentro del plan general de mantenimiento fortalece el enfoque de confiabilidad aplicado a la torre de enfriamiento, permitiendo complementar las actividades preventivas y correctivas mediante un esquema de monitoreo orientado a la conservación del desempeño térmico y operacional del sistema. (Ebeling, 2010)

4.4. Plan de mantenimiento correctivo planificado

El mantenimiento correctivo planificado constituye una estrategia complementaria dentro del modelo de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), aplicada a aquellos componentes cuya falla no puede prevenirse completamente mediante actividades preventivas o predictivas, o cuya intervención anticipada no resulta técnicamente justificable desde el punto de vista operativo y económico. Esta estrategia permite gestionar fallas de manera controlada, minimizando el impacto sobre la continuidad operativa de la torre de enfriamiento. (Moubray, 1997)

A diferencia del mantenimiento correctivo no planificado, el mantenimiento correctivo planificado contempla la programación anticipada de intervenciones una vez detectadas condiciones de deterioro o pérdida parcial de funcionalidad que no comprometen de forma inmediata la operación general del sistema. Este enfoque permite organizar recursos técnicos, materiales y tiempos de intervención de manera más eficiente, reduciendo costos asociados a paradas inesperadas y daños secundarios en otros componentes. (Nowlan, Stanley F. & Heap, Howard F., 1978)

Dentro de la torre de enfriamiento, el mantenimiento correctivo planificado se orienta principalmente a componentes sometidos a desgaste progresivo, corrosión o

deterioro estructural derivados de las condiciones ambientales y operativas del sistema. Entre los elementos considerados dentro de esta estrategia se encuentran las tuberías, soportes estructurales, bandeja colectora, conexiones hidráulicas, fijaciones mecánicas y determinados elementos secundarios del sistema de ventilación. (International Organization for Standardization , 2014)

En el caso de las tuberías y conexiones hidráulicas, las actividades correctivas planificadas incluyen reparación de fugas, sustitución de secciones corroídas, ajuste de uniones y reemplazo de elementos deteriorados por desgaste o acumulación de sedimentos. Estas intervenciones buscan mantener la integridad del sistema de circulación de agua y evitar pérdidas de caudal que afecten la eficiencia térmica de la torre. (Green & Southard, 2019)

Para la estructura metálica y bandeja colectora se contemplan trabajos de limpieza profunda, eliminación de corrosión superficial, aplicación de recubrimientos protectores y sustitución parcial de elementos estructurales afectados por deterioro mecánico o ambiental. Estas actividades permiten preservar la estabilidad estructural del sistema y prolongar la vida útil de la torre de enfriamiento.

En relación con el sistema de ventilación, el mantenimiento correctivo planificado considera la sustitución de aspas desgastadas, reparación de fijaciones, ajuste del sistema motriz y reemplazo de componentes que presenten deformaciones o pérdida de eficiencia operacional. Estas intervenciones se programan en función del comportamiento observado durante las inspecciones preventivas y predictivas realizadas sobre el equipo.

La planificación de las actividades correctivas se desarrolla considerando el nivel de criticidad de cada componente, disponibilidad de recursos técnicos y tiempos

operativos del taller de motores. Esta organización permite ejecutar las intervenciones durante períodos programados de mantenimiento, evitando interrupciones imprevistas que afecten el desarrollo de las actividades académicas y operativas asociadas al sistema.

Asimismo, el mantenimiento correctivo planificado contempla la disponibilidad de repuestos básicos, herramientas especializadas y personal técnico capacitado para la ejecución segura y eficiente de las actividades de reparación. La correcta planificación de estos recursos contribuye a disminuir tiempos de intervención y mejorar la capacidad de respuesta ante fallas identificadas durante la operación del sistema.

