

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR “JOSÉ MIGUEL CARRERA”

**APLICACIÓN DE METODOLOGÍA RCM A UN HORNO DE VENTILACIÓN
DE AIRE CALIENTE Y SECADO BAJO VACÍO**

Trabajo de Titulación para optar
al Título Profesional de Ingeniero
en Mantenimiento Industrial con
Licenciatura en Ingeniería de
Mantenimiento

Alumno:

Sr. Marcelo Acevedo Flores

Profesor Guía:

PhD. MSc. Eng. Carlos Parra



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Aplicación de una metodología RCM a un horno de ventilación de aire caliente y secado bajo vacío

Nombre del candidato(a): Marcelo Andrés Acevedo Flores

Carrera / Grado: Ingeniero en Mantenimiento Industrial con Licenciatura en Ingeniería de Mantenimiento

Campus: Viña del Mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Alberto Parra Márquez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 31-03-2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31/03/26 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

Agradezco a todo el grupo humano de profesionales docentes que me acompañaron en el camino de mi formación como ingeniero. En mi carrera como técnico universitario siempre existió el anhelo de cursar una carrera de ingeniería, pero fue postergada por una u otra situación, después de 20 años volví a la universidad en busca de un nuevo desafío, esta vez con una madurez profesional desarrollada y con un objetivo claro.

Quiero agradecer por todo el apoyo recibido de mi familia, padre, madre y hermanos, en especial a mi esposa Catalina González Trujillo quien fue un apoyo y una contención emocional incondicional en toda la etapa académica y también a mi hijo Giuliano Acevedo por ser el motor de todo este esfuerzo, él es quien hace de mí una mejor persona cada día.

KEYWORDS: RCM - FMECA – ESTUDIO ECONÓMICO - ANÁLISIS DE CRITICIDAD - HOJA DE DECISIÓN – INDICADORES TÉCNICOS Y ECONÓMICOS – MODOS DE FALLO – GESTIÓN DE MANTENIMIENTO.

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se aplicó un análisis RCM (mantenimiento centrado en confiabilidad) a un horno industrial de ventilación de aire caliente y secado bajo vacío que cuenta con un volumen de 90 m³ ubicado en el proceso productivo del área de envasado de equipos de poder de la empresa RHONA S.A.

La función principal de este horno es el secado de aislación y madera que está presente en las partes activas (viga, núcleo, bobina, aislación y madera) del transformador de poder. Este horno es un equipo único en Chile, que no tiene redundancia similar.

A pesar de su tamaño, pueden secarse simultáneamente hasta dos partes activas, y en los equipos de mayor magnitud solo uno a la vez, por lo que su fallo genera impactos importantes en la línea productiva, como se detallan a continuación:

- Detiene el proceso de secado de aislación de la parte activa, proceso que puede tener un ciclo de hasta una semana y el fallo genera el reinicio del proceso.
- Pérdida de la planificación por la pérdida productiva.
- Incremento de costos energéticos
- Pérdida de la eficiencia del aislamiento en su funcionamiento.
- Genera costos excesivos debido a la pérdida de operación
- Genera sobrecostos por horas extraordinarias de los equipos de trabajo posterior al fallo, para mantener las fechas comprometidas.

La motivación de este trabajo es presentar un proceso de gestión de mantenimiento aplicando metodología RCM para dar respaldo a este activo, iniciando con la recopilación de antecedentes de la empresa y del activo, posteriormente se presenta la problemática para justificar la aplicación de RCM, la segunda etapa presenta el marco teórico del RCM para la posterior aplicación del RCM iniciando con la formación del grupo natural de

trabajo seguido de la selección del sistema crítico a partir de un análisis de riesgo cualitativo, seguido se presentó la definición del contexto operacional del sistema crítico seleccionado, dando paso al análisis modo efecto y fallo concluyendo con la definición de los riesgos económicos de los modos de fallos del sistema crítico seleccionado y finalmente en la tercera etapa se definió el plan de mantenimiento y se compararon los indicadores técnicos y económicos antes y después de aplicada la metodología, donde se demuestra que la aplicación tiene como resultado una mejora en disponibilidad y económica.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURA.....	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
SIGLA Y SIMBOLOGÍA.....	11
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
1. CAPÍTULO 1: CONTEXTO OPERACIONAL DEL HORNO Y DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	3
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	4
1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	5
1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL	6
1.4 MAPA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA FÁBRICA.....	7
1.5 PROCESO PRODUCTIVO DEL ÁREA DE PODER.....	8
1.5.1 Corte de acero silicoso	9
1.5.2 Corte de aislación y madera	9
1.5.3 Bobinado	9
1.5.4 Armado de núcleo	9
1.5.5 Armado parte activa	10
1.5.6 Secado de parte activa.....	10
1.5.7 Envasado	12
1.6 EXPLICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL HORNO Y SUS SISTEMAS PRINCIPALES	13
1.6.1 Características generales del horno.....	13
1.6.2 Explicación del funcionamiento.....	15
1.6.3 Sistema de ventilación de aire caliente (temperatura de operación es de 60 a 90°C).....	15
1.6.4 Sistema de secado bajo vacío (presión interna del sistema de 760 hasta 0,2 mbar).....	17

1.6.5	Otros Sistemas.....	17
1.7	PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	18
2.	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM AL SISTEMA CRÍTICO SELECCIONADO.....	20
2.1	MARCO TEÓRICO DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM [4].....	21
2.1.1	Procedimiento de implementación de la técnica RCM.....	22
2.1.2	Formación del equipo natural de trabajo.....	22
2.1.3	Selección del sistema	24
2.1.4	Técnicas de análisis de criticidad aplicadas en proceso RCM.....	25
2.1.5	Factores ponderados para la empresa RHONA S.A.	26
2.1.5.1	Definición de la frecuencia para la matriz de criticidad	27
2.1.5.2	Definición de la consecuencia para la matriz de criticidad.....	27
2.1.5.3	Matriz de criticidad	28
2.1.5.4	Ejemplo análisis de criticidad a partir del factor de riesgo	29
2.1.6	Definición del contexto operacional del RCM.....	29
2.1.7	Desarrollo del análisis de modos, efectos y criticidad de fallos FMECA....	31
2.1.7.1	FMECA, definición de funciones y estándares de ejecución.....	32
2.1.7.2	FMECA, definición de fallos funcionales.....	33
2.1.7.3	FMECA, definición de modos de fallos.....	34
2.1.7.4	FMECA, definición de los efectos y análisis de criticidad de los modos de fallos.....	34
2.1.7.5	FMECA cálculo del riesgo económico actual.....	37
2.1.8	Proceso de selección de las estrategias de mantenimiento (árbol lógico de decisiones del RCM).....	37
2.1.8.1	Actividades de mantenimiento preventivas (proactivas)	38
2.1.8.2	Actividades de mantenimiento correctivas (reactivas)	40
2.2	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM AL HORNO EN ESTUDIO	41
2.2.1	Equipo natural de trabajo del RCM	41
2.2.2	Selección del sistema	41

2.2.3	Definición del contexto operacional del sistema de ventilación de aire caliente	43
2.2.3.1	Resumen operativo	43
2.2.3.2	Equipos o subsistemas principales	44
2.2.3.3	Diagrama EPS (Entrada, Proceso, Salida)	50
2.2.4	Análisis de modo efecto y fallo (FMECA) del sistema de ventilación de aire caliente	51
3.	CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO Y COMPARACIÓN DE INDICADORES TÉCNICOS Y ECONÓMICOS	55
3.1	PLAN DE MANTENIMIENTO DESARROLLADO A PARTIR DE LA HOJA DE DECISIÓN DEL RCM	56
3.2	RIESGO ECONÓMICO ESPERADO POSTERIOR A LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM	58
3.3	ANÁLISIS DEL AHORRO ECONÓMICO POTENCIAL POSTERIOR A LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM	61
3.4	ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLO CON MAYOR IMPACTO EN EL AHORRO POTENCIAL DEL RCM	63
3.4.1	Propuestas de planes de mantenimiento para el modo de fallo A1	63
3.4.2	Comparación de los riesgos económicos esperados para el modo de fallo A1	65
3.4.3	Comparación del ahorro potencial del modo de fallo A1	65
3.5	INDICADORES RECOMENDADOS PARA EVALUAR EN UN PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM EN LA ORGANIZACIÓN	66
3.6	COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM	68
3.6.1	Cálculo del indicador de disponibilidad	68
3.6.2	Cálculo del indicador de confiabilidad	71
3.6.3	Cálculo del indicador de mantenibilidad	72
3.7	EJEMPLO DE APLICACIÓN DE INDICADORES A PARTIR DE CÁLCULOS ESTADÍSTICOS ANTES Y DESPUÉS DEL RCM	73
3.7.1	Ejemplo de aplicación de cálculos estadísticos antes del RCM	73
3.7.2	Ejemplo de aplicación de cálculos estadísticos después del RCM	75

CONCLUSIÓN.....	78
RECOMENDACIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA	81

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1-1. Ubicación geográfica.....	5
Figura 1-2. Vista aérea empresa RHONA industrial y comercial.....	5
Figura 1-3. Organigrama área industrial	6
Figura 1-4. Mapa de proceso productivo de área industrial.....	7
Figura 1-5. Mapa de proceso productivo área de poder.....	8
Figura 1-6. Bosquejo isométrico del horno.....	13
Figura 1-7. Bosquejo vista planta del horno	14
Figura 1-8. Esquema de circulación de aire frío y caliente en horno.....	16
Figura 2-1. Flujograma de implantación del RCM	22
Figura 2-2. Formación del equipo natural de trabajo.....	23
Figura 2-3. Diagrama entrada-proceso-salida	30
Figura 2-4. Esquema de aplicación del análisis modo efecto y fallos.	32
Figura 2-5. Diagrama para determinar las consecuencias de los modos de fallos.....	36
Figura 2-6. Árbol lógico de decisiones del RCM.	38
Figura 2-7. Curva PF de comportamiento de fallos potenciales	39
Figura 2-8. Esquema del sistema de ventilación de aire caliente del horno	44
Figura 2-9. Vista superior de motoventiladores sobre el horno.....	45
Figura 2-10. Plano conjunto motoventilador	46
Figura 2-11. Vista de la caldera eléctrica ubicada al exterior del horno.....	47
Figura 2-12. Vista de la motobomba térmica ubicada al exterior del horno.....	48
Figura 2-13. Vista de las dos unidades de intercambiadores de calor	49
Figura 2-14. Diagrama entrada - proceso – salida del sistema de ventilación de aire caliente	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Ciclo de Secado estándar. Fuente: Procedimiento interno de secado [2].	11
Tabla 1-2. Diagrama de fase del agua, Fuente: Especificación técnica horno [3].	15
Tabla 2-1. Matriz de criticidad. Fuente: Elaboración propia	28
Tabla 2-2. Ejemplo selección matriz de criticidad. Fuente: Elaboración propia	29
Tabla 2-3. Selección del sistema crítico. Fuente: Elaboración propia	42
Tabla 2-4. FMECA riesgo económico actual. Fuente: Elaboración propia	51
Tabla 3-1. Plan de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia	57
Tabla 3-2. Riesgo económico esperado. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 3-3. Ahorro económico potencial posterior al RCM. Fuente: Elaboración propia	62
Tabla 3-4. Ahorro potencial acumulado para dos modos de fallo. Fuente: Elaboración propia	63
Tabla 3-5. Comparación de propuestas de planes de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia	64
Tabla 3-6. Comparación de riesgos económicos esperados. Fuente: Elaboración propia	65
Tabla 3-7. Comparación del ahorro potencial. Fuente: Elaboración propia	66
Tabla 3-8. Sumatoria de FF y TPR antes de implementar RCM. Fuente: Elaboración propia	70
Tabla 3-9. Sumatoria de FF y TPR después de implementar RCM. Fuente: Elaboración propia	70
Tabla 3-10. Datos de TO y TFS antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia	73
Tabla 3-11. Datos de TPO y R(t) antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 3-12. Datos de TPFS y M(t) antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 3-13. Indicador de disponibilidad A(t) antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia	75
Tabla 3-14. Datos de TO y TFS después del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia	75
Tabla 3-15. Datos de TPO y R(t) después del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia	76
Tabla 3-16. Datos de TPFS y M(t) después del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia	76

Tabla 3-17. Indicador de disponibilidad $A(t)$ después del RCM cargados a la planilla.

Fuente: Elaboración propia77

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

RCM	: Reliability Centered Maintenance o mantenimiento centrado en confiabilidad.
PA	: Parte activa del transformador
MVA	: Mega voltios aparentes
UNE	: Asociación española de normalización
S.A.	: Sociedad anónima.
ECM	: Equipos de compactos de medida
SIG	: Sistema integrado de gestión
P&IDs	: Piping and instrumentation diagrams o cañerías y diagramas de instrumentación
PLC	: Controlador lógico programable
ASTM	: American Society for Testing and Materials o Sociedad estadounidense para pruebas y materiales
DIN	: Deutsches Institut für Normung, Estándar técnico desarrollado por el instituto alemán de normalización.
FMECA	: Análisis de modo efecto y fallo
rpm	: Revoluciones por minuto.
TPR	: Tiempo para reparar
CM	: Costo de mantenimiento correctivo
SHA	: Seguridad higiene y medioambiente
FF	: Frecuencia de fallo
TPO	: Tiempo promedio operativo
TO	: Tiempo operativo
R(t)	: Confiabilidad

M(t)	: Mantenibilidad
A (t)	: Disponibilidad
R _{EA}	: Riesgo económico actual por fallo no evitado (\$/Año)
C _{PM}	: Costo del plan de mantenimiento por año (\$/Año)
R _{EE}	: Riesgo económico esperado (\$/Año)
AP _{RCM}	: Ahorro potencial del RCM (\$/Año)
CIF	: Costo de indisponibilidad por fallo (\$/Año)
F(t)	: Probabilidad de fallo

SIMBOLOGÍA

A	: Amperio
V	: Voltios
kW	: Kilowatt
H	: Hora
mm	: Milímetros
m ³	: Metro cúbico
\$: Peso chileno.
kg	: Kilogramo
t	: Tonelada
°C	: Grados Celsius
bar	: Unidad de presión en bar
psi	: Unidad de presión en psi
mbar	: Unidad de presión en milibar
mca	: Metros columna de agua

INTRODUCCIÓN

La empresa RHONA S.A. en su planta industrial ubicada en Viña del Mar diseña, fabrica y repara transformadores y accionamientos eléctricos.

En el proceso previo al envasado de los equipos de poder, el secado de aislación de la parte activa es de suma importancia para el transformador, ya que se deben lograr niveles de 0,5% de contenido de humedad en el conjunto, especialmente en la aislación que se compone de papel nomex, papel orpoxy, papel kraft, papel crepe, cartón prespan y madera contrachapada, con el fin de garantizar que la aislación sea efectiva en el buen funcionamiento del equipo.

Un fallo en este equipo podría detener la producción o generar un secado deficiente de la aislación. En este contexto, la primera situación genera retrasos en la cadena productiva, mientras que la segunda, debido a la presencia de humedad, provocaría la pérdida de propiedades aislantes, facilitando la formación de pérdidas parciales o cortocircuitos internos en las posteriores etapas de prueba de laboratorio del transformador o en su operación.

Estas pruebas de laboratorio garantizan la calidad y la funcionalidad del equipo durante su operación, y se realizan antes y después del envasado:

Antes del envasado: Prueba de factor de potencia donde se mide la conductividad eléctrica de la aislación y es además el método de prueba aceptación del secado de la parte activa.

Después del envasado: Prueba de Dew Point que se realiza con el estanque presurizado extrayendo y midiendo la cantidad de humedad por partícula de fluido.

La falla del horno en cualquiera de sus sistemas importantes ya sea de ventilación de aire caliente o de secado bajo vacío, podría provocar un secado deficiente o aumentar los tiempos normales de secado o en el peor de los casos detener el proceso, generando reprogramación por estancamiento del secado de partes activas próximas en la secuencia productiva, lo que conlleva impactos importantes en el proceso de envasado.

En base a lo anterior, se plantea la necesidad de abordar este estudio a este equipo y aplicar una gestión de mantenimiento para mejorar la confiabilidad y los tiempos de mantenibilidad, aplicando metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), con el fin de optimizar la disponibilidad del equipo y reducir los costos por fallo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Aplicar una mejora en la gestión de mantenimiento a un horno de ventilación de aire caliente y secado bajo vacío, mediante la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM, con el fin de mejorar su disponibilidad y reducir los costos por fallo.

Objetivos Específicos

Describir el contexto operacional, recopilando antecedentes de la empresa y del activo en estudio, con el fin de presentar la problemática y justificar la aplicación de la metodología RCM.

Definir el marco teórico del RCM, para aplicar la metodología al horno en estudio, definiendo el sistema crítico y su riesgo económico.

Definir planes de mantenimiento, utilizando el árbol lógico de decisiones del RCM, para comparar los indicadores técnicos y económicos antes y después de aplicada la metodología.

1. CAPÍTULO 1: CONTEXTO OPERACIONAL DEL HORNO Y DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

RHONA S.A. nace de la fusión de dos empresas de ingeniería, cuyos inicios se remontan a 1943. Neuweiler y Reitz Ltda. y Aspillaga y Hornauer y Cía. Ltda. se fusionan en 1964 para desarrollar la mayor fábrica de transformadores de Chile, cabe destacar que todos sus fundadores se formaron como ingenieros civiles eléctricos en la UTFSM.

Mediante la aplicación de la mejora continua, complementada con la experiencia acumulada en el tiempo y su relación con entidades tecnológicas nacionales e internacionales, le permiten a RHONA posicionarse como uno de los fabricantes más activos y confiables del mercado en transformación y equipamiento eléctrico, donde se destaca la fabricación del transformador de 130 MVA de mayor potencia fabricado actualmente en Chile.

Junto al desarrollo industrial, RHONA S.A. complementa sus actividades con la comercialización de productos y materiales eléctricos, obteniendo representaciones de marcas de la calidad de MITSUBISHI ELECTRIC y conductores eléctricos COVISA, entre otras. Continuamente se incorporan nuevos productos de uso eléctrico, ya sea en fuerza, control, automatización o iluminación.

La empresa cuenta con oficinas comerciales y bodegas en las ciudades de Antofagasta, Concepción, Santiago, Viña del Mar, Puerto Montt y Lima. La empresa cuenta con una infraestructura industrial y comercial bien equipada, funcional y moderna, para enfrentar cada día los desafíos del mercado.

MISIÓN

Entregar calidad de vida a las personas, aportando un mundo en equipamiento eléctrico [1].

VISIÓN

Ser líder en los mercados donde participemos [1].

VALORES

Orientación al cliente, Innovación, Trabajo en Equipo, Excelencia, Compromiso, Integridad [1].