La incorporación de esta estrategia dentro del esquema general de mantenimiento basado en RCM permite establecer un equilibrio entre confiabilidad operacional, costos de mantenimiento y disponibilidad del sistema. De esta manera, el mantenimiento correctivo planificado complementa las estrategias preventivas y predictivas previamente establecidas, fortaleciendo la gestión integral de la torre de enfriamiento y contribuyendo a la continuidad de su funcionamiento dentro del entorno académico y técnico del taller de motores. (Dhillon, 2006)

4.5. Plan de repotenciación de la torre de enfriamiento

El plan de repotenciación de la torre de enfriamiento surge como una propuesta técnica orientada a mejorar las condiciones operativas, la eficiencia térmica y la confiabilidad del sistema mediante la incorporación de mejoras estructurales, mecánicas e hidráulicas. Esta propuesta complementa el diseño y construcción original de la torre de enfriamiento, integrando criterios de mantenimiento y confiabilidad basados en la

metodología RCM para optimizar el desempeño general del equipo dentro del taller de motores.

La necesidad de repotenciación se fundamenta en las condiciones actuales de operación del sistema, donde factores como desgaste mecánico, acumulación de incrustaciones, corrosión, deterioro estructural y limitaciones operativas pueden afectar progresivamente la capacidad de disipación térmica de la torre. Asimismo, el funcionamiento continuo del sistema bajo condiciones ambientales variables genera procesos de deterioro que requieren la implementación de mejoras orientadas a incrementar la estabilidad y eficiencia operacional del equipo. (International Organization for Standardization , 2014)

Dentro de las principales acciones de repotenciación propuestas se contempla la optimización del sistema de ventilación mediante la revisión y posible sustitución de aspas deterioradas, mejora del sistema de fijación mecánica y verificación de alineación del conjunto motriz. Estas acciones permiten mejorar el flujo de aire inducido dentro de la torre, favoreciendo el proceso de evaporación y aumentando la capacidad de intercambio térmico del sistema. (ASHRAE , 2020)

En el sistema de distribución hidráulica se propone la limpieza y adecuación de boquillas de distribución de agua, así como la revisión de tuberías y conexiones que puedan presentar pérdidas o restricciones de flujo. La correcta distribución del agua sobre el material de relleno constituye un factor fundamental para garantizar un enfriamiento uniforme y mantener condiciones estables de operación. (Green & Southard, 2019)

Otra de las mejoras consideradas corresponde al material de relleno, debido a que este componente influye directamente en el área de contacto entre el agua y el aire

dentro de la torre. La acumulación de sedimentos, incrustaciones o deformaciones estructurales disminuye la eficiencia térmica del sistema, por lo que se plantea la limpieza profunda o sustitución parcial del relleno cuando las condiciones de deterioro lo requieran. (ASHRAE, 2020)

Desde el punto de vista estructural, el plan de repotenciación contempla la aplicación de tratamientos anticorrosivos en superficies metálicas expuestas a humedad constante y variaciones térmicas. Asimismo, se considera la reparación de zonas afectadas por corrosión o desgaste mecánico, contribuyendo a preservar la integridad física de la torre de enfriamiento y prolongar su vida útil operativa.

Como parte de la modernización del sistema, se propone incorporar actividades de monitoreo operacional mediante inspecciones periódicas de temperatura, vibraciones y comportamiento eléctrico del sistema motriz. La implementación de estas actividades permite fortalecer el mantenimiento predictivo y mejorar la capacidad de detección temprana de fallas dentro del esquema de confiabilidad operacional aplicado al equipo.

La repotenciación planteada no implica modificaciones radicales en el diseño original de la torre de enfriamiento, sino la optimización de sus condiciones de funcionamiento mediante mejoras técnicas compatibles con la estructura existente. Este enfoque permite aprovechar la infraestructura previamente construida, reduciendo costos asociados a reemplazos completos y fortaleciendo la sostenibilidad técnica y económica del sistema. (Ebeling, 2010)

La implementación del plan de repotenciación contribuirá a incrementar la eficiencia térmica de la torre, reducir la probabilidad de fallas imprevistas, optimizar el consumo energético y mejorar la disponibilidad operativa del sistema dentro del taller de motores. De esta manera, la propuesta integra los principios de mantenimiento,

confiabilidad y mejora continua como parte de una estrategia orientada a preservar el desempeño funcional de la torre de enfriamiento en el entorno académico y técnico de la institución. (Dhillon, 2006)