1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La empresa RHONA S.A. Se ubica en Avenida Variante Agua Santa 4211, Ciudad de Viña del Mar, Quinta región de Chile.

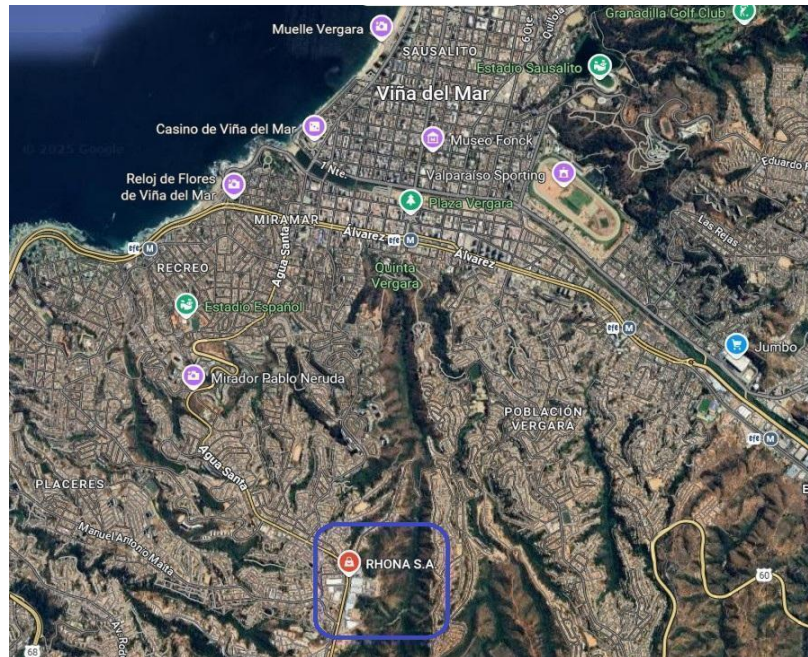


Figura 1-1. Ubicación geográfica

Fuente. Google Map



Figura 1-2. Vista aérea empresa RHONA industrial y comercial.

Fuente: www.rhonaelectric.com

1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

RHONA S.A. se compone de un área comercial e industrial. El área comercial tiene el control de ventas industriales y sucursales comerciales, considerando también toda la logística de la cadena de suministro para abastecer tanto el área industrial como las sucursales comerciales existentes.

En el área industrial de la empresa existen varios departamentos de apoyo que hacen posible el proceso productivo, como se nombran a continuación:

- Programación
- Ingeniería
- Control de proyectos
- Prevención
- Logística y sistema de control de costos
- Control de procesos
- Calidad
- Mantenimiento

El proceso productivo está compuesto por las distintas áreas productivas que van agregando valor al producto, en el siguiente organigrama se presentan las distintas secciones que hacen posible la fabricación del transformador.

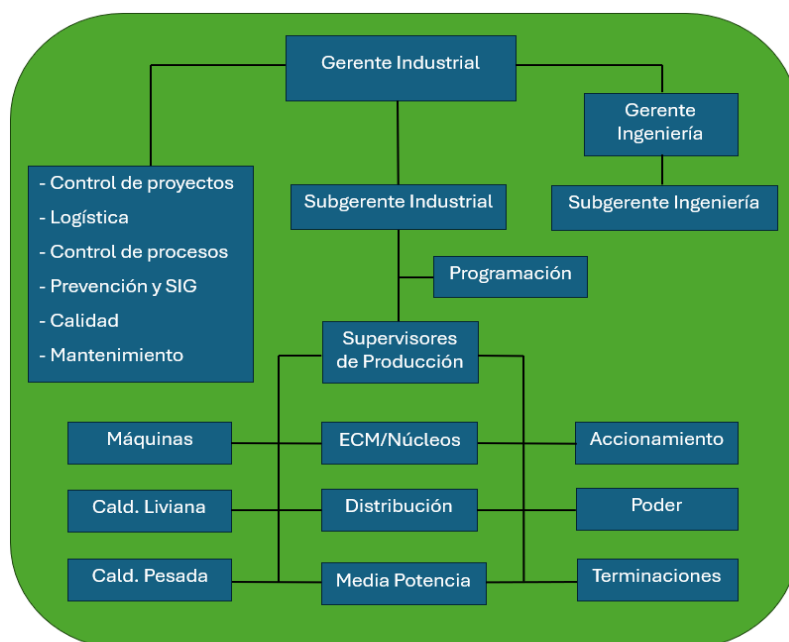


Figura 1-3. Organigrama área industrial

Fuente: Elaboración propia

1.4 MAPA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA FÁBRICA

A continuación, se presenta el flujo de proceso productivo de las distintas áreas de negocio, en donde podemos destacar el potencial que presenta bodega prestando un apoyo importante en las distintas etapas productivas, aportando materias primas, productos semielaborados, insumos, etc.



Figura 1-4. Mapa de proceso productivo de área industrial

Fuente: Elaboración propia

Podemos explicar el proceso que inicia en el área de máquinas donde el área de bodega abastece con planchas de acero ASTM A-36 de espesor 2,5 a 40 mm como materia prima, en esta etapa el material es cortado y plegado, posteriormente es dirigido a las caldererías, donde según el espesor del acero a procesar es dirigido a la siguiente etapa, la calderería liviana procesa desde 2,5 a 5,0 mm y la calderería pesada desde 6,0 a 40 mm, las caldererías aparte de recibir material procesado del área de máquina, recibe de bodega componentes metalmecánicos semielaborados, ambas caldererías siguen la misma

secuencia productiva (armado, soldado, granallado y pintado). Los materiales procesados son dirigidos a las distintas áreas productivas.

El horno en estudio está ubicado en el área de poder, esta área es abastecida con materias primas y componentes semielaborados desde bodega, además de componentes procesados en el área de calderería pesada.

1.5 PROCESO PRODUCTIVO DEL ÁREA DE PODER

En el área de poder se realizan distintas actividades cada una con su determinada complejidad, su proceso es abastecido por elementos semielaborados y materia prima sin procesar, en donde las actividades son programadas y coordinadas con el fin de disponer de los componentes en las distintas fases del proceso de armado de las partes activas, esta área tiene un flujo productivo de envasado de cuatro a seis transformadores de poder por mes, para lograr esta meta existen actividades que se desarrollan en serie y de forma paralela y con distintos niveles de complejidad y precisión, como se puede ver en la figura 1-5.

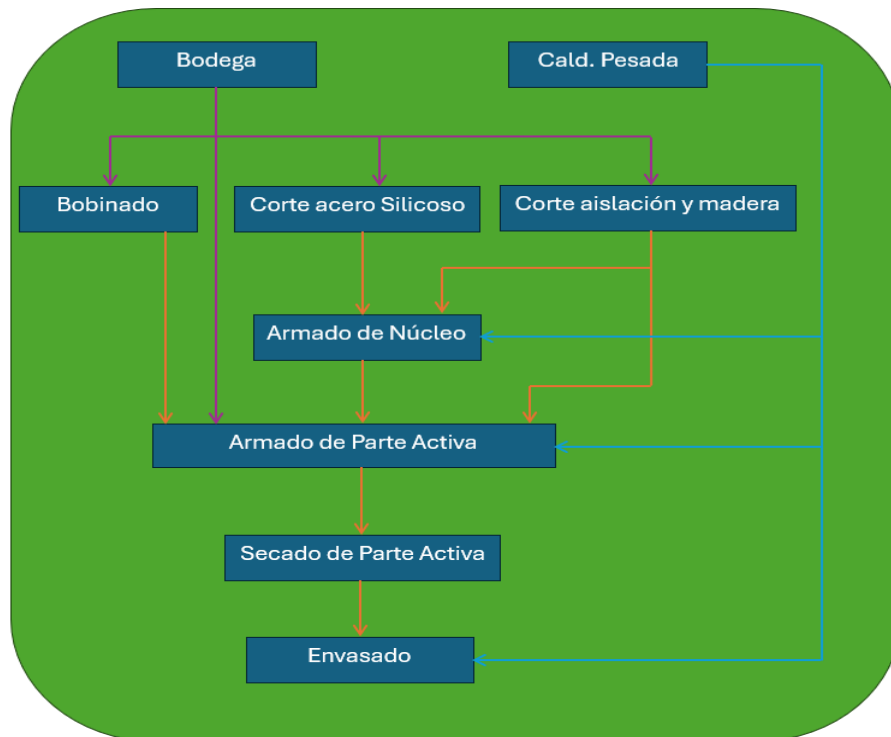


Figura 1-5. Mapa de proceso productivo área de poder

Fuente: Elaboración propia

1.5.1 Corte de acero silicoso

Este proceso se realiza mediante la máquina STEP-LAP, esta genera un corte de gran precisión por medio de cuchillas calibradas sobre los flejes acero silicoso de espesor 0,27 mm, estas láminas son la materia prima para la confección del núcleo del transformador. Esta máquina es operada por un operario, este debe programar la máquina para el corte de acuerdo al diseño eléctrico, documento que detalla dimensiones y cantidades de flejes para la construcción del núcleo.

1.5.2 Corte de aislación y madera

En esta área se procesan la aislación y madera contrachapada, la aislación se compone principalmente de papel nomex, papel orpoxy, papel crepe, papel kraft, cartón prespan en varios espesores desde 0,2 a 6 mm, donde es dimensionado y plegado, la madera contrachapada utilizada comprende desde los 10 a 50 mm de espesor, ambos componentes dimensionados de acuerdo a planos suministrados desde el área de ingeniería.

1.5.3 Bobinado

Esta área cuenta con distintos tipos de bobinadoras, estas son máquinas rotatorias donde se fabrican las bobinas de los transformadores, esta etapa se provee de materia prima del elemento conductor y del elemento aislante, el primero en material de cobre y aluminio, en formato de flejes y cables y el segundo en material de papel nomex, papel orpoxy, papel crepe, papel kraft, cartón prespan duro, cartón prespan blando y madera contrachapada. Cada bobinadora es operada por un bobinador que debe ir confeccionando la bobina de acuerdo con el diseño eléctrico del transformador, documento que detalla la dimensión, cantidad de vueltas del devanado y la aislación a utilizar.

1.5.4 Armado de núcleo

Este es un sector del área dedicado al armado del núcleo del transformador, en donde se ensamblan los flejes de acero silicoso procesados en la cortadora de acero silicoso con la viga o estructura que entrega soporte estructural al conjunto, componente proveniente del área de calderería pesada.

El núcleo puede pesar desde 7 a 40 toneladas (t), por lo que el armado del núcleo presenta una labor minuciosa y delicada ya que se deben ir montando fleje sobre fleje con el cuidado necesario de no dañar los bordes y puntas. Para esta labor se ocupa una mesa de armado para facilitar las maniobras que conlleva este proceso.

1.5.5 Armado parte activa

En esta actividad se presentan dos hitos importantes que se describen a continuación:

A. Embocado de bobinas y cierre del núcleo:

Proceso en el cual se ensamblan las bobinas al núcleo, para esta actividad se debe retirar el yugo superior del núcleo, para permitir el embocado de bobinas en las piernas del núcleo, una vez embocadas las bobinas se procede al cierre del núcleo volviendo a instalar el yugo superior y la viga soporte superior.

B. Interconexión de fases desde bobinas a bushing del transformador:

En esta etapa se canalizan los terminales de las bobinas hacia los bushing de alta y baja tensión, esta etapa se caracteriza por ser de una mano de obra experta, calificada y artesana ya que se debe obtener distancias eléctricas entre cables barras y componentes además de una correcta aislación de los elementos para asegurar que no existan cortocircuitos en las pruebas de rutina. Cabe destacar que el personal que dirige estas actividades debe tener un conocimiento experto en transformadores de poder, conocimiento que se logra con muchos años de trayectoria.

1.5.6 Secado de parte activa

En esta etapa se utiliza un horno de ventilación de aire caliente y secado bajo vacío, equipo sobre el cual se desarrollará el estudio de gestión de mantenimiento,

Una vez concluida la etapa de armado de parte activa, estas son dirigidas al horno para su etapa de secado, especialmente su aislación y madera, estas deben pasar por esta etapa para eliminar humedad que contienen internamente los componentes logrando bajar la humedad contenida en el conjunto especialmente en la aislación por debajo del 0,5%.

El proceso de secado del horno consiste en una serie de ciclos donde en la primera etapa la parte activa es calentada con ventilación de aire caliente hasta los 60°C, posteriormente se inicia una etapa de mantención de la temperatura alcanzada y finalmente se concluye

el ciclo con la etapa de vacío. Después de 4 ciclos consecutivos viene una ventana de reapriete de las uniones emperradas y prensas de la parte activa, etapa que también se desarrolla la prueba de factor de potencia donde se puede proyectar los ciclos que quedan pendientes para un buen secado, posteriormente lo siguen los ciclos 5 y 6 y concluye la etapa de secado. Los distintos ciclos se pueden apreciar en la tabla 1-1.

I T° = Inicio de calentamiento a temperatura definida.

M T° = Mantenimiento de la temperatura alcanzada.

T° M = Temperatura de Apertura de válvulas de horno.

T° A = Temperatura de aceite de calentamiento.

V = Inicio mantenimiento de vacío para extracción de humedad.

R = Proceso de reapriete de la parte activa.

Tabla 1-1. Ciclo de Secado estándar. Fuente: Procedimiento interno de secado [2].

Ciclo	1			2			3			4			R	5			6		
Seteo T [°C] Vacío [mbar] TM(°C) TA(°C)	T°= 60 ° Vacío= 3			T°= 70 ° Vacío= 2			T°= 75 ° Vacío= 1,5			T°= 80 ° Vacío= 1			NA	T°= 80 ° Vacío= 1			T°= 85 ° Vacío= 1		
	T°M=80 ° T°A=120 °			T°M=80 ° T°A=120			T°M=90 ° T°A=120°			T°M=90 ° T°A=120°				T°M=90 ° T°A=120°			T°M=90 ° T°A=130°		
Duración Ciclo [h]	12			12			12			12			8	8			7		
Etapa	IT°	MT°	V	IT°	MT°	V	IT°	MT°	V	IT°	MT°	V	NA	IT°	MT°	V	IT°	MT°	V
Duración Etapa [h]	3	3	6	3	3	6	3	3	6	3	3	6	8	2	2	4	2	2	3
Hr. Inicio	09	12	15	21	24	03	09	12	15	21	24	03	09	17	19	21	01	03	05
Hr. Termino	12	15	21	24	03	09	12	15	21	24	03	09	17	19	21	01	03	05	08
Programa	P1_SR													P2_SR					
Día	1			2						3			4						

Después de concluidos los ciclos establecidos para el correcto secado (pueden ser varios días), el horno es abierto y el personal de laboratorio realiza nuevamente la prueba de calidad de la aislación, denominada prueba de factor de potencia que mide las propiedades de la aislación, si los datos no son aceptables el horno se vuelve a cerrar y se repite el último ciclo de secado hasta una nueva prueba, en cambio si las mediciones son aceptables, concluye la etapa de secado y la parte activa está lista para avanzar a la etapa de envasado.

1.5.7 Envasado

Esta es la etapa final del área de poder, donde la parte activa proveniente de la etapa de secado y el estanque proveniente del área de calderería pesada previamente preparado con sus válvulas y sellos, se unen al encubar la parte activa dentro del estanque, finalizando con el sellado de la tapa al estanque, lo que da forma a la estructura principal del transformador, donde se unen los componentes metalmecánicos y los eléctricos.

El proceso de envasado debe ser de tiempo reducido, porque se realiza al ambiente, esto implica que la parte activa que está con niveles bajos de humedad, comienza nuevamente a impregnarse de humedad ambiental, lo que es perjudicial.

Proceso secuencial de envasado

- A.** Una vez envasado el equipo y logrando la estanqueidad del sello, comienza una etapa de vacío igual o menor a 1 (mbar) por un periodo mínimo de 24 horas
- B.** Transcurrido el tiempo se debe romper el vacío con aire seco hasta la presión atmosférica,
- C.** Con el transformador nuevamente con presión atmosférica se procede a realizar nuevamente la prueba de factor de potencia donde se debe llegar a humedad igual o menor a 0,5%, si no se cumplen los valores se debe volver al punto A.
- D.** Presurizar con aire seco a 4,0 (psi) por 24 horas.
- E.** Cumplido el tiempo de presurización con aire seco, se debe verificar que la presión no sea menor a 2,0 (psi) condición ideal para realizar la prueba de DewPoint, donde el valor obtenido de humedad en la aislación debe ser menor o igual a 0,5%, si no se cumplen los valores esperados se debe repetir el paso A-B-D.
- F.** Concluida satisfactoriamente la prueba de DewPoint se debe aplicar vacío por 2 horas.
- G.** Con el transformador en vacío se realiza el llenado primario con líquido refrigerante inyectando desde el estanque con bomba a través de la máquina de tratamiento, hasta que el líquido alcance 30 cm bajo la tapa del transformador.
- H.** Terminado el llenado primario, se cierran todas las válvulas y se deja el transformador con alto vacío por 6 horas como mínimo, para impregnación de la aislación.
- I.** Romper vacío con aire seco y terminar de llenar el transformador desde el conservador, una vez lleno se deja con vacío desde el conservador por 4 horas mínimo.
- J.** Romper vacío con aire seco. Realizar tratamiento de aceite en la planta de tratamiento, se debe considerar el tiempo necesario para que todo el aceite pase 4 veces por la máquina de tratamiento a una temperatura de 60 a 80°C

K. Una vez terminado el tratamiento, el laboratorio de pruebas debe sacar una muestra de aceite de la válvula inferior y medir:

- Humedad
- Factor de potencia
- Rigidez dieléctrica
- Tensión interfacial

Cuando todas las pruebas están correctas se concluye con las actividades del área de poder y el equipo pasa a la siguiente área de laboratorio de pruebas.

1.6 EXPLICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL HORNO Y SUS SISTEMAS PRINCIPALES

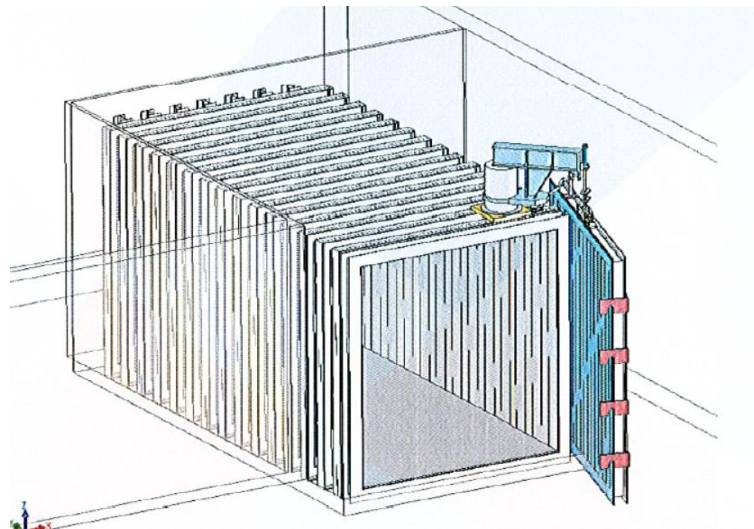


Figura 1-6. Bosquejo isométrico del horno

Fuente: Especificación técnica horno [3].

1.6.1 Características generales del horno

El horno tiene una forma paralelepípedo de un único elemento monobloque de hierro con aislamiento térmico, el horno está ubicado en un subnivel de modo que la mesa del horno quede a nivel con la losa del taller. En el subnivel cuenta con un sistema de

rieles para el recorrido de la plataforma móvil, para facilitar carga de la parte activa dentro del horno.

Cuenta con una puerta articulada, apoyada por un soporte tipo pescante que permite un movimiento elíptico que reduce el espacio para la apertura. ([3], 2012)

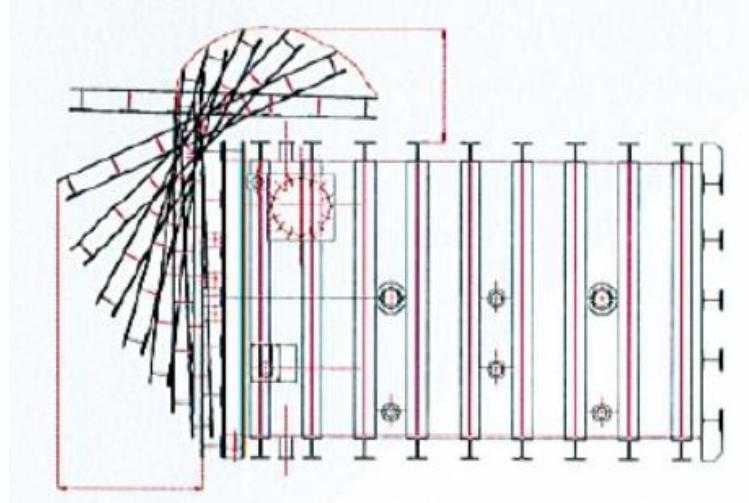


Figura 1-7. Bosquejo vista planta del horno

Fuente: Especificación técnica horno [3].

A. Dimensiones: interiores

Largo : 6.000 mm

Ancho : 3.000 mm

Alto : 5.000 mm

B. Dimensiones exteriores

Largo : 7.300 mm

Ancho : 4.100 mm

Alto : 7.450 mm

C. Energía de operación

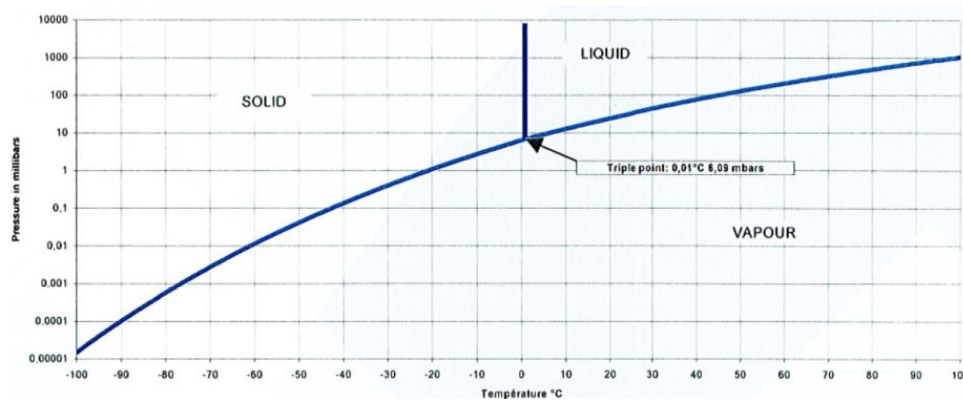
Alimentación Eléctrica : 400 V, trifásica 50 Hz

Potencia : 300 kW de base

1.6.2 Explicación del funcionamiento

Un horno de ventilación de aire caliente y secado bajo vacío utiliza los estados del agua con respecto a presión y temperatura, considerando que a presiones de vacío las partículas de agua se evaporan a menor temperatura que a presión atmosférica. Por ejemplo, si consideramos que la presión atmosférica es 1013 mbar = 1,0 atm el agua se evapora a 100°C, cuando la presión de vacío alcanza aproximadamente los 7,0 mbar, el agua se evapora a 0°C.

Tabla 1-2. Diagrama de fase del agua, Fuente: Especificación técnica horno [3].



En su funcionamiento elimina la humedad de los materiales al forzar la circulación de aire caliente a través de una cámara de vacío. Primero, se aplica calor seco al producto para reducir el contenido de humedad, y el ventilador ayuda a distribuirlo uniformemente. Posteriormente, el sistema de vacío disminuye la presión atmosférica, lo que facilita la evaporación y extracción de la humedad a temperaturas más bajas, protegiendo los materiales sensibles al calor.

1.6.3 Sistema de ventilación de aire caliente (temperatura de operación es de 60 a 90°C)

El proceso de calentamiento se desarrolla a presión atmosférica, por circulación de aire en un circuito abierto.

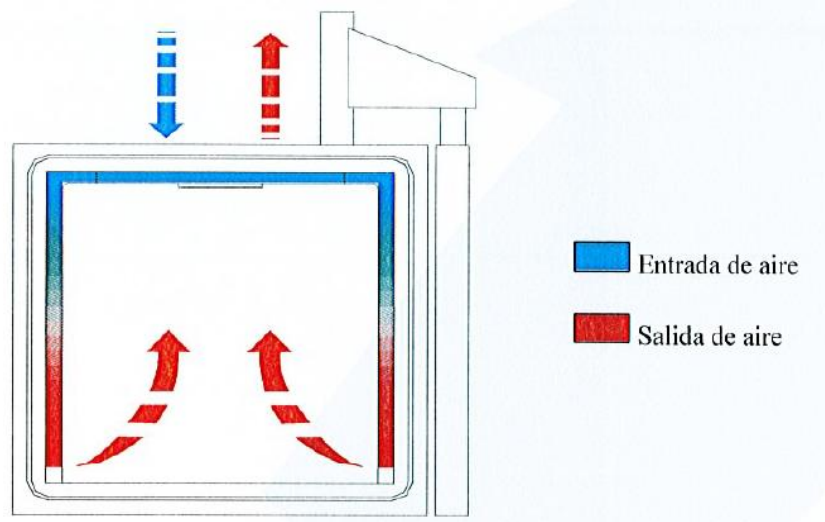


Figura 1-8. Esquema de circulación de aire frío y caliente en horno

Fuente: Especificación técnica horno [3].

Dos motoventiladores accionados por motores eléctricos están ubicados sobre el horno, estos dirigen el aire desde el exterior al interior del horno, canalizando el flujo hacia un ducto rectangular que envuelve los intercambiadores, guiando la descarga del aire caliente a la parte inferior del horno. El aire húmedo y otros vapores son expulsados en la circulación. La energía de calor viene dada por una caldera a partir de resistencia eléctrica, una motobomba hace circular aceite térmico desde la caldera ubicada en el exterior del horno hacia los intercambiadores ubicados en las paredes laterales interiores del horno.

En el interior del horno existen sensores (termocuplas móviles) que son ubicados en las partes activas que se están secando, para medir la temperatura que ha alcanzado en las zonas de interés.

Datos técnicos del proceso:

- Potencia de calentamiento : 250 kW
- Temperatura máxima del aceite térmico : 250°C
- Temperatura del aceite en operación : 200°C 0/+10°C
- Caudal del aceite : 25 m³/h
- Presión : 40 mca
- Potencia eléctrica : 260 kW

1.6.4 Sistema de secado bajo vacío (presión interna del sistema de 760 hasta 0,2 mbar)

El sistema está compuesto por dos bombas de vacío que operan en serie, operando en dos configuraciones “Vacío Inicial y Alto Vacío”, estas se ubican al exterior del horno y su conexión es por medio de una cañería desde el interior del horno al juego de bombas exteriores.

Vacío inicial : En esta etapa la bomba de vacío primaria comienza el inicio del vacío donde extrae gran parte de la humedad del horno (la caída de presión es de 760 a 80 mbar en el circuito de la bomba de vacío).

Alto vacío : En esta etapa operan en serie la bomba primaria y secundaria, para obtener el alto vacío, desde los 80 a 0,2 mbar

Bomba vacío-primaria : Tipo Paleta de 750 (m³/h)

Bomba vacío-secundaria : Tipo Roots de 2.000 (m³/h)

Datos técnicos del proceso:

- Potencia eléctrica : 40 kW
- Presión : 760 a 0,2 mbar

1.6.5 Otros Sistemas

A. Sistema mecánico

El sistema mecánico está presente en distintas zonas del horno, pero se destaca la puerta del horno, el puente basculante y la plataforma móvil.

B. Sistema hidráulico

El sistema hidráulico está presente en el accionamiento puente basculante y en el accionamiento puerta del horno con toda la interconexión de cañerías y la bomba hidráulica.

C. Sistema de control

En la parte exterior se cuenta con dos tableros de control equipados con un PLC, estos son el cerebro del horno, se eligen los tipos de ciclos que se desean aplicar, se monitorea el proceso, la temperatura de operación, presión de vacío, alertas de averías etc.

D. Sistema eléctrico

Existe un tablero general donde uno de sus interruptores es la fuente de alimentación eléctrica del horno y está toda la canalización eléctrica para alimentar a los distintos sistemas del activo.

E. Sistema neumático

Existen válvulas neumáticas en el proceso de ventilación de aire caliente y de secado bajo vacío, estas utilizan el aire comprimido desde el compresor general de la empresa

1.7 PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

El secado de la parte activa es fundamental para el correcto funcionamiento del transformador, el fallo parcial o total de este activo genera consecuencias significativas en el proceso productivo afectando la programación de las órdenes de trabajo, retraso de fechas comprometidas con el cliente, estancamiento de componentes previos al envasado en el área productiva.

Un fallo parcial podría provocar como consecuencia tiempos excesivos en el secado de la parte activa, o en el peor de los casos un secado deficiente, trayendo consigo mayor costo productivo y problemas en las pruebas de calidad de aislación.

Un fallo total detendría el proceso normal de producción generando impactos en las fechas comprometidas con el cliente, también generaría estancamientos de piezas próximas en la secuencia productiva, además de generar costos por no producción considerables según datos provenientes de este estudio, siendo este último de argumento importante para esta problemática.

Otro antecedente importante es que el ciclo de secado de una parte activa en algunas ocasiones tiene una duración de cinco días o más, por ende, un fallo parcial o total genera

tiempos de reproceso considerables en el proceso productivo, equipo que además no tiene redundancia similar.

Actualmente el rubro de la manufactura debe estar siempre a la vanguardia para poder competir con el mercado nacional e internacional, es por esto que se debe buscar permanentemente la reducción de costos en la producción, fomentando la mejora continua de los procesos productivos y de apoyo, reduciendo la incertidumbre y fortaleciendo el manejo y control de los imprevistos, con el fin de generar ventajas frente a la competencia, entre otras.

Existe conciencia que las pequeñas, medianas y las grandes empresas de la industria que utilizan equipos de procesos y maquinarias, están distantes a manejar conceptos de mantenimiento centrados en confiabilidad o análisis de causa raíz, debido a que desde sus inicios las compañías no estiman costos por pérdida productiva o de indisponibilidad de los activos, por ende, no estiman monetariamente el impacto que conlleva este factor y lejos también está el aporte que pueda otorgar un equipo humano de gestión de mantenimiento.

Para las empresas de mayor trayectoria es común que desde sus comienzos han basado su mantenimiento en actividades más correctivas que preventivas, desde la perspectiva profesional será una tarea fundamental persuadir a las altas direcciones para proponer e implementar herramientas de gestión de mantenimiento, conscientes de que existe cierta resistencia a los cambios y a este tipo de gestiones que no tienen un costo definido con respecto a sus ganancias.

Por lo anterior mencionado es que se justifica presentar una mejora en la gestión de mantenimiento a un activo que su fallo genera un gran impacto en la línea productiva, aplicando mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a los sistemas que conforman el horno, seleccionando a partir de un análisis de riesgo cualitativo el sistema más crítico para aplicar la metodología, definiendo para este sistema crítico el riesgo económico actual, posteriormente proponer un plan de mantenimiento y sus costos asociados basado en el árbol lógico de decisiones del RCM, seguido de una estimación económica de riesgo futuro, con el fin de determinar los mantenimientos que se justifican aplicar según su impacto económico. Todo esto con el fin de mejorar la disponibilidad y reducir los costos por fallo del horno.

Además de presentar una guía para la implementación futura de otros sistemas importantes del activo mismo, en busca de la mejora continua.

2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM AL SISTEMA CRÍTICO SELECCIONADO

2.1 MARCO TEÓRICO DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM [4].

[5] plantea que el Reliability Centered Maintenance (RCM) opera como una guía para definir actividades y frecuencias de mantenimiento enfocadas en los activos críticos dentro de su contexto operacional. No corresponde a una fórmula matemática, sino a un proceso cuyo éxito depende del análisis funcional realizado por un equipo natural de trabajo. Este enfoque colaborativo permite desarrollar un sistema de gestión de mantenimiento flexible y alineado con las necesidades reales de la organización, considerando seguridad, medio ambiente, operación y costos.

[6] define el RCM como un método para determinar las necesidades de mantenimiento de cualquier activo físico según su entorno operativo. La norma UNE -EN 13306 [7] entiende el mantenimiento como el conjunto de acciones técnicas y administrativas destinadas a conservar o restaurar la funcionalidad. En línea con esto, Parra describe el RCM [8] como un proceso en el que un equipo multidisciplinario optimiza la fiabilidad operacional mediante actividades basadas en la criticidad y en los efectos de los modos de fallo sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones.

Una adecuada implementación del RCM permite definir estrategias de mantenimiento eficaces que aseguren estándares productivos y maximicen la rentabilidad de los activos. Sus principales características incluyen: ajuste de estrategias al contexto operacional, aplicación de un procedimiento sistemático para planes óptimos, presenta un mayor impacto en sistemas complejos con múltiples modos de fallo y necesidad de un periodo de maduración para evidenciar beneficios sostenibles.

Finalmente, la metodología RCM se estructura en la identificación de necesidades reales de mantenimiento mediante el análisis de las siete preguntas fundamentales descritas por [9], [10].

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de ejecución asociados con el activo en su actual entorno de operación?
2. ¿En qué forma falló el equipo, con respecto a la función que cumple en el contexto operacional?
3. ¿Qué causa cada fallo funcional?
4. ¿Qué ocurre cuando sucede un fallo?

5. ¿Cómo impacta cada fallo?

6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada fallo funcional?

7. ¿Qué puede hacerse si no se conoce una tarea de prevención adecuada a este fallo?

Estas preguntas se van respondiendo a medida que se avanza en el proceso de implantación del RCM ordenada y metódicamente.

2.1.1 Procedimiento de implementación de la técnica RCM

Para una correcta aplicación de la metodología RCM, es necesario seguir una secuencia de pasos definida por [11], donde se considera una fase inicial y una fase de implementación del RCM según el flujograma presentado en la figura 2-1.

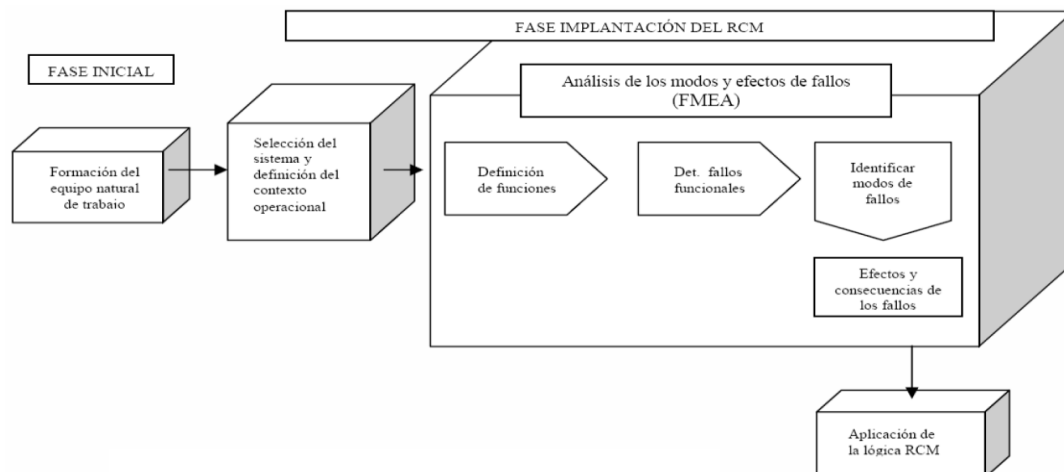


Figura 2-1. Flujograma de implantación del RCM

Fuente: [4].

2.1.2 Formación del equipo natural de trabajo

Para aplicar correctamente la metodología es necesario conformar un equipo multidisciplinario de profesionales con el fin de contar con un enfoque integral al momento de la toma de decisiones que se definirán en las reuniones del equipo RCM.



Figura 2-2. Formación del equipo natural de trabajo

Fuente: [4].

El grupo de trabajo debe incluir los siguientes participantes:

- Personal de Operación: experto en manejo de sistemas y equipos, el personal que participa directamente en la operación diaria de los equipos es una valiosa fuente de información.
- Personal de Mantenimiento: expertos en reparación y mantenimiento de sistemas y equipos.
- Ingeniero de Procesos: aporta visión global de los procesos.
- Programador: aporta visión sistémica de la actividad.
- Especialista externo: experto en un área específica. En ocasiones, también es interesante incluir al fabricante del equipo.
- Facilitador: asesor experto en la metodología RCM.

El objetivo de cada grupo de trabajo es aplicar la metodología RCM para definir las necesidades de mantenimiento de un activo o de una parte específica del proceso. Para que el grupo sea efectivo, se debe fomentar la participación abierta en un ambiente relajado, donde los desacuerdos se discutan hasta alcanzar resolución. No se establecen jerarquías internas: todas las opiniones son escuchadas, las sugerencias son bienvenidas y el apoyo externo se utiliza cuando resulta pertinente. El compromiso colectivo y la aceptación del objetivo común son esenciales.

El éxito en la implantación del RCM depende del consenso del equipo, por lo que ninguna decisión se adopta sin consenso del equipo. Cada integrante contribuye según su experiencia en cada fase del proceso.

Dentro del equipo natural de implantación, el facilitador cumple un rol crítico. Su responsabilidad es guiar y ordenar el proceso de aplicación del RCM, asegurando que se ejecute de manera estructurada y eficaz. Para ello, debe desarrollar diversas actividades orientadas a conducir y coordinar los trabajos del grupo.