4.6. Cronograma de mantenimiento

El cronograma de mantenimiento constituye una herramienta fundamental para la planificación y ejecución ordenada de las actividades propuestas dentro del sistema de gestión basado en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Su finalidad principal consiste en establecer la periodicidad de las intervenciones técnicas requeridas para conservar las condiciones operativas de la torre de enfriamiento y garantizar la continuidad de funcionamiento del sistema. (Smith, Anthony M. & Hinchcliffe, Glenn R., 2004)

La elaboración del cronograma se desarrolló considerando las condiciones de operación de la torre, el nivel de criticidad de los componentes, la frecuencia de uso del sistema y las necesidades de conservación identificadas durante el análisis funcional y operacional realizado en capítulos anteriores. La programación de actividades permite optimizar el uso de recursos técnicos y humanos, así como reducir la probabilidad de fallas imprevistas que afecten el desempeño térmico de la torre de enfriamiento. (Moubray, 1997)

El cronograma integra actividades de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo planificado, organizadas de acuerdo con la naturaleza y complejidad de cada intervención. Las actividades de inspección visual, limpieza superficial y verificación operativa básica fueron establecidas con frecuencias semanales y mensuales, debido a la exposición constante del sistema a humedad, sedimentos y condiciones ambientales que favorecen el deterioro progresivo de los componentes.

Dentro de las actividades programadas semanalmente se contempla la inspección visual general de la torre, verificación del flujo de agua, revisión de fugas visibles, control básico del funcionamiento del ventilador y limpieza superficial de residuos acumulados en la bandeja colectora y zonas de circulación de agua. Estas actividades permiten detectar anomalías operativas de manera temprana y mantener condiciones adecuadas de funcionamiento.

Las actividades mensuales incluyen revisión del estado de las aspas del ventilador, verificación de fijaciones mecánicas, inspección de conexiones eléctricas, limpieza parcial del sistema de distribución de agua y control de posibles incrustaciones en el material de relleno. Estas tareas buscan reducir el deterioro progresivo y preservar la eficiencia térmica del sistema.

En períodos trimestrales y semestrales se programaron actividades de mayor complejidad técnica, tales como limpieza profunda del relleno, revisión integral del sistema hidráulico, inspección de corrosión estructural, verificación de alineación del conjunto motriz y evaluación del comportamiento operativo del sistema mediante monitoreo de vibraciones y temperatura. Estas intervenciones permiten mantener un control más preciso sobre las condiciones generales de operación de la torre de enfriamiento.

Asimismo, el cronograma contempla actividades anuales orientadas a la evaluación integral del sistema, incluyendo mantenimiento general de componentes críticos, aplicación de recubrimientos anticorrosivos, sustitución de elementos deteriorados y revisión técnica del desempeño operacional de la torre. Estas actividades contribuyen a prolongar la vida útil del sistema y mantener niveles adecuados de confiabilidad y disponibilidad operacional.

La programación de las actividades de mantenimiento se desarrolló considerando períodos de menor carga operativa dentro del taller de motores, con la finalidad de minimizar interrupciones en las prácticas académicas y optimizar la disponibilidad del sistema durante las actividades de formación técnica. De igual manera, la planificación periódica permite organizar adecuadamente la adquisición de materiales, herramientas y recursos humanos necesarios para la ejecución de las intervenciones.

La implementación del cronograma de mantenimiento permitirá establecer una gestión organizada y sistemática de las actividades técnicas asociadas a la torre de enfriamiento, fortaleciendo la aplicación de la metodología RCM y contribuyendo a mejorar la confiabilidad, eficiencia térmica y continuidad operativa del sistema dentro del entorno académico de la institución. (SAE International , 2021)

Posteriormente, el cronograma podrá complementarse mediante tablas de programación donde se especifiquen las actividades, frecuencias, responsables y tiempos estimados de ejecución correspondientes a cada componente del sistema.