Guiar al equipo de trabajo en la realización del análisis de los modos y efectos de fallos (FMECA), y en la selección de las actividades de mantenimiento.

- Ayudar a decidir a qué nivel debe ser realizado el análisis de modos y efectos de fallos.
- Ayudar a identificar los activos que deben ser analizados bajo la metodología RCM.
- Asegurar que las reuniones de trabajo sean conducidas de forma profesional y se lleven a cabo con fluidez y normalidad.
- Asegurar un verdadero consenso en las decisiones.
- Motivar al equipo de trabajo.
- Asegurar que toda la documentación a registrar durante el proceso de implantación del RCM sea conducida correctamente.

El perfil y las habilidades del facilitador son determinantes en la calidad de los resultados del RCM. Su desempeño influye directamente en la solidez técnica del análisis, en la velocidad de ejecución y en la actitud del equipo frente a la metodología. El facilitador debe contar con gran capacidad de análisis, elevado nivel técnico y cualidades personales como liderazgo, credibilidad, seguridad y confianza, además de habilidades para dirigir reuniones y comunicarse eficazmente.

2.1.3 Selección del sistema

El primer paso en la implantación del RCM es seleccionar los sistemas o equipos que serán analizados. Para ello, debe definirse qué parte de las instalaciones será incluida y cuál quedará excluida. Una vez delimitado el sistema, se identifica su composición siguiendo una estructura en árbol hasta llegar al nivel mínimo indivisible desde el punto de vista del mantenimiento. Aunque dicha estructura no siempre es estrictamente jerárquica (por ejemplo, en subsistemas con bucles de control), estos elementos deben ser tratados como unidades indivisibles para mantener una estructura de árbol pura.

La definición del sistema y de sus límites requiere responder dos preguntas clave:

1.-¿Cuál es el nivel de detalle necesario para el análisis de modos y efectos de fallo?

2.-¿Debe analizarse toda el área seleccionada o solo una parte, y con qué prioridad deben evaluarse los diferentes sectores?

El nivel de detalle depende de la división existente en la organización: negocio, áreas, sistemas, equipos y partes. En este contexto:

Parte (ítem mantenible): unidad mínima que puede ser desensamblada sin dañarse, como sellos, acoples, rodamientos o relés.

Sistema/Equipo: conjunto de partes que cumple una función independiente (motor, bomba, compresor, transformador, etc.).

Área: grupo de sistemas que genera un producto o servicio (área de secado, líneas de transmisión).

Negocio: conjunto de procesos que provee uno o varios productos o servicios (generación de vapor, energía, etc.).

La experiencia indica que el nivel más eficaz para aplicar RCM es el de **sistema/equipo**, debido a que suele existir mayor información disponible para su análisis.

Es fundamental seleccionar adecuadamente el nivel de detalle del FMECA: un análisis demasiado granular (a nivel de partes) puede ser complejo e impracticable, mientras que uno demasiado general (a nivel planta) resulta superficial e insuficiente para la gestión del mantenimiento.

Definido el nivel sistema, el grupo de trabajo debe identificar todos los sistemas del área seleccionada y luego jerarquizarlos según criterios de criticidad e importancia dentro del contexto operacional.

2.1.4 Técnicas de análisis de criticidad aplicadas en proceso RCM

Las técnicas de análisis de criticidad permiten jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos según su impacto global, optimizando así la asignación de recursos económicos, humanos y técnicos. Un método cualitativo ampliamente utilizado en RCM es la jerarquización mediante matrices de criticidad, las cuales permiten evaluar el riesgo combinando la probabilidad de ocurrencia de fallos y la severidad de sus consecuencias. Dado que la criticidad puede interpretarse de distintas formas según los objetivos y necesidades de la organización, existen diversas herramientas para su evaluación.

Para realizar un análisis de criticidad se debe:

- Definir alcance y propósito.
- Establecer los criterios o atributos relevantes.
- Seleccionar o diseñar un método para jerarquizar los sistemas.

Los criterios de importancia dependen del contexto organizacional y del objetivo del análisis, aunque comúnmente se consideran atributos como seguridad, ambiente, producción, costos operativos y de mantenimiento, frecuencia de fallos y tiempo promedio de reparación. Los resultados obtenidos constituyen el insumo fundamental para iniciar cualquier proceso RCM.

2.1.5 Factores ponderados para la empresa RHONA S.A.

A continuación, se presentan factores ponderados por la empresa RHONA S.A. diseñados para el proceso de jerarquización de factores de frecuencia y consecuencia de fallos.

El alcance de este análisis es la exposición de todos los sistemas importantes y que presentan fallos conocidos y no conocidos en el ciclo de vida del horno, para su análisis de criticidad, con el fin de definir un sistema que presente mayor impacto considerando el factor de riesgo cualitativo que se define como el producto entre la frecuencia y la consecuencia:

Riesgo = Frecuencia de Fallos x Consecuencias

Donde:

Frecuencia de fallos = Número de fallos en un tiempo determinado

Consecuencias:

(Tiempo para Reparar), (Costos de Mantenimiento) y (Impacto Seguridad, Higiene y Medio Ambiente)

Para la evaluación de las consecuencias se considerará ponderaciones definidas por el dueño del activo que en este caso es el Gerente Industrial, donde considera la ponderación según los ítems de mayor impacto.

- Tiempo para reparar TPR con un porcentaje de 80%
- Costo de mantenimiento correctivo por fallo CM con un porcentaje de 15%
- Impactos en seguridad higiene y medio ambiente SHA, con un porcentaje de 5%

2.1.5.1 Definición de la frecuencia para la matriz de criticidad

- 1- Excelente : Una ocurrencia igual o mayor a 18 meses
- 2- Bueno : Una ocurrencia igual o mayor a 12 meses
- 3- Promedio : Una ocurrencia igual o mayor a 8 meses
- 4- Pobre : Una ocurrencia igual o mayor a 3 meses
- 5- Muy Pobre : Una ocurrencia menor a 3 meses

2.1.5.2 Definición de la consecuencia para la matriz de criticidad

Tiempo para reparar (TPR) ponderación 80%

- 1- Excelente : Menor a 4 horas
- 2- Bueno : Mayor o igual a 4 horas
- 3- Promedio : Mayor o igual a 8 horas
- 4- Pobre : Mayor o igual a 12 horas
- 5- Muy Pobre : Mayor o igual a 16 horas

Costo de Mantenimiento (Costo/Fallo) ponderación 15%

- 1- Excelente : Menor a \$300.000
- 2- Bueno : Mayor o igual a \$300.000
- 3- Promedio : Mayor o igual a \$500.000
- 4- Elevado : Mayor o igual a \$700.000
- 5- Muy Elevado : Mayor o igual a \$1.000.000

Impacto en seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) ponderación 5%

- 1- Riesgo Muy Bajo : No genera ningún riesgo en seguridad y ambiental
- 2- Riesgo Bajo : Lesión menor sin pérdida de trabajo y/o incidente ambiental sin afectación a la normativa vigente
- 3- Riesgo Medio : Lesión menor con pérdida de trabajo y/o afectación al ambiente controlable
- 4- Riesgo Alto : Lesión incapacitante y/o afectación sensible al ambiente
- 5- Riesgo Muy Alto : Muerte y/o Alto Impacto Ambiental

2.1.5.3 Matriz de criticidad

Los resultados obtenidos del análisis de factores se reflejarán en una matriz de criticidad de 5x5, donde el eje vertical está formado por 5 niveles de frecuencia de fallos, y en el eje horizontal están graduados los niveles de consecuencia de los fallos, como muestra la tabla 2-1.

Tabla 2-1. Matriz de criticidad. Fuente: Elaboración propia

Frecuencia	5	M	A	A	C	C
	4	M	A	A	C	C
	3	B	M	A	A	A
	2	B	M	M	A	A
	1	D	B	B	M	M
		1	2	3	4	5
		Consecuencias				

Las zonas de criticidad que se presentan en esta matriz son las siguientes:

D : Riesgo Despreciable

B : Riesgo Bajo

M : Riesgo Medio

A : Riesgo Alto

C : Riesgo Catastrófico

2.1.5.4 Ejemplo análisis de criticidad a partir del factor de riesgo

Si un componente presenta una frecuencia de nivel 2 y la consecuencia está determinada por un TPR de nivel 3, CM nivel de 2 y un SHA de nivel 1, la consecuencia estaría determinada por el cálculo siguiente:

$$\text{Consecuencia: } 3 \times 80\% + 2 \times 15\% + 1 \times 5\% = 2,75$$

Se aplicará la siguiente regla de redondeo, números decimales de 1,2,3,4, tomarán el valor inferior, números decimales de 5,6,7,8,9 tomarán el valor superior. Por ejemplo, si tomamos el caso del ejemplo anterior de la consecuencia resultante, el valor de 2,75 se redondea a 3.

Considerando la frecuencia de nivel 2 y la consecuencia de nivel 3 obtenemos en la matriz de criticidad un **riesgo medio** como se observa en la tabla 2-2.

Tabla 2-2. Ejemplo selección matriz de criticidad. Fuente: Elaboración propia

Frecuencia	5	M	A	A	C	C
	4	M	A	A	C	C
	3	B	M	A	A	A
	2	B	M	M	A	A
	1	D	B	B	M	M
		1	2	3	4	5
		Consecuencias				

2.1.6 Definición del contexto operacional del RCM

Una vez identificados los sistemas críticos, la metodología RCM establece la necesidad de desarrollar su contexto operacional. Este debe considerar lo siguiente:

- **Resumen operativo:** definir el propósito del sistema, describir equipos, procesos y dispositivos de seguridad, así como metas de seguridad, medio ambiente y planes futuros.
- **Personal:** detallar turnos, operaciones realizadas y parámetros de calidad.
- **División de procesos:** delimitar el sistema, establecer límites y listar componentes, incluidos indicadores y dispositivos de seguridad.

La información inicial requerida para elaborar el contexto operacional incluye: perfil y ambiente de operación, calidad y disponibilidad de entradas (combustible, aire, etc.), alarmas y sistemas de monitorización, políticas de repuestos y logística, además de P&IDs, esquemas del sistema y diagramas de bloque.

Para facilitar la visualización del contexto operacional, se recomienda el uso de diagramas Entrada-Proceso-Salida (EPS), donde se identifican las principales entradas, actividades del proceso y salidas del sistema.

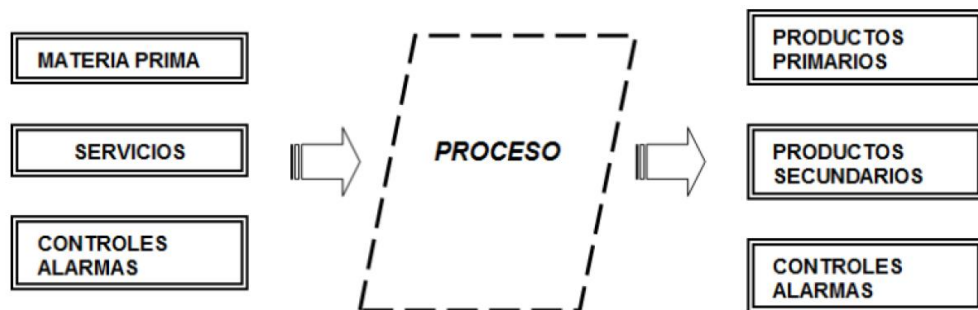


Figura 2-3. Diagrama entrada-proceso-salida

Fuente: [4].

Los elementos clave del diagrama EPS se estructuran en entradas, procesos y salidas.

Entradas:

Materia prima: recursos que el sistema transforma (electricidad, agua, aire, gas, crudo, etc.).

Servicios: recursos auxiliares necesarios para el proceso (agua, electricidad, vapor, etc.).

Controles: señales de los sistemas de control que afectan al proceso; no suelen registrarse como funciones independientes, ya que su fallo se manifiesta como pérdida de señal en alguna salida.

Procesos:

Se describen como funciones específicas que ejecuta el sistema en un punto determinado del proceso. Esta definición permite focalizar el análisis de mantenimiento en las funciones críticas y determinar las actividades necesarias para garantizar su cumplimiento dentro del contexto operacional.

Salidas:

Productos primarios: representan el propósito principal del sistema, definidos por tasas de producción y estándares de calidad.

Productos secundarios: funciones derivadas que, al perderse, pueden comprometer las funciones primarias y generar consecuencias severas.

Controles y alarmas: asociadas a funciones de protección y supervisión del sistema.

2.1.7 Desarrollo del análisis de modos, efectos y criticidad de fallos FMECA

El Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMECA) es la herramienta central del RCM para optimizar la gestión del mantenimiento, ya que permite responder las primeras cinco preguntas básicas de la metodología [12]. Se trata de un método sistemático que identifica fallos potenciales antes de que afecten los procesos o productos dentro de un contexto operacional.

A través del análisis realizado por los grupos de trabajo, el FMECA proporciona la información necesaria para anticipar consecuencias y seleccionar las actividades de mantenimiento más adecuadas. Dichas acciones se definen para abordar cada modo de fallo y mitigar sus efectos, asegurando la continuidad funcional del activo, ver figura 2-4.

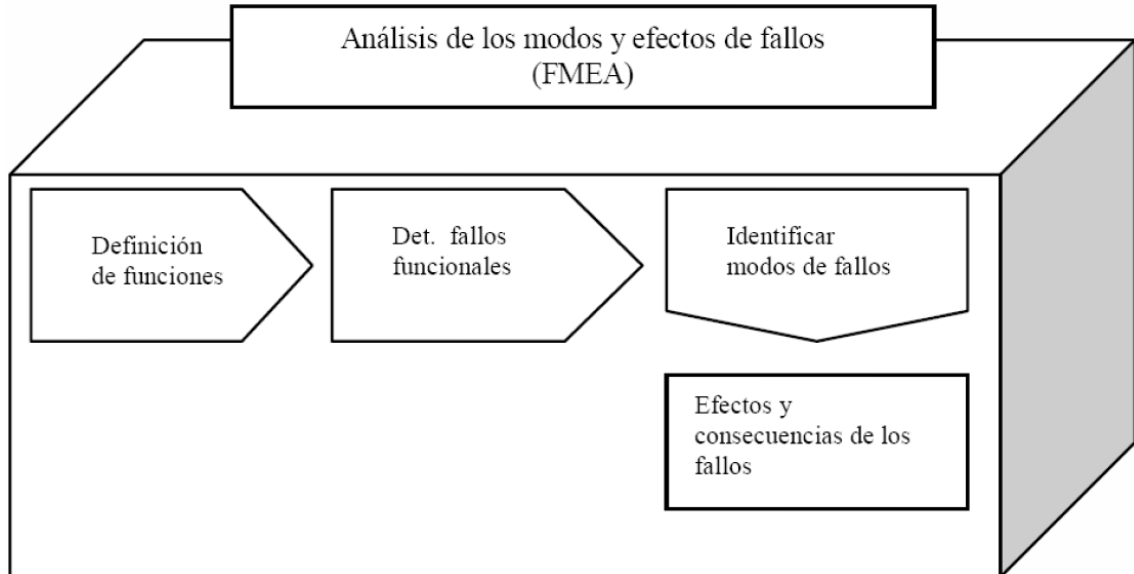


Figura 2-4. Esquema de aplicación del análisis modo efecto y fallos.

Fuente: [4].

El objetivo básico del FMECA es encontrar todas las formas o modos en los que puede fallar un activo dentro de un proceso, e identificar las posibles consecuencias de los fallos en función de tres criterios básicos en el RCM: seguridad higiene y medio ambiente e impacto en la producción.

Para cumplir este objetivo, los grupos de trabajo deben realizar el FMECA siguiendo la siguiente secuencia:

- Definir las funciones de los activos y sus respectivos estándares de operación/ejecución.
- Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo.
- Definir los modos de fallos asociados a cada fallo funcional.
- Establecer los efectos y consecuencias asociados a cada modo de fallo.

2.1.7.1 FMECA, definición de funciones y estándares de ejecución

Una función es el propósito que cumple un activo dentro de un contexto operacional específico. La metodología RCM distingue varios tipos:

Funciones primarias: representan la misión principal del activo dentro del proceso, Ej: una bomba debe impulsar fluido de un punto a otro.

Funciones secundarias: capacidades adicionales asociadas al activo, como contención de fluidos, soporte estructural, apariencia (protección anticorrosiva o visibilidad), higiene y seguridad, protección a personas y equipos, y control mediante medición y supervisión de variables (temperatura, presión, flujo).

Funciones subsidiarias: actividades complementarias realizadas por equipos especiales que no inciden directamente en el producto final.

Para identificar incumplimientos funcionales, el grupo de trabajo debe definir los **estándares de ejecución**, entendidos como parámetros que especifican y cuantifican el desempeño esperado. Un activo puede tener múltiples estándares, usualmente vinculados a sus salidas, aunque también existen estándares relacionados con calidad del producto, seguridad, eficiencia energética y medio ambiente.

El estándar de calidad exige que los productos cumplan las especificaciones requeridas, lo que depende directamente del desempeño de los activos involucrados. Por su parte, los estándares ambientales obligan a conocer con precisión las posibles consecuencias de fallos que puedan generar impactos ambientales, dado el creciente rigor de las normativas.

2.1.7.2 FMECA, definición de fallos funcionales

Una vez definidas las funciones de un activo dentro de su contexto operacional, el siguiente paso es determinar cómo puede dejar de cumplirlas. Esta pérdida de capacidad es lo que en RCM se denomina **fallo funcional**.

Un fallo funcional es una condición inesperada que impide al activo alcanzar el desempeño requerido en su contexto operacional. Su impacto depende de las consecuencias que genere dentro del proceso. Los fallos funcionales pueden manifestarse de dos formas:

Pérdida total: el activo deja de operar de manera súbita.

Pérdida parcial: el activo no alcanza el estándar de ejecución esperado, operando de forma ineficiente o fuera de límites tolerados.

La definición de fallo funcional depende estrictamente del contexto operacional, por lo que activos idénticos pueden presentar fallos funcionales distintos según su entorno de uso.

2.1.7.3 FMECA, definición de modos de fallos

Los fallos funcionales tienen causas físicas, estas causas físicas son definidas por la metodología RCM como modos de fallos (causas físicas que provocan los fallos funcionales totales o parciales). Las actividades de prevención, anticipación o corrección según el RCM, deben estar orientadas a atacar modos de fallos específicos. Esta afirmación, constituye una de las mayores diferencias entre el RCM y la forma tradicional de gestionar el mantenimiento, es decir, que, para el RCM, las actividades de mantenimiento generadas a partir del análisis realizado por el grupo de trabajo RCM, atacarán específicamente a cada uno de los modos de fallos asociados a cada fallo funcional (cada fallo funcional puede tener más de un modo de fallo).

El nivel al cual se gestiona el mantenimiento de un activo se relaciona con el nivel al cual se identifica el modo de fallo. Muchas veces el nivel al cual se identifica el modo de fallo no corresponderá al nivel de detalle seleccionado para analizar el activo y sus funciones, por lo cual, para poder desarrollar un sistema de gestión de mantenimiento de un determinado grupo de activos en un contexto operacional, es necesario identificar el nivel al cual se producirán los distintos modos de fallos asociados a las funciones de un activo en su actual contexto operacional.

En el proceso de análisis de modos de fallos, el grupo de trabajo buscará información consultando:

- Listas genéricas de modos de fallos.
- Personal de operación y/o mantenimiento que haya tenido una larga asociación con el activo.
- Registros e historiales técnicos existentes del activo.
- Fabricantes y vendedores de activos.
- Otros usuarios del mismo activo.

2.1.7.4 FMECA, definición de los efectos y análisis de criticidad de los modos de fallos

En esta fase del proceso RCM, el objetivo es identificar qué ocurre en el contexto operacional cuando se presenta cada modo de fallo. La descripción de los efectos debe incluir toda la información necesaria para evaluar sus consecuencias. Para ello, el grupo de trabajo debe responder tres preguntas clave:

A. ¿Cómo se evidencia el modo de fallo?

Debe especificarse si el fallo se manifiesta mediante señales físicas o funcionales (ruidos, humo, variaciones de parámetros, alarmas, etc.).

B. ¿Cómo afecta a la seguridad y al medio ambiente?

Se debe determinar si el fallo puede generar lesiones, incumplimientos ambientales o situaciones de riesgo, considerando mala operación, caídas de objetos, sobrepresiones o derrames.

C. ¿Cómo impacta en la producción y operaciones?

Es necesario definir la severidad del impacto en el proceso productivo, incluyendo pérdidas de producción, deterioro de la calidad, aumento de costos o detenciones del proceso. Idealmente, estos impactos deben cuantificarse económicamente.

El efecto real de un modo de fallo depende del contexto operacional, del estándar de ejecución requerido y de las consecuencias físicas generadas. La interacción de estos factores determina cómo afecta a la seguridad, al ambiente y a las operaciones.

El RCM clasifica los modos de fallo en cuatro categorías:

Consecuencias ocultas: asociadas a funciones no evidentes (equipos de respaldo, control o seguridad). No son detectables durante la operación normal y solo se evidencian junto a otro fallo.

Consecuencias sobre la seguridad o el ambiente: afectan directamente a personas o al entorno.

Consecuencias operacionales: impactan la producción, calidad, costos operativos o de reparación.

Consecuencias no operacionales: no afectan seguridad ni operación; solo generan costos directos de reparación.

Las consecuencias de los modos de fallo se determinan según diagrama presentado en la figura 2-5.

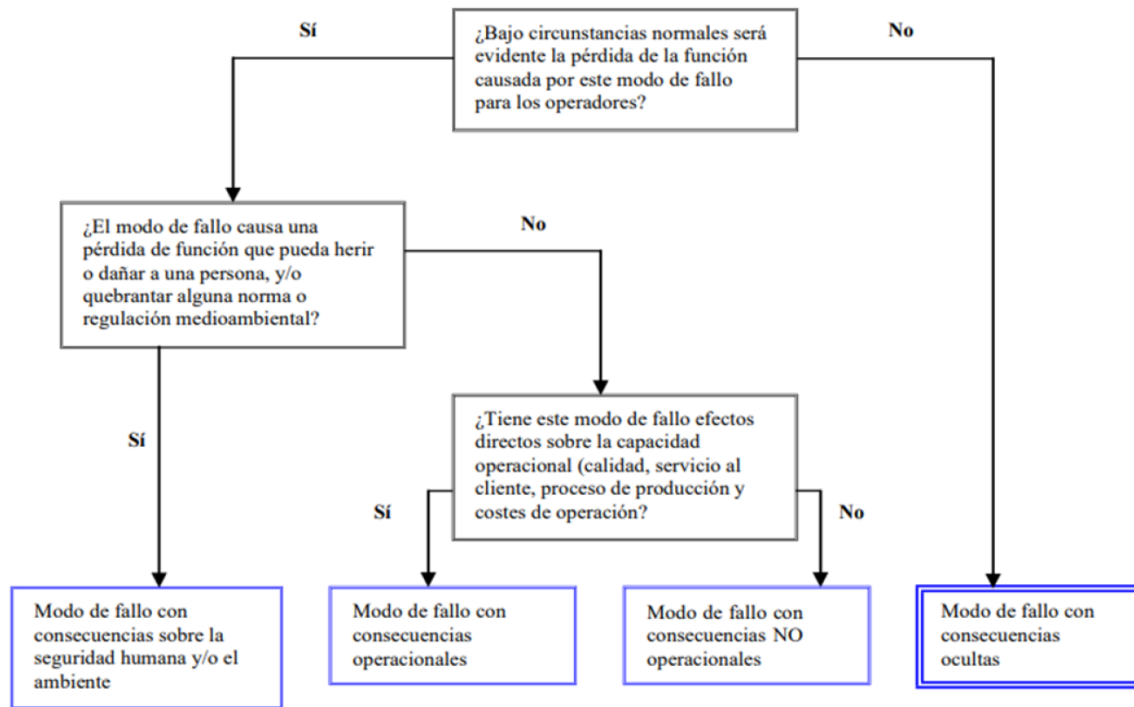


Figura 2-5. Diagrama para determinar las consecuencias de los modos de fallos.

Fuente: [4].

Para la descripción de los efectos se ha diseñado una guía de preguntas que permiten simplificar la evaluación de las consecuencias de los modos de fallos:

- A. ¿Qué evidencias hay de que ocurrió el fallo?
- B. ¿De qué manera afecta la seguridad y al ambiente?
- C. ¿De qué manera afecta la producción o las operaciones?
 - a. ¿Cuáles son los efectos operacionales?
 - b. ¿Es necesario parar el proceso?
 - c. ¿Hay impacto en la calidad? ¿Cuánto?
 - d. ¿Hay impacto en el servicio al cliente?
 - e. ¿Se producen daños a otros sistemas?
 - f. ¿Qué tiempo se requiere para reparar el fallo (acciones correctivas)?
 - g. ¿Cuánto es la pérdida económica por el fallo (costos directos, impacto en la operación, costos en seguridad y ambiente, etc.)

2.1.7.5 FMECA cálculo del riesgo económico actual

Para este estudio el equipo natural de trabajo define el cálculo del riesgo económico actual, mediante la siguiente fórmula:

$$R_{AE} = \text{Riesgo Económico Actual} = F_F * [(T_{PR} * I_P) + C_{MO} + C_{MAT} + C_{MAQ} + C_{SHA}]$$

Donde **FF**: Frecuencia de fallos por año (FF/Año); **TPR**: Tiempo para reparar en horas por fallo (Horas/Fallo); **IP**: Impacto en la producción en pesos por hora de no operatividad (\$/Hora); **CMO**: Costo mano de obra en pesos por fallo (\$/Fallo); **CMAT**: Costo Materiales en pesos por fallo (\$/Fallo); **CMAQ**: Costo de maquinaria en pesos por fallo (\$/Fallo) y **CSHA**: Costo de seguridad higiene y medio ambiente en pesos por fallo (\$/Fallo).

2.1.8 Proceso de selección de las estrategias de mantenimiento (árbol lógico de decisiones del RCM)

Una vez realizado el FMECA, el equipo natural de trabajo deberá seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de fallo previamente identificado, a partir del árbol lógico de decisión del RCM (herramienta diseñada por el RCM, que permite seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento más adecuada para evitar los posibles efectos de cada modo de fallo). Luego de seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento a partir del árbol lógico de decisión, se tiene que especificar la acción de mantenimiento a ejecutar asociada al tipo de actividad de mantenimiento seleccionada, con su respectiva frecuencia de ejecución, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales del RCM, es evitar o al menos reducir las posibles consecuencias a la seguridad, higiene, medioambiente y a las operaciones, que traerán consigo la aparición de los distintos modos de fallo. El equipo de trabajo debe identificar el tipo de actividad de mantenimiento, apoyándose en el árbol lógico del RCM, ver figura 2-6. Tras seleccionar el tipo de actividad adecuada, se procede a especificar la acción de mantenimiento concreta a ejecutar y la frecuencia de ejecución.

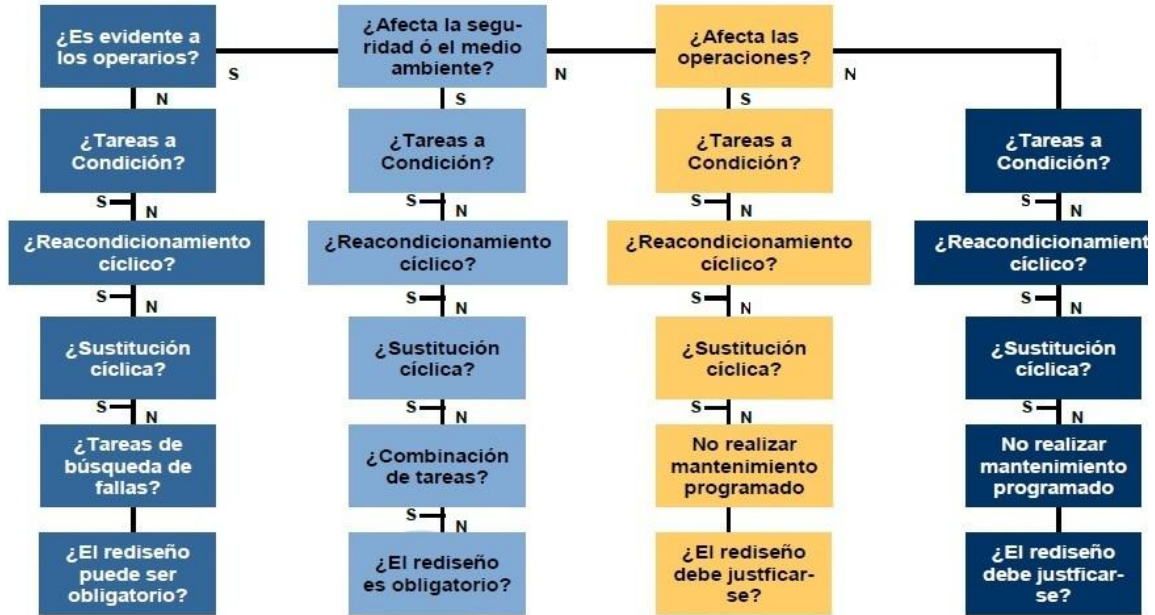


Figura 2-6. Árbol lógico de decisiones del RCM.

Fuente: [4].

El RCM clasifica las actividades de mantenimiento en dos grandes grupos: las actividades preventivas (proactivas) y las actividades correctivas, estas últimas se ejecutarán sólo en el caso de no encontrar una actividad efectiva de mantenimiento preventivo. Cada grupo de actividades de mantenimiento tiene sus respectivos tipos de tareas de mantenimiento, las cuales se detallan a continuación.

2.1.8.1 Actividades de mantenimiento preventivas (proactivas)

Para la metodología de RCM, las actividades de mantenimiento preventivas se dividen en 4 categorías: Véase también el punto 13 de la NORMA SAE JA1012 [13].

A. Tareas programadas en base a condición: Estas actividades predictivas se fundamentan en que la mayoría de los modos de fallo no ocurren de manera súbita, sino que se desarrollan progresivamente. Cuando es posible detectar indicios del fallo durante la operación normal, pueden aplicarse acciones basadas en la condición del activo para prevenir su ocurrencia y mitigar sus consecuencias.

El punto en el que el fallo puede ser identificado antes de que se materialice se denomina **fallo potencial**, definido como una condición física detectable que indica que el fallo

funcional está comenzando o es inminente. Ejemplos típicos incluyen: incremento anormal de vibraciones por daño en rodamientos, grietas que anticipan fallos por fatiga, partículas metálicas en aceite que evidencian desgaste de engranajes, o puntos calientes que anuncian deterioro de refractarios en una caldera.

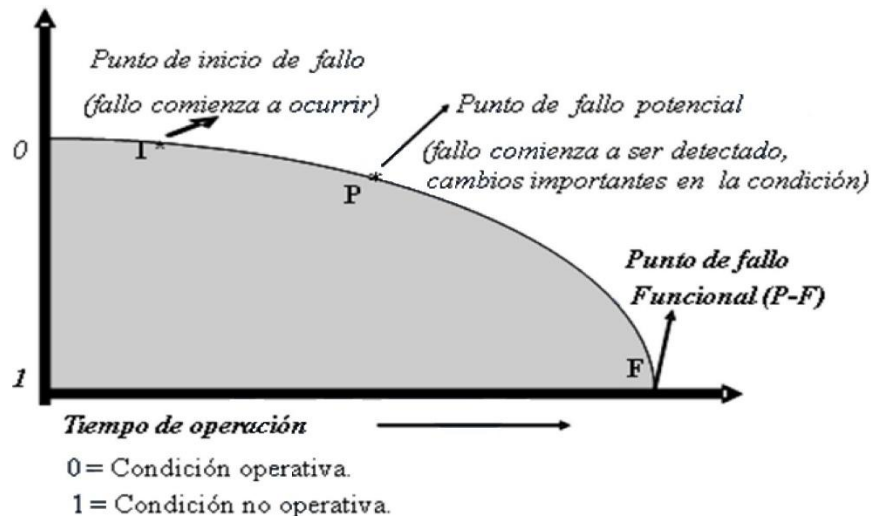


Figura 2-7. Curva PF de comportamiento de fallos potenciales

Fuente: PhD. MSc. Eng. Carlos Parra

El comportamiento en el tiempo de gran parte de los distintos tipos de modos de fallos cuya evidencia por condición puede monitorizarse, se presenta en la figura 2-7. En esta figura, se muestra como un fallo comienza a ocurrir (punto de inicio “I”, muchas veces este punto no puede ser detectado), incrementado su deterioro (condición a medir) hasta el punto en el cual el fallo puede ser detectado (punto de fallo potencial “P”). Si en este punto el fallo no es detectado y corregido, continúa aumentando su deterioro (usualmente de forma acelerada) hasta que alcanza el punto donde se produce el fallo funcional (punto “F”, el activo ha dejado de cumplir su función).

B. Tareas de reacondicionamiento: Son las actividades periódicas que se llevan a cabo para restaurar un activo a su condición original, es decir, actividades de prevención realizadas a los activos a un intervalo de frecuencia menor al límite de vida operativo del activo, en función del análisis de sus funciones en el tiempo. En este tipo de actividades, el activo es puesto fuera de servicio, se realiza una inspección general y se reemplazan, en caso de ser necesario, las piezas defectuosas. Las tareas de restauración programadas son conocidas como overhauls, y su aplicación más común es en equipos mayores: compresores, turbinas, calderas, etc.

C. Tareas de sustitución-reemplazo programado: Este tipo de actividad está orientada específicamente hacia el reemplazo de componentes o partes usadas de un activo a un intervalo temporal inferior al de su vida útil (antes que se produzca el fallo). Las actividades de reemplazo devolverán la condición original al componente, ya que se sustituye uno viejo por uno nuevo, la diferencia con las anteriores es simplemente que éstas inciden en los componentes y las de reacondicionamiento involucran a todos los componentes de un equipo mayor, además de que un overhaul no implica una sustitución de piezas viejas, sino que puede limitarse a acciones de limpieza, reparación o inspección.

D. Tareas de búsqueda de fallos ocultos: Tal y como se definió en apartados precedentes, los modos de fallos ocultos no son evidentes bajo condiciones normales de operación, por lo que este tipo de fallos no tienen consecuencias directas, pero estas consecuencias pueden propiciar la aparición de fallos múltiples dentro de un contexto operacional. Uno de los caminos que puede ayudar a minimizar los efectos de un fallo múltiple es tratar de disminuir la probabilidad de ocurrencia de fallos

2.1.8.2 Actividades de mantenimiento correctivas (reactivas)

Cuando las actividades de prevención para un determinado modo de fallo no son técnicamente factibles, o no son efectivas, el método RCM propone que se evalúen posibles acciones de mantenimiento correctivas (reactivas). Para la metodología de RCM, las actividades de mantenimiento correctivas se dividen en 2 categorías:

A. Rediseño: En el caso de no conseguir ningún tipo de actividad preventiva que ayude a reducir la posibilidad de ocurrencia de los modos de fallos que afecten a la seguridad o al ambiente a un nivel aceptable, es necesario desarrollar un rediseño o una modificación (de la estrategia de mantenimiento o del modo de fallo) que permita minimizar o eliminar las consecuencias de esos modos de fallos. Cuando las consecuencias del modo de fallo son de carácter operacional o no operacional; y no se logra conseguir una actividad de mantenimiento preventivo que sea efectiva, la opción de seleccionar una estrategia de rediseño se convierte en un proceso de justificación económica.

B. Actividades de mantenimiento no programado (no realizar mantenimiento programado): En el caso de no conseguir actividades de prevención económicamente más baratas que los posibles efectos derivados de los modos de fallos con consecuencias operacionales o no operacionales, se podrá tomar la decisión de esperar que ocurra el fallo y actuar de forma reactiva (esperar que ocurra el fallo).

2.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM AL HORNO EN ESTUDIO

2.2.1 Equipo natural de trabajo del RCM

Para este trabajo de investigación (tesis) el equipo natural de trabajo RCM, está conformado por trabajadores de distintas áreas productivas.

- Operador: Sr. José Armijo, con una trayectoria de más de 46 años en la empresa, conoce a cabalidad la función principal del horno y maneja a un nivel de experto el funcionamiento del horno y sus sistemas
- Mecánico mantención: Sr. Andrés Bermúdez, con una trayectoria igualmente de más de 30 años, conoce el horno desde su concepción, ha participado en todas las mantenciones del horno en su ciclo de vida, tiene pleno conocimiento de los fallos que presenta el horno.
- Subgerente de producción: Sr. Jorge Gómez, cuenta con una visión global del negocio, con el fin de llevar el RCM centrado en la misma línea u objetivo.
- Jefe de Mantención: Sr. Luis Arancibia, administra todas las tareas diarias de mantenimiento, coordina y ejecuta las labores de mantención en la empresa.
- Facilitador: Sr. Marcelo Acevedo, para este caso será el desarrollador de este estudio

2.2.2 Selección del sistema

Para la selección del sistema crítico se desarrolló una investigación a partir de entrevistas al personal que mantiene, opera y el responsable del horno, lo que permitió la recolección de datos de mantenimiento y criterios para realizar esta selección.

Las entrevistas fueron realizadas al:

- Supervisor de mantención
- Mantenedores Mecánicos, Eléctricos
- Operador del horno
- Responsable del horno (Gerente de la Planta)

Los antecedentes recopilados permitieron primeramente entender el funcionamiento del horno, además de establecer los distintos sistemas del horno y como se presentan sus fallos, también se establece el criterio para la generación de las consecuencias en el análisis de riesgo.

Mediante la entrevista con el supervisor de mantenimiento se recopilan los antecedentes de fallos comunes y de costos asociados a compras de materiales y repuestos, además de conocer los mantenimientos que tienen definidos como preventivos y correctivos, además de los tiempos estimados asociados a cada tipo de mantenimiento. Cabe destacar que esta información fue recopilada y ordenada a partir de varias entrevistas.

Mediante las entrevistas con los mantenedores del horno se pudo complementar y contrastar la información de mantenimiento, además de profundizar la función principal de cada equipo que se discutía. información que fue muy valiosa para este estudio.

Mediante la entrevista con el operador del horno, también se comprende la finalidad del servicio que el horno presta, información que está expresada desde el inicio de este estudio sobre la importancia del secado de las aislaciones, además de contrastar y complementar la información sobre las formas de fallo del horno.

Y finalmente con el Gerente de la Planta, se establece la problemática y los impactos que genera la indisponibilidad del horno. Con estos antecedentes se definen los porcentajes de la consecuencia en la matriz de riesgo, donde hay un alto impacto en los tiempos para reparar (TPR) por el costo asociado a la indisponibilidad del horno.

En la tabla 2-3 se presenta el análisis de criticidad de los siete sistemas que cuenta el horno, este análisis se realiza a partir de un catastro de mantenciones que se tiene conocimiento en la empresa, además de estimaciones de mantenciones presentadas por el equipo natural de trabajo. Ver marco teórico en punto 2.1.5.3/2.1.5.4. de matriz de criticidad.

Tabla 2-3. Selección del sistema crítico. Fuente: Elaboración propia

Sistemas	FF	SHA	TPR	CM	Consecuencia	Puntuación	Zona de Riesgo
Mecánico	1	2	4	5	4,05	4,05	M
Hidráulico	2	2	1	1	1,05	2,10	B
Control	4	2	2	2	2	8,00	A
Vacío	3	2	2	5	2,45	7,35	M
Ventilación aire caliente	2	2	5	5	4,85	9,70	A
Neumático	1	2	1	1	1,05	1,05	D
Eléctrico	1	2	1	1	1,05	1,05	D

Como se muestra en el análisis resulta crítico el sistema de ventilación de aire caliente, con un valor de 9,70 puntos, posicionándose en la zona de riesgo alto.

2.2.3 Definición del contexto operacional del sistema de ventilación de aire caliente

2.2.3.1 Resumen operativo

El propósito del sistema es proveer de ventilación de aire caliente a una temperatura de 100 a 120°C, y a un caudal controlado de 9.000 a 10.000 m³/hora, utilizando dos motoventiladores ubicados en el techo del horno que hacen recircular aire desde el exterior hacia el interior del horno, canalizando el aire hacia un ducto que envuelve los intercambiadores de calor, la energía calorífica la entrega una caldera eléctrica ubicada al exterior del horno, apoyada de una motobomba ubicada al exterior del horno que hace recircular aceite térmico desde la caldera hacia dos conjuntos de intercambiadores de calor ubicados en las paredes laterales interiores del horno. El aire impulsado por los motoventiladores van cambiando de temperatura desde la parte superior “punto frio” hacia el inferior “punto caliente”.

El proceso de ventilación de aire caliente en el horno se desarrolla a presión atmosférica, por circulación de aire en un circuito abierto.

Considerando que el horno opera por procesos intermitentes de ventilación de aire caliente y secado bajo vacío, considerando que un ciclo de secado del horno tiene un tiempo de duración estándar de 4 días, se estima que las horas máquina de funcionamiento de sistema de ventilación de aire caliente fluctúan entre 1.670 a 2.900 horas/año.

El personal facultado para operar el horno es el supervisor y el operador del área de poder, ambos tienen un horario diurno, el personal debe dejar programado los ciclos para la jornada de la noche, donde no hay supervisión del equipo.

El sistema de ventilación de aire caliente cuenta con una central PLC con un monitoreo de la operación donde está programado para detener la operación cuando existe un parámetro que está fuera del proceso normal.

La política de repuestos por el momento está orientada a mantener en stock una cantidad menor de componentes importantes, coordinando compras en ocasiones cuando el fallo se presenta.

En la figura 2-8 se presenta un esquema de operación del sistema de ventilación de aire caliente, donde se grafica lo siguiente

Motoventiladores (Flujo de aire)

Caldera Eléctrica – Motobomba – Intercambiador de calor (energía calorífica)

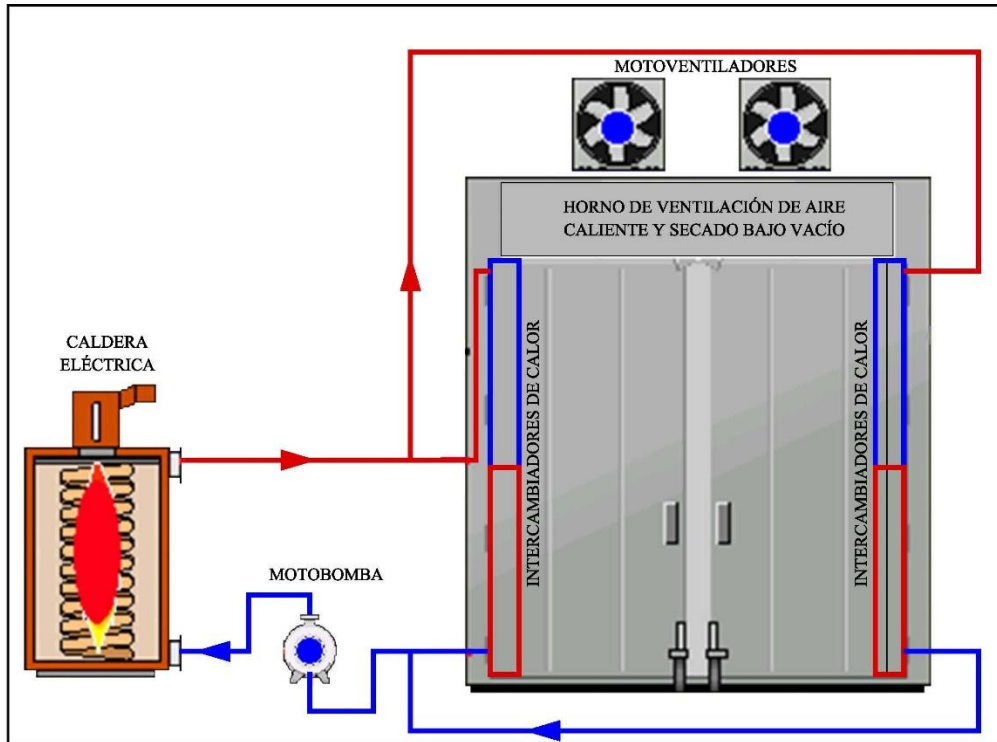


Figura 2-8. Esquema del sistema de ventilación de aire caliente del horno

Fuente: Elaboración propia

2.2.3.2 Equipos o subsistemas principales

Como se menciona anteriormente el sistema de ventilación de aire caliente cuenta con varios equipos o subsistemas que se definen a continuación:

Motoventilador: Este equipo tiene la función primaria de impulsar aire desde el exterior al interior del horno, el caudal de aire impulsado por el ventilador es canalizado hacia los intercambiadores de calor ubicados al interior del horno, aportando un caudal de 9.000 a 10.000 (m³/hora).

La función secundaria es mantener la hermeticidad del horno en la etapa de vacío.

Este motoventilador está conformado por un motor de 2,2 kW, un cuerpo distanciador que permite distanciar el motor del techo del horno, evitando que el motor quede en las zonas aisladas del techo, un eje de extensión que permite la transmisión de energía del motor a la turbina, y sus accesorios mecánicos como los rodamientos retenes acoplamientos, y en su extremo inferior posee una turbina de tipo jaula de ardilla. La ingeniería de este mecanismo es parte de la marca ARRAS MAXEI, fabricante del horno, esto quiere decir que no es un componente comercial y el conjunto mostrado en la figura 2-10, es solo referencial para respetar los derechos de autor del fabricante.

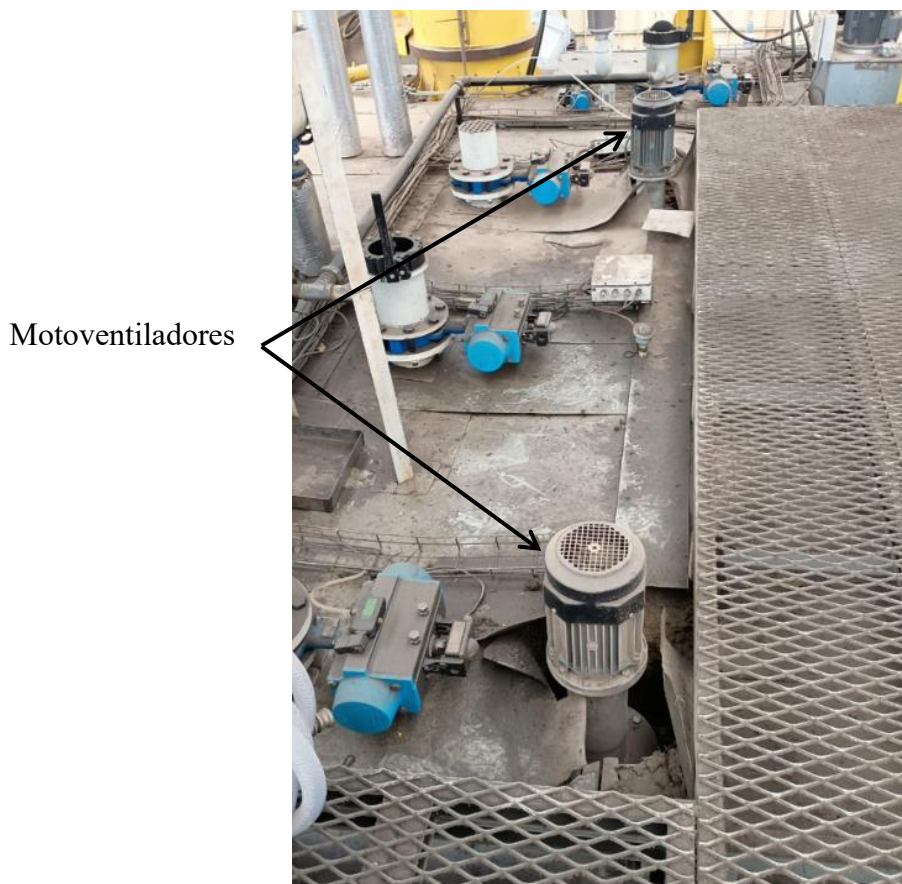


Figura 2-9. Vista superior de motoventiladores sobre el horno

Fuente: Elaboración propia

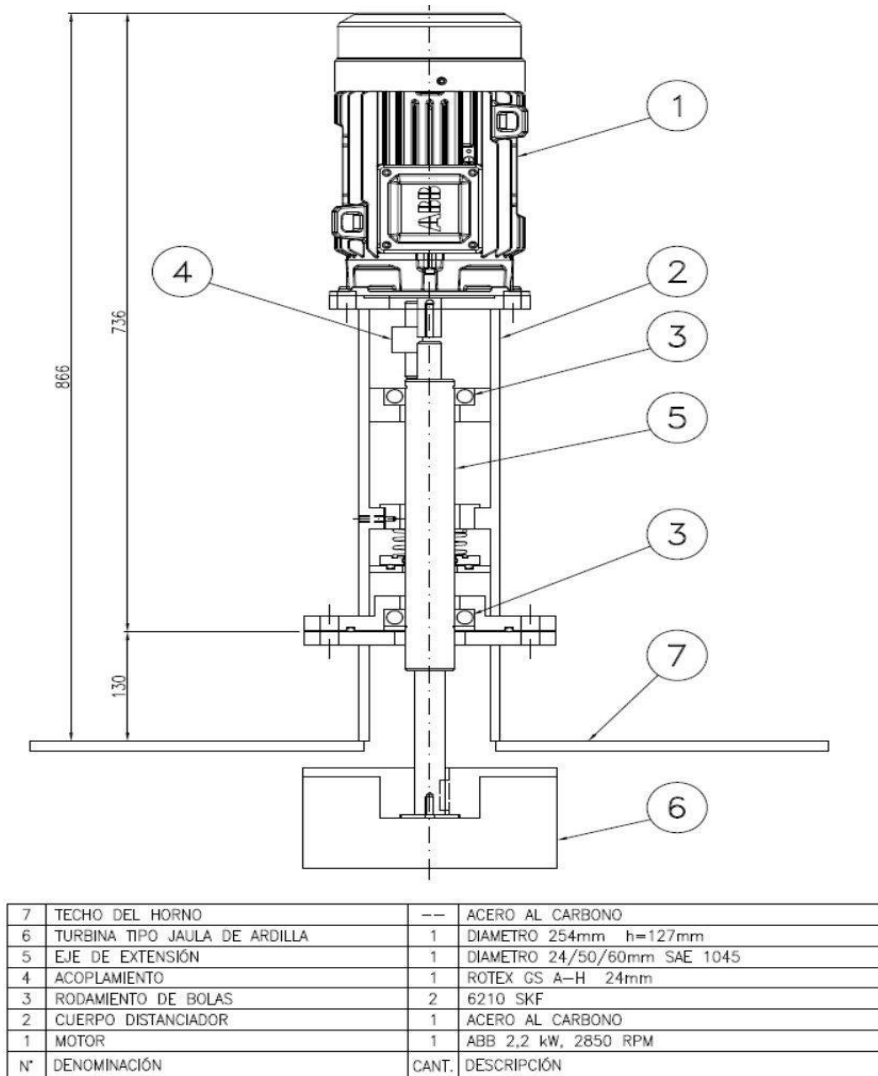


Figura 2-10. Plano conjunto motoventilador

Fuente: Elaboración propia

Caldera eléctrica: Su función principal es genera la transformación de la energía eléctrica en energía calorífica, aportando al sistema el calentamiento del aceite térmico que recircula desde la caldera hacia los intercambiadores de calor, la potencia eléctrica consumida por la caldera es de 260 kW.

La función secundaria es mantener contención del aceite térmico que recircula por la caldera.

Ítem mantenibles importantes:

Este equipo está conformado por 25 resistencias eléctricas 10 kW 380 V.

En tablero eléctrico dedicado a la caldera cuenta con 6 contactores de 100 V 62 A.



Figura 2-11. Vista de la caldera eléctrica ubicada al exterior del horno

Fuente: Elaboración propia

Motobomba de aceite térmico: La función principal es transformar la energía eléctrica en energía cinética y potencial para impulsar y generar la recirculación de aceite térmico desde la caldera hacia los intercambiadores de calor a caudal 25 (m³/hora) y vencer una diferencia de presión de 45 metros columna de agua equivalente a 4,5 bar.

La función secundaria es mantener contención del aceite térmico que recircula por el equipo.

La motobomba es del fabricante Flowserve y el código del producto es:

ZTND 32200 BA GBC 1B 2

Características del Motor WEG:

Potencia : 7,5 kW

Velocidad máxima : 2910 rpm

Características de la bomba Sterling:

Caudal máximo : 1000 m³/hora

Velocidad máxima : 3600 rpm

Temperatura : 350°C máxima de operación

Presión de carcasa : 16 bar (0–120 °C); 13 bar (120–300 °C); 10 bar (300–350 °C)

Conexión Brida : DIN EN 1092-2 PN16/25

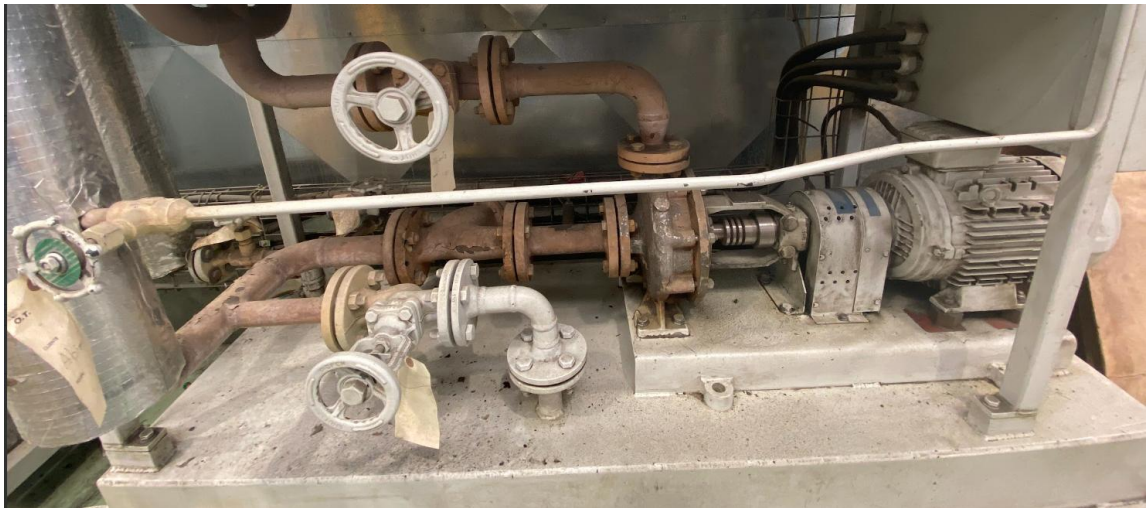


Figura 2-12. Vista de la motobomba térmica ubicada al exterior del horno

Fuente: Elaboración propia

Intercambiadores de calor: La función principal es elevar la temperatura del aire que es dirigido desde la parte superior a la parte inferior del intercambiador, canalizando el aire

por medio de unos deflectores ubicados en el inferior del intercambiador expulsando el aire a mayor velocidad al centro del horno, donde se posiciona la parte activa del transformador.

La función secundaria es mantener contención del aceite térmico que recircula por el intercambiador.



Figura 2-13. Vista de las dos unidades de intercambiadores de calor

Fuente: Elaboración propia

2.2.3.3 Diagrama EPS (Entrada, Proceso, Salida)

Entrada:

Señales de control
 Energía eléctrica
 Potencia eléctrica
 Velocidad de rotación del motor
 Aire de entrada

Proceso:

Accionamiento de la turbina por medio del motor
 Suministro de aire al intercambiador de calor
 Transformación de energía eléctrica en energía calórica
 Accionamiento de la bomba por medio del motor
 Recirculación de aceite caliente

Salida:

Aire caliente impulsado a caudal controlado en (m³/hora)

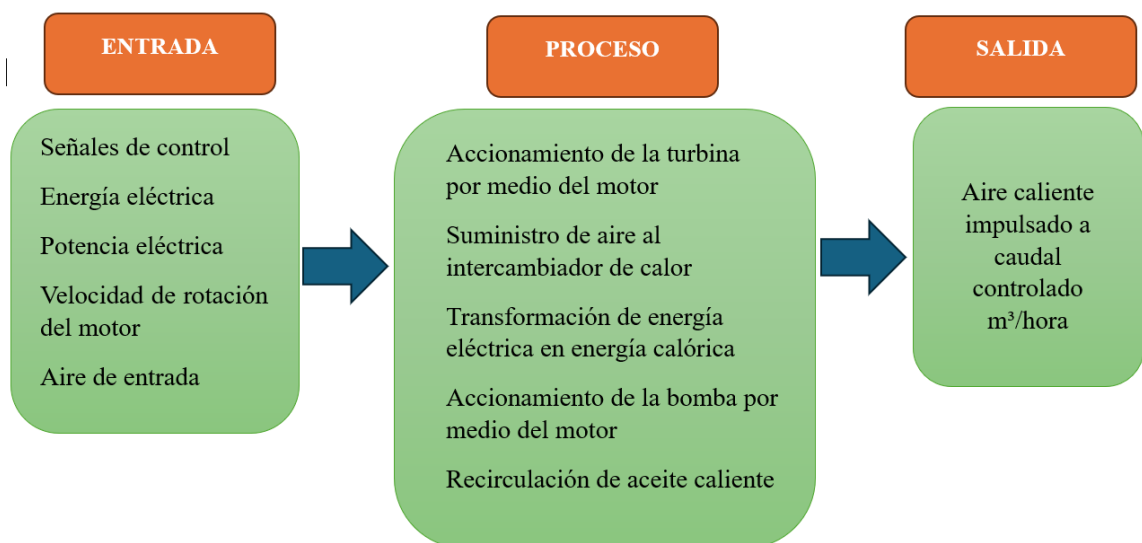


Figura 2-14. Diagrama entrada - proceso – salida del sistema de ventilación de aire caliente

Fuente: Elaboración propia

2.2.4 Análisis de modo efecto y fallo (FMECA) del sistema de ventilación de aire caliente

A continuación, el equipo natural de trabajo presenta el análisis modo efecto y fallo de los equipos principales del sistema de ventilación de aire caliente, donde concluye con el valor del riesgo económico de la situación actual por cada modo de fallo presentado.

Para mejorar la comprensión de los datos analizados en la tabla, cada equipo fue identificado por una letra para así enumerar sus modos de fallo iniciando por la letra del equipo o subsistema, como se describe a continuación:

- A : Motoventilador
- B : Motobomba de aceite térmico
- C : Caldera eléctrica
- D : Intercambiador de calor.

También para cada equipo o subsistema los modos de fallo se agrupan según su sistema donde se identifican los siguientes:

- Sistema mecánico
- Sistema eléctrico
- Sistema de control

Para el cálculo de la mano de obra se presentan los distintos cargos para cada intervención de mantenimiento con el fin de identificar la presencia profesional de supervisor, mecánico y eléctrico en las actividades, también se agrega el costo de maquinaria, ya que para ciertas actividades es necesaria la utilización de un alza hombre.

El análisis modo efecto y fallo es presentado en la tabla 2-4 que está dividida en 4 tablas, una para cada equipo analizado.

Equipo	Función	#	Falla Funcional Subistema del equipo	#	Modo de falla	FF (Fallos/Año)	Efecto de Falla	TPR (Horas)	Supervisor	Mecánico	Eléctrico	Maquinaria	Costos M.O. (\$/Fallo)	Costos Maquinaria (\$/Fallo)	Imp. Prod. (\$/hora)	Costos MAT. (\$/Fallo)	Imp. SHIA (\$/Fallo)	Riesgo Económico Actual (\$/Año)
MOTOVENTILADOR	Circular aire desde el interior del horno, a un caudal de 9.000 a 10.000 m ³ /hora, con una velocidad de giro del motor de 2.850 rpm	A	Falla Total: El motorventilador deja de funcionar	Mecánico	A1	1,000	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Ruido y detención del motor Acción correctiva: Cambio de los rodamientos y retenes	16	1	4	1	1	\$ 560.000	\$ 320.000	\$ 4.715.380	\$ 750.000	0	77.076.074
					A2	0,500	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El motor no transmite energía a la turbina Acción correctiva: Cambio del acoplamiento	4	1	2	1	\$ 100.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 73.000	0	9.517.259	
					A3	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El Aspa no desplaza aire al intercambiador de calor Acción correctiva: Cambio del aspa	5	1	4	1	\$ 175.000	\$ 100.000	\$ 4.715.380	\$ 300.000	0	3.018.987	
				Eléctrico	A4	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida total de la energía transmitida por el motor Acción correctiva: Cambio del motor	6	1	2	1	0	\$ 150.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 800.000	0	3.655.285
					A5	0,200	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida de función del motorventilador, modo de falla con consecuencias ocultas Acción correctiva: Revisión completa del motor, conexiones ventilación	5	1	2	2	0	\$ 150.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 30.000	0	4.751.380
				Control	A6	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El motor no enciende Acción correctiva: Cambio de relé de mando	2	1	0	1	0	\$ 30.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 161.160	0	1.924.384
					A7	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El motor no enciende Acción correctiva: Cambio de contactores	2	1	0	1	0	\$ 30.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 65.000	0	1.905.152

Equipo	Función	#	Falla Funcional Subistema del equipo	#	Modo de falla	FF (Fallos/Año)	Efecto de Falla	TPR (Horas)	Supervisor	Mecánico	Eléctrico	Maquinaria	Costos M.O. (\$/Fallo)	Costos Maquinaria (\$/Fallo)	Imp. Prod. (\$/hora)	Costos MAT. (\$/Fallo)	Imp. SHIA (\$/Fallo)	Riesgo Económico Actual (\$/Año)
MOTOBOMBA TÉRMICA	Circular aceite térmico desde el exterior al interior del horno, a un caudal de 24.000 a 25.000 m ³ /hora, con una velocidad de giro del motor de 3.500 rpm	B	Falla Total: La motobomba deja de funcionar	Mecánico	B1	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Ruido y detención del motor Acción correctiva: Cambio de los rodamientos y retenes	5	1	2	1	0	\$ 125.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 85.000	0	2.973.362
					B2	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El motor no transmite energía a la bomba Acción correctiva: Cambio del acoplamiento	4	1	2	1	0	\$ 100.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 73.000	0	3.806.904
					B3	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Goteo de aceite desde la bomba Acción correctiva: Cambio de sello	8	1	2	0	0	\$ 160.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 67.000	225.000	7.635.007
				Eléctrico	B4	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida total de la energía transmitida por el motor Acción correctiva: Cambio del motor	6	1	2	1	0	\$ 150.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 850.000	0	3.661.535
					B5	0,200	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida de función de la motobomba, modo de falla con consecuencias ocultas Acción correctiva: Revisión completa del motor, conexiones ventilación	5	1	1	1	0	\$ 100.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 30.000	0	4.741.380
				Control	B6	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El motor no enciende Acción correctiva: Cambio de relé de mando	2	1	0	1	0	\$ 30.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 161.160	0	1.924.384
					B7	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El motor no enciende Acción correctiva: Cambio de contactores	2	1	0	1	0	\$ 30.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 65.000	0	1.905.152

Equipo	Función	#	Falla Funcional Subsistema del equipo	#	Modo de falla	FF (Fallos/Año)	Efecto de Falla	TPR (Horas)	Supervisor	Mecánico	Eléctrico	Maquinaria	Costos M.O. (\$/Falla)	Costos Maquinaria (\$/Falla)	Imp. Prod. (\$/hora)	Costos MAT. (\$/Falla)	Imp. SHA (\$/Falla)	Riesgo Económico Actual (\$/Año)	
CALDERA ELÉCTRICA	La caldera produce de entre 240 a 250 kW de energía calorífica	C	Falla Total: La caldera produce menos de 240 kW de energía calorífica	Mecánico	C1	Empaquetadura de cañería dañada	0,250	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Goteo de aceite desde la Caldera Acción correctiva: Cambio de empaquetadura	5	1	2	0	0	\$ 100.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 15.000	225.000	5.979.225
				Eléctrico	C2	Contactores de caldera averiada	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): La energía eléctrica no alimenta la caldera Acción correctiva: Cambio de contactores	6	1	0	2	0	\$ 120.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 760.000	0	3.646.535
					C3	Resistencia eléctricas averiada	0,125	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): La resistencia eléctrica no calienta el aceite Acción correctiva: Cambio de resistencias eléctricas	8	1	0	3	0	\$ 200.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 4.000.000	0	5.240.380
				Control	C4	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El motor no enciende Acción correctiva: Cambio de relé de mando	2	1	0	1	0	\$ 30.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 280.000	0	1.948.152
					C5	Termostato averiado	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El termostato no entrega la temperatura real del sistema, deteniendo la energía Acción correctiva: Cambio del termostato	3	1	0	1	0	\$ 45.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 320.000	0	1.813.892

Equipo	Función	#	Falla Funcional Subsistema del equipo	#	Modo de falla	FF (Fallos/Año)	Efecto de Falla	TPR (Horas)	Supervisor	Mecánico	Eléctrico	Maquinaria	Costos M.O. (\$/Falla)	Costos Maquinaria (\$/Falla)	Imp. Prod. (\$/hora)	Costos MAT. (\$/Falla)	Imp. SHA (\$/Falla)	Riesgo Económico Actual (\$/Año)	
INTERCAMBIADOR DE CALOR	Transferir energía calorífica entre 230 a 250 kW al interior del horno	D	Falla Total: El intercambiador produce menos de 230 kW de energía calorífica	Mecánico	D1	Empaquetadura de cañería dañada	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Goteo de aceite desde las conexiones del intercambiador Acción correctiva: Cambio de empaquetadura	5	1	2	0	0	\$ 100.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 60.000	225.000	2.995.237
				D2	Picaduras o grietas en los tubos	0,125	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Goteo de aceite en tubos o aletas Acción correctiva: Coordinar servicio externo de reparación	8	1	0	0	0	\$ 80.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 600.000	225.000	4.828.505	
				D3	Aletas sucias	0,200	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida de eficiencia en la producción Acción correctiva: Limpieza de aletas	4	1	2	0	0	\$ 80.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 15.000	0	3.791.304	
				D4	Aceite térmico pierde propiedades térmicas	0,330	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida eficiencia en la producción Acción correctiva: Cambio de aceite térmico	24	1	4	0	0	\$ 720.000	\$ 0	\$ 4.715.380	\$ 2.000.000	0	38.243.407	

El análisis del riesgo económico de la situación actual nos presenta una gran diferencia económica entre modos de fallos del subsistema motoventilador e intercambiador de calor en comparación a los subsistemas de motobomba de aceite térmico y caldera eléctrica.

Donde el modo de fallo que sobresale por su alto riesgo económico es la rotura o deterioro de rodamientos del cuerpo distanciador del motoventilador, debido a los tiempos para

reparar que presenta este modo de fallo, donde su riesgo económico actual es de 77.076.074 (\$/Año).

De este modo de fallo podemos profundizar que es el de mayor intervención ya que se debe desmontar la turbina por el interior del horno para permitir desmontar el conjunto (motor, cuerpo distanciador, eje de extensión), por el techo del horno, este conjunto es llevado al taller de mantención para el cambio de rodamientos, posteriormente se vuelve a montar siguiendo la misma secuencia.

Este aspecto mencionado presenta un punto de análisis, ya que de aquí se puede presentar una oportunidad de mejora donde se puede proponer contar con un kit de remplazo del conjunto (motor-cuerpo distanciador, eje de extensión) para reducir los tiempos de reparación, y así disminuir el riesgo económico que presenta este modo de fallo. o en segundo proponer estrategia de mantenimiento preventivo sin excepción antes de la ocurrencia del fallo.

Seguido en la escala de riesgo económico sigue el intercambiador de calor donde el cambio de aceite térmico genera un riesgo económico actual de 38.243.407 (\$/Año), debido al tiempo que conlleva el cambio de aceite, ya que se deben realizar procesos para retirar las partículas de oxígeno que puedan quedar en la línea después del cambio de aceite, siendo este proceso el que genera mayor tiempo de ejecución.

De los demás modos de fallo podemos incidir que están en una escala de riesgo económico que no supera los 5.000.000 (\$/Año), en donde con respecto a los datos que entreguen los análisis de costos de las estrategias de mantenimientos y los costos por fallos esperadas podamos determinar qué tipo de estrategia que vamos a presentar para cada modo de fallo.

Resumen del análisis modo efecto y fallo FMECA

23 modos de fallos analizados

4 fallos funcionales

4 funciones

REA: Riesgo económico actual por fallo no evitado: **196.982.879** (\$/Año)

**3. CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO Y
COMPARACIÓN DE INDICADORES TÉCNICOS Y ECONÓMICOS**

3.1 PLAN DE MANTENIMIENTO DESARROLLADO A PARTIR DE LA HOJA DE DECISIÓN DEL RCM

En esta etapa el grupo natural de trabajo se reúne para analizar cada modo de fallo determinado en el análisis modo efecto y fallo FMECA, y a partir del árbol lógico de decisión se determina la estrategia de mantenimiento a utilizar y para cada una de ellas se evalúa lo siguiente:

- Acciones de mantenimiento a ejecutar (según árbol lógico de decisión)
- Frecuencias de aplicación de las actividades de mantenimiento.
- Se definen costos directos de estas actividades de mantenimiento.
- Responsable de las actividades.

Con estos datos se desarrolla el estudio económico de los planes de mantenimiento a partir de la siguiente fórmula.

$$C_{PM} = F_A * (C_{MO} + C_{MAT} + C_{MAQ})$$

Donde **C_{PM}**: Costo del plan de mantenimiento por año (\$/Año); **F_A**: Frecuencia de actividades de mantenimiento por año (F_A/Año); **C_{MO}**: Costo mano de obra en pesos por actividad (\$/Actividad); **C_{MAT}**: Costo materiales en pesos por actividad (\$/Actividad); **C_{MAQ}**: Costo de maquinaria en pesos por actividad (\$/Actividad).

En esta etapa el grupo natural desarrolla el análisis de cada modo de fallo y lo somete a la paso a paso que propone el árbol lógico de decisión, de acuerdo con las condiciones particulares que tengan los modos de fallo se van dirigiendo por el árbol de decisiones. Donde inicialmente se analizan si los modos de fallo son evidentes para los operarios, si afectan la seguridad higiene y el medio ambiente y finalmente si afectan a las operaciones.

Una vez definida el tipo de estrategia de mantenimiento según el árbol lógico de decisión se procede a definir la actividad de mantenimiento a ejecutar para dar respaldo a ese modo de fallo, posteriormente el equipo analiza confiabilidad con la frecuencia que se determinara para la actividad, como referencia utilizaremos una estimación de datos cercanos a los tiempos establecidos con pequeñas variaciones hacia arriba y abajo, con el fin de calcular una confiabilidad cercana al 80% para implementar los planes de mantenimiento preventivo. Con respecto a la mantenibilidad en tiempos para reparar TPR, como esta es una actividad planificada y programada los TPR son más reducidos, ya que se presenta una mejor logística y preparación previa a la actividad, por ejemplo: El personal está destinado a la labor, los materiales, repuestos y maquinarias están

disponibles para la actividad. Sobre los costos de materiales y el personal que se necesario se mantienen igual que la situación actual.

Tabla 3-1. Plan de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

#	Modo de Falla	Actividad de Mtto	Actividad de mantenimiento a ejecutar	FA (Actv./Año)	TPR (Horas)	Supervisor	Mecánico	Eléctrico	Maquinaria	Tiempo Mtto (Horas/Falla)	Tiempo efectivo personal Mtto. (Horas/Año)	Costos directos M.O. Propuesta (\$/Actv.)	Costo Material (\$/Actv.)	Costo Maquinaria (\$/Actv.)	Costos Plan Mtto (\$/Año)
A1	Rodamientos con rotura	Sustitución Cíclica	Cambio de rodamientos y retenes de motor	1,200	12	1	4	1	1	72	86	\$ 420.000	\$ 750.000	240.000	\$ 1.692.000
A2	Acoplamiento de motor con rotura	Sustitución Cíclica	Cambio de acoplamiento y chavetas	0,750	4	1	2	1	0	16	12	\$ 100.000	\$ 73.000	0	\$ 129.750
A3	Turbina tipo jaula de ardilla con rotura	Sustitución Cíclica	Cambio de turbina y chaveta	0,200	3	1	4	1	1	18	4	\$ 105.000	\$ 300.000	60.000	\$ 93.000
A4	Motor con cortocircuito en devanado del bobinado	Sustitución Cíclica	Cambio de Motor	0,200	4	1	2	1	0	16	3	\$ 100.000	\$ 800.000	0	\$ 180.000
A5	Ventilación obstruida calienta el motor, activa el relé térmico de protección y detiene el motor	Tarea de Búsqueda de Fallas Ocultas	Revisión de la fuente eléctrica y ventilación del motor, en caso que no se encuentre la falla, se deberá realizar un chequeo del motor.	0,250	3	1	2	2	0	15	4	\$ 90.000	\$ 30.000	0	\$ 30.000
A6	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	Sustitución Cíclica	Cambio de relé de mando	0,250	1	1	0	1	0	2	1	\$ 15.000	\$ 161.160	0	\$ 44.040
A7	Contactador no enciende el motor, contactor deteriorado	Sustitución Cíclica	Cambio de contactores	0,250	1	1	0	1	0	2	1	\$ 15.000	\$ 65.000	0	\$ 20.000
B1	Rodamientos del motor con rotura	Sustitución Cíclica	Cambio de rodamientos y retenes de motor	0,200	3	4	0	1	0	15	3	\$ 135.000	\$ 85.000	0	\$ 44.000
B2	Acoplamiento de motor con rotura	Sustitución Cíclica	Cambio de acoplamiento y chavetas	0,250	2	1	2	1	0	8	2	\$ 50.000	\$ 73.000	0	\$ 30.750
B3	Sello mecánico de la bomba con fuga	Sustitución Cíclica	Cambio de sello	0,250	6	1	2	0	0	18	5	\$ 120.000	\$ 67.000	0	\$ 46.750
B4	Motor con cortocircuito en devanado del bobinado	Sustitución Cíclica	Cambio de motor	0,125	4	1	2	1	0	16	2	\$ 100.000	\$ 850.000	0	\$ 118.750
B5	Ventilación obstruida calienta el motor, activa el relé térmico de protección y detiene el motor	Sustitución Cíclica	Revisión de la fuente eléctrica y ventilación del motor, en caso que no se encuentre la falla, se deberá realizar un chequeo del motor.	0,250	3	1	1	1	0	9	2	\$ 60.000	\$ 30.000	0	\$ 22.500
B6	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	Sustitución Cíclica	Cambio de relé de mando	0,250	1	1	0	1	0	2	1	\$ 15.000	\$ 161.160	0	\$ 44.040
B7	Contactador no enciende el motor, contactor deteriorado	Sustitución Cíclica	Cambio de contactores	0,250	1	1	0	1	0	2	1	\$ 15.000	\$ 65.000	0	\$ 20.000
C1	Empaquetadura de cañería dañada	Sustitución Cíclica	Cambio de empaquetaduras	0,333	1	1	0	1	0	2	1	\$ 15.000	\$ 15.000	0	\$ 9.990
C2	Contactores de caldera averiada	Sustitución Cíclica	Cambio de contactores	0,200	1	1	0	1	0	2	0	\$ 15.000	\$ 760.000	0	\$ 155.000
C3	Resistencia eléctricas averiada	Sustitución Cíclica	Cambio de resistencias eléctricas	0,200	6	1	0	3	0	24	5	\$ 150.000	\$ 4.000.000	0	\$ 830.000
C4	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé	Sustitución Cíclica	Cambio de relé de mando	0,250	1	1	0	1	0	2	1	\$ 15.000	\$ 280.000	0	\$ 73.750
C5	Termostato averiado	Sustitución Cíclica	Cambio de termostato de caldera	0,200	2	1	0	1	0	4	1	\$ 30.000	\$ 320.000	0	\$ 70.000
D1	Empaquetadura de cañería dañada	Sustitución Cíclica	Cambio de empaquetaduras	0,200	3	1	2	0	0	9	2	\$ 60.000	\$ 60.000	0	\$ 24.000
D2	Picaduras o grietas en los tubos	Reacondicionamiento Cíclico	Revisión general de los intercambiadores Overhaul	0,200	0	0	0	0	0	0	0	\$ 0	\$ 600.000	0	\$ 120.000
D3	Aletas sucias	Sustitución Cíclica	Limpieza periódica de las aletas	0,250	3	1	2	0	0	9	2	\$ 60.000	\$ 15.000	0	\$ 18.750
D4	Aceite térmico pierde propiedades térmicas	Tarea a Condición	Análisis de aceite, revisión de propiedades térmicas	2,000	1	1	0	0	0	1	2	\$ 10.000	\$ 200.000	0	\$ 420.000

Resumen del plan de mantenimiento

23 modos de fallos analizados

4 fallos funcionales

4 funciones

Estrategias de mantenimiento:

Actividades de sustitución cíclica : 20

Actividad de búsqueda de fallos ocultas : 1

Actividad de reacondicionamiento cíclico : 1

Actividad de tarea a condición : 1

Costos

REA: Riesgo económico actual por fallo no evitado: **196.982.879** (\$/Año)

CPM: Costo del plan de mantenimiento desarrollado a partir del RCM: **4.237.070** (\$/Año)

3.2 RIESGO ECONÓMICO ESPERADO POSTERIOR A LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM

En el siguiente estudio de riesgo económico se presenta el escenario potencial después aplicar el plan de mantenimiento presentado a partir del árbol lógico de decisiones en el punto anterior (3.1), este riesgo económico considera una estimación correspondiente a fallos futuros a pesar de aplicado el plan de mantenimiento, ya que a pesar de presentar cualquier estrategia de mantenimiento siempre existirá la posibilidad de la ocurrencia de un fallo a partir del mismo modo de fallo.

Para este análisis de riesgo económico, el equipo natural de trabajo evalúa lo siguiente:

- Frecuencia esperada de eventos.
- Tiempos para reparar.

- Costos directos de mano de obra.
- Costos directos de materiales y maquinaria.
- Costos por importe en seguridad higiene y medio ambiente.

Con estos datos podemos desarrollar el riesgo económico futuro esperado a partir de la siguiente fórmula.

$$R_{EE} = F_E * [(T_{PR} * I_P) + C_{MO} + C_{MAT \text{ y } MAQ} + C_{SHA}]$$

Donde **REE**: Riesgo económico esperado (\$/Año); **FE**: Frecuencia esperada de eventos por año (FE/Año); **TPR**: Tiempo para reparar en horas por fallo (Horas/Fallo); **IP**: Impacto en la producción en pesos por hora de no operatividad (\$/Hora); **CMO**: Costo mano de obra en pesos por fallo (\$/Fallo); **CMAT y MAQ**: Costo materiales y maquinaria en pesos por fallo (\$/Fallo) y **CSHA**: Costo de seguridad higiene y medio ambiente en pesos por fallo (\$/fallo).

Para la estimación de las frecuencias esperadas se consideran valores conservadores, pero aun así estas ocurrencias deben ser menores en comparación a las presentadas en los planes estratégicos de mantenimiento, más aún en comparación con las presentadas en el estudio de la situación actual.

Los ítems asociados a impacto en la producción, costos de mano de obra, costos de materiales y costos por importe en la seguridad higiene y el medio ambiente se mantienen con respecto al estudio de la situación actual, solamente modificando la frecuencia de la ocurrencia, como se puede observar en la tabla 3-2.

Resumen del análisis de riesgo económico esperado.

23 modos de fallos analizados

4 fallos funcionales

4 funciones

Estrategias:

Actividades de sustitución cíclica : 20

Actividad de búsqueda de fallos ocultos : 1

Actividad de reacondicionamiento cíclico : 1

Actividad de tarea a condición : 1

Costos

REA: Riesgo económico actual por fallo no evitado: **196.982.879** (\$/Año)

CPM: Costo del plan de mantenimiento desarrollado a partir del RCM: **4.237.070** (\$/Año)

REE: Riesgo económico esperado: **119.868.563** (\$/Año)

Tabla 3-2. Riesgo económico esperado. Fuente: Elaboración propia

#	Modos de Falla	FF esperada (Fallas/Año)	TPR (Horas)	Imp. Prod. (\$/Horas)	Costos directos M.O. (\$/Falla)	Costos directos materiales y maquinaria (\$/Falla)	Importe SHA (\$/Falla)	Riesgo Económico Esperado (\$/Año)
A1	Rodamientos con rotura	0,500	16,00	\$4.715.380	\$560.000	\$1.070.000	\$0	\$38.538.037
A2	Acoplamiento de motor con rotura	0,333	5,00	\$4.715.380	\$100.000	\$73.000	\$0	\$7.908.716
A3	Turbina tipo jaula de ardilla con rotura	0,100	5,00	\$4.715.380	\$175.000	\$400.000	\$0	\$2.415.190
A4	Motor con cortocircuito en devanado del bobinado	0,100	6,00	\$4.715.380	\$150.000	\$800.000	\$0	\$2.924.228
A5	Ventilación obstruida calienta el motor, activa el relé térmico de protección y detiene el motor	0,125	5,00	\$4.715.380	\$150.000	\$30.000	\$0	\$2.969.612
A6	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	0,125	2,00	\$4.715.380	\$30.000	\$161.160	\$0	\$1.202.740
A7	Contactador no enciende el motor, contactor deteriorado	0,125	2,00	\$4.715.380	\$30.000	\$65.000	\$0	\$1.190.720
B1	Rodamientos del motor con rotura	0,100	5,00	\$4.715.380	\$125.000	\$85.000	\$0	\$2.378.690
B2	Acoplamiento de motor con rotura	0,125	4,00	\$4.715.380	\$100.000	\$73.000	\$0	\$2.379.315
B3	Sello mecánico de la bomba con fuga	0,125	8,00	\$4.715.380	\$160.000	\$67.000	\$225.000	\$4.771.880
B4	Motor con cortocircuito en devanado del bobinado	0,050	6,00	\$4.715.380	\$150.000	\$850.000	\$0	\$1.464.614
B5	Ventilación obstruida calienta el motor, activa el relé térmico de protección y detiene el motor	0,125	5,00	\$4.715.380	\$100.000	\$30.000	\$0	\$2.963.362
B6	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	0,125	2,00	\$4.715.380	\$30.000	\$161.160	\$0	\$1.202.740
B7	Contactador no enciende el motor, contactor deteriorado	0,125	2,00	\$4.715.380	\$30.000	\$65.000	\$0	\$1.190.720
C1	Empaquetadura de cañería dañada	0,200	5,00	\$4.715.380	\$100.000	\$15.000	\$225.000	\$4.783.380
C2	Contactores de caldera averiada	0,100	6,00	\$4.715.380	\$120.000	\$760.000	\$0	\$2.917.228
C3	Resistencia eléctricas averiada	0,100	8,00	\$4.715.380	\$200.000	\$4.000.000	\$0	\$4.192.304
C4	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	0,125	2,00	\$4.715.380	\$30.000	\$280.000	\$0	\$1.217.595
C5	Termostato averiado	0,100	3,00	\$4.715.380	\$45.000	\$320.000	\$0	\$1.451.114
D1	Empaquetadura de cañería dañada	0,100	5,00	\$4.715.380	\$100.000	\$60.000	\$225.000	\$2.396.190
D2	Picaduras o grietas en los tubos	0,100	8,00	\$4.715.380	\$80.000	\$600.000	\$225.000	\$3.862.804
D3	Aletas sucias	0,125	4,00	\$4.715.380	\$80.000	\$15.000	\$0	\$2.369.565
D4	Aceite térmico pierde propiedades térmicas	0,200	24,00	\$4.715.380	\$720.000	\$2.000.000	\$0	\$23.177.822

3.3 ANÁLISIS DEL AHORRO ECONÓMICO POTENCIAL POSTERIOR A LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM

Definidas las estimaciones del riesgo económico actual, el costo del plan de mantenimiento y el riesgo económico esperado, todos considerandos en pesos por año (\$/Año) sigue la etapa del análisis económico del ahorro potencial después de la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM

Con estos datos se presenta a la gerencia un estudio evidenciando el impacto económico que conlleva el plan de mantenimiento actual sin RCM en comparación con el plan de mantenimiento realizado con la metodología RCM.

Para concluir se presenta un resumen de los costos asociados a los distintos análisis presentados, obteniendo como resultado el ahorro potencial del estudio. Donde el valor del ahorro potencial se obtiene mediante la siguiente fórmula.

$$AP_{RCM} = R_{EA} - C_{PM} - R_{EE}$$

Donde:

Donde **AP_{RCM}**: Ahorro potencial del RCM (\$/Año); **R_{EA}**: Riesgo económico actual por fallo no evitado (\$/Año); **C_{PM}**: Costo del plan de mantenimiento por año (\$/Año); **R_{EE}**: Riesgo económico esperado (\$/Año).

$$AP_{RCM} = 196.982.879 \left(\frac{\$}{\text{Año}} \right) - 4.237.070 \left(\frac{\$}{\text{Año}} \right) - 119.868.563 \left(\frac{\$}{\text{Año}} \right)$$

$$AP_{RCM} = 72.877.246 \left(\frac{\$}{\text{Año}} \right)$$

Según los datos calculados se presenta un ahorro potencial de 37% con respecto al plan de mantenimiento actual sin RCM, resultado considerable para presentar el estudio a la gerencia de RHONA.

En la tabla 3-3 se presenta el desglose de los ahorros potenciales identificados a cada modo de fallo.

Tabla 3-3. Ahorro económico potencial posterior al RCM. Fuente: Elaboración propia

#	Modos de Falla	FF (Falla/Año)	TPR (Horas)	Riesgo Económico Actual (\$/Año)	Actividad de mantenimiento genérica a partir del árbol lógico de desición del RCM	FA (Act/Año)	TPR (Horas)	Costo Plan Mtto (\$/Año)	FF esperada (Falla/Año)	TPR (Horas)	Riesgo Económico Esperado (\$/Año)	Ahorro Potencial RCM (\$/Año)
A1	Rodamientos con rotura	1,00	16,00	\$77.076.074	Sustitución Cíclica	1,20	12,00	\$1.692.000	0,500	16,00	\$38.538.037	\$36.846.037
A2	Acoplamiento de motor con rotura	0,50	4,00	\$9.517.259	Sustitución Cíclica	0,75	4,00	\$129.750	0,333	5,00	\$7.908.716	\$1.478.793
A3	Turbina tipo jaula de ardilla con rotura	0,13	5,00	\$3.018.987	Sustitución Cíclica	0,20	3,00	\$93.000	0,100	5,00	\$2.415.190	\$510.797
A4	Motor con cortocircuito en devanado del bobinado	0,13	6,00	\$3.655.285	Sustitución Cíclica	0,20	4,00	\$180.000	0,100	6,00	\$2.924.228	\$551.057
A5	Ventilación obstruida calienta el motor, activa el relé térmico de protección y detiene el motor	0,20	5,00	\$4.751.380	Tarea de Búsqueda de Fallas Ocultas	0,25	3,00	\$30.000	0,125	5,00	\$2.969.612	\$1.751.767
A6	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	0,20	2,00	\$1.924.384	Sustitución Cíclica	0,25	1,00	\$44.040	0,125	2,00	\$1.202.740	\$677.604
A7	Contacto no enciende el motor, contactor deteriorado	0,20	2,00	\$1.905.152	Sustitución Cíclica	0,25	1,00	\$20.000	0,125	2,00	\$1.190.720	\$694.432
B1	Rodamientos del motor con rotura	0,13	5,00	\$2.973.362	Sustitución Cíclica	0,20	3,00	\$44.000	0,100	5,00	\$2.378.690	\$550.672
B2	Acoplamiento de motor con rotura	0,20	4,00	\$3.806.904	Sustitución Cíclica	0,25	2,00	\$30.750	0,125	4,00	\$2.379.315	\$1.396.839
B3	Sello mecánico de la bomba con fuga	0,20	8,00	\$7.635.007	Sustitución Cíclica	0,25	6,00	\$46.750	0,125	8,00	\$4.771.880	\$2.816.378
B4	Motor con cortocircuito en devanado del bobinado	0,13	6,00	\$3.661.535	Sustitución Cíclica	0,13	4,00	\$118.750	0,050	6,00	\$1.464.614	\$2.078.171
B5	Ventilación obstruida calienta el motor, activa el relé térmico de protección y detiene el motor	0,20	5,00	\$4.741.380	Sustitución Cíclica	0,25	3,00	\$22.500	0,125	5,00	\$2.963.362	\$1.755.517
B6	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	0,20	2,00	\$1.924.384	Sustitución Cíclica	0,25	1,00	\$44.040	0,125	2,00	\$1.202.740	\$677.604
B7	Contacto no enciende el motor, contactor deteriorado	0,20	2,00	\$1.905.152	Sustitución Cíclica	0,25	1,00	\$20.000	0,125	2,00	\$1.190.720	\$694.432
C1	Empaquetadura de cañería dañada	0,25	5,00	\$5.979.225	Sustitución Cíclica	0,33	1,00	\$9.990	0,200	5,00	\$4.783.380	\$1.185.855
C2	Contactores de caldera averiada	0,13	6,00	\$3.646.535	Sustitución Cíclica	0,20	1,00	\$155.000	0,100	6,00	\$2.917.228	\$574.307
C3	Resistencia eléctricas averiada	0,13	8,00	\$5.240.380	Sustitución Cíclica	0,20	6,00	\$830.000	0,100	8,00	\$4.192.304	\$218.076
C4	Relé de mando deja de entregar señal de activación o parada, relé deteriorado	0,20	2,00	\$1.948.152	Sustitución Cíclica	0,25	1,00	\$73.750	0,125	2,00	\$1.217.595	\$656.807
C5	Termostato averiado	0,13	3,00	\$1.813.892	Sustitución Cíclica	0,20	2,00	\$70.000	0,100	3,00	\$1.451.114	\$292.778
D1	Empaquetadura de cañería dañada	0,13	5,00	\$2.995.237	Sustitución Cíclica	0,20	3,00	\$24.000	0,100	5,00	\$2.396.190	\$575.047
D2	Picaduras o grietas en los tubos	0,13	8,00	\$4.828.505	Reacondicionamiento Cíclico	0,20	0,00	\$120.000	0,100	8,00	\$3.862.804	\$845.701
D3	Aletas sucias	0,20	4,00	\$3.791.304	Sustitución Cíclica	0,25	3,00	\$18.750	0,125	4,00	\$2.369.565	\$1.402.989
D4	Aceite térmico pierde propiedades térmicas	0,33	24,00	\$38.243.407	Tarea a Condición	2,00	1,00	\$420.000	0,200	24,00	\$23.177.822	\$14.645.584
Totales				\$196.982.879				\$4.237.070			\$119.868.563	\$72.877.246

De los datos de ahorro potenciales, se aprecia que todos presentan valor positivo, donde sus valores fluctúan entre 218.076 y 36.846.037 (\$/Año), para este estudio se consideró que se aplicara la estrategia de mantenimiento a todos los modos de fallo que su ahorro potencial resulte en un valor positivo.

Pero para un caso práctico se podría determinar un piso de ahorro para aplicar gestión de mantenimiento, ya que se entiende que esta metodología considera un costo de inversión,

por lo que un valor de ahorro potencial bajo no cubriría la gestión de mantenimiento necesario para su aplicación.

3.4 ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLO CON MAYOR IMPACTO EN EL AHORRO POTENCIAL DEL RCM

En virtud de la amplitud del ahorro potencial para cada modo de fallo, se demuestra que solo 2 de los 23 modos de fallos corresponden al 70,7 % del ahorro potencial, presentando estos dos modos de fallos un 26,14 % del ahorro potencial con respecto al plan de mantenimiento actual sin RCM, como se muestra en la tabla 3-4.

Tabla 3-4. Ahorro potencial acumulado para dos modos de fallo. Fuente: Elaboración propia

#	Modos de Falla	Evaluación del Riesgo Actual (\$/Año)	Costos Plan Anual (\$/Año)	Riesgo Futuro Esperado (\$/Año)	Ahorro Potencial RCM (\$/Año)	%	% Acum.
A1	Rodamientos con rotura	\$77.076.074	\$1.692.000	\$38.538.037	\$36.846.037	50,6%	50,6%
D4	Aceite térmico pierde propiedades térmicas	\$38.243.407	\$420.000	\$23.177.822	\$14.645.584	20,1%	70,7%

3.4.1 Propuestas de planes de mantenimiento para el modo de fallo A1

El modo de fallo A1 rodamiento con rotura, considera un ahorro potencial de 50,6 % del total de los modos de fallo analizados, lo que equivale a un ahorro de 18,70 % con respecto al valor monetario del riesgo actual.

Por lo considerable de este modo de fallo es que se justifica realizar un estudio más detallado, proponiendo distintas estrategias de mantenimientos, para elegir la que genere el mayor ahorro potencial. Para este caso se proponen tres escenarios distintos que se detallan a continuación:

a.- Se mantiene el plan de mantenimiento propuesto que corresponde a una estrategia de sustitución cíclica.

b.- Se propone la estrategia de tarea a condición basada en la incorporación de un monitoreo de vibraciones remoto de manera permanente para prolongar la vida del rodamiento considerando la curva PF.

El monitoreo se debe