4.7. Recursos técnicos, humanos y materiales

La implementación del plan de mantenimiento propuesto para la torre de enfriamiento requiere la disponibilidad y correcta gestión de recursos técnicos, humanos y materiales que permitan ejecutar de manera eficiente las actividades preventivas, predictivas y correctivas establecidas dentro del modelo de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). La adecuada organización de estos recursos constituye un elemento fundamental para garantizar la continuidad operativa del sistema y el cumplimiento de las actividades programadas dentro del cronograma de mantenimiento. (International Organization for Standardization , 2014)

Los recursos humanos representan uno de los factores más importantes dentro de la ejecución del plan de mantenimiento, debido a que las actividades técnicas requieren personal con conocimientos básicos en sistemas mecánicos, eléctricos e hidráulicos asociados al funcionamiento de la torre de enfriamiento. Para la aplicación de las tareas programadas se considera la participación de técnicos de mantenimiento, operadores del taller y personal de apoyo encargado de inspecciones, limpieza, monitoreo y ejecución de reparaciones menores. (Dhillon, 2006)

El personal técnico deberá contar con conocimientos relacionados con inspección de equipos rotativos, sistemas de recirculación hidráulica, identificación de fallas operativas y manejo seguro de herramientas e instrumentos de medición. Asimismo, se recomienda la supervisión periódica de las actividades de mantenimiento con la finalidad de garantizar el cumplimiento de los procedimientos establecidos y preservar condiciones seguras durante las intervenciones técnicas realizadas sobre el sistema.

En cuanto a los recursos técnicos, se contempla la utilización de herramientas e instrumentos necesarios para el monitoreo, inspección y mantenimiento de los componentes de la torre de enfriamiento. Entre los principales equipos requeridos se encuentran herramientas mecánicas básicas, llaves de ajuste, destornilladores, equipos de limpieza, termómetros infrarrojos, pinzas amperimétricas y dispositivos de inspección visual utilizados para la evaluación del estado operativo de los componentes. (Moble, 2002)

La disponibilidad de estos equipos permite fortalecer la detección temprana de anomalías y mejorar la capacidad de evaluación del estado operacional de la torre de enfriamiento. (Randall, 2011)

Los recursos materiales incluyen todos aquellos elementos necesarios para la ejecución de actividades preventivas y correctivas dentro del sistema. Entre los principales materiales considerados se encuentran lubricantes, productos de limpieza, pinturas anticorrosivas, empaques, sellos, tornillería, conexiones hidráulicas y repuestos básicos para componentes sometidos a desgaste operativo. Asimismo, se contempla la disponibilidad de materiales orientados a la protección y conservación estructural de la torre de enfriamiento frente a condiciones de humedad y corrosión ambiental. (Smith, Anthony M. & Hinchcliffe, Glenn R., 2004)

La correcta administración de los recursos técnicos, humanos y materiales permite optimizar la ejecución del plan de mantenimiento y reducir tiempos de intervención asociados a la disponibilidad limitada de herramientas o repuestos. Asimismo, contribuye a fortalecer la sostenibilidad operativa del sistema y mejorar la capacidad de respuesta ante posibles fallas o condiciones anormales identificadas durante la operación de la torre de enfriamiento.

La integración de estos recursos dentro del esquema general de mantenimiento basado en RCM garantiza una gestión técnica más organizada y eficiente, orientada a preservar las condiciones operativas del sistema y asegurar el cumplimiento de las actividades académicas y técnicas desarrolladas en el taller de motores. (Moubray, 1997).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se determinó que la torre de enfriamiento presenta deficiencias operativas relacionadas con desgaste mecánico, acumulación de incrustaciones y ausencia de mantenimiento estructurado, afectando la eficiencia térmica y disponibilidad del sistema.
- Se identificaron las funciones principales y secundarias de la torre de enfriamiento, así como las fallas funcionales asociadas al sistema de ventilación, distribución de agua y recirculación, permitiendo establecer criterios técnicos para el análisis de confiabilidad.
- Mediante la aplicación del análisis AMFE se identificaron los principales modos de falla asociados al ventilador axial, material de relleno y sistema hidráulico, determinándose sus efectos sobre el desempeño térmico y la continuidad operativa del sistema.
- La evaluación de criticidad permitió establecer estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo enfocadas en los componentes de mayor impacto operativo, optimizando la gestión técnica del sistema.
- Se formuló un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM que integra actividades preventivas, predictivas y correctivas planificadas, orientadas a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y vida útil de la torre de enfriamiento.

Recomendaciones

- Implementar el plan de mantenimiento basado en RCM, priorizando los componentes de mayor impacto en la operación de la torre.
- Realizar inspecciones periódicas al ventilador y motor eléctrico, verificando vibraciones, rodamientos, balanceo y alimentación eléctrica.
- Ejecutar limpiezas periódicas del relleno, rociadores y eliminadores de gotas, evitando suciedad, incrustaciones y obstrucciones.
- Monitorear periódicamente las variables de operación, como temperatura, nivel de agua y condiciones del motor, para detectar anomalías oportunamente.
- Mantener registros de las actividades de mantenimiento y fallas, permitiendo evaluar el desempeño del sistema y mejorar el plan de mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAE . (2020). *ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment*.
ASHRAE .

Ben-Daya, M. e. (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*.

Blanchard, B. S. (2004). *Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management*. New York: Wiley.

Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers* . Boca Raton : CRC Press .

Ebeling, C. E. (2010). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering* . Long Grove : Waveland Press .

Elsayed, E. A. (2012). *Reliability Engineering*.

Gilchrist, W. (1993). *Modelling Failure Modes and Effects Analysis*.

Green, Don W. , & Southard, Marylee Z. . (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* . McGraw-Hill Education .

Hastings, N. A. (2015). *Physical Asset Management*. Cham: Springer.

International Organization for Standardization . (2014). *ISO 55000: Asset Management – Overview, Principles and* .

Jardine, Andrew K. S., Lin, Daming , & Banjevic, Dragan. (2006). A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing . *Mechanical Systems and Signal Processing* .

Juan, D. S. (16 de Octubre de 2016). *Un gran clásico, torres de enfriamiento*. Obtenido de <https://0grados.com/gran-clasico-torres-enfriamiento/>

Kelly, A. (2006). *Maintenance Strategy*.

Levitt, J. (2003). *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance*. New York: Industrial Press.

Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Burlington: Butterworth-Heinemann .

Modarres, M., Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (2016). *Reliability Engineering and Risk Analysis*.

Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* . Oxford: Butterworth-Heinemann .

Nowlan, Stanley F., & Heap, Howard F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. Washington, D.C. : United States Department of Defense.

Pritchard, P. (2014). *Cooling Tower Fundamentals*. Tulsa: Cooling Tower Fundamentals.

Randall, R. B. (2011). *Vibration-Based Condition Monitoring*. Chichester: John Wiley & Sons .

Rausand, M. (1998). *Reliability Engineering and Risk Analysis*. New York: Chapman & Hall .

SAE International. (2021). *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM)* . SAE International.

Smith, Anthony M. , & Hinchcliffe, Glenn R. (2004). *RCM: Gateway to World Class Maintenance* . Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee: ASQ Quality Press.

Woodhouse, J. (2014). *Asset Management Excellence*.

ANEXOS

ANEXO 1



Desmonte de recubrimiento de las tuberías de agua fría y agua caliente. Fuente: Elaborado por los autores

ANEXO 2



Retiro del piso cuarteado de las tuberías de agua de entrada y de desfogue. Fuente: Elaborado por los Autores

ANEXO 3



Verificación de posible fugas de agua de la cisterna interna de la torre. Fuente: Elaborado por los Autores

ANEXO 4



Limpiezas de las herramientas de trabajo para la torre. Fuente: Elaborado por los autores

ANEXO 5



Prueba de funcionamiento de los rociadores (chispeadores). Fuente: Elaborado por los autores.

ANEXO 6



Colocación y adaptaciones al blower con su base respectiva y techado nuevo y acoples para la entrada del blower a la torre. Fuente: Elaborado por los autores.

ANEXO 7



Soldadura de bisagras a la puerta de la torre (cambio el sistema de abertura de la puerta). Fuente: Elaborado por los Autores.

ANEXO 8



Limpieza de área de las tuberías de entrada y salida de la torre. Fuente: Elaborado por los Autores.

ANEXO 9



Limpieza del área de la torre de las salidas de agua fría caliente y desfogue. Fuente: Elaborado por los autores.

ANEXO 10



Plano general de la torre de enfriamiento. Fuente: Elaborado por los autores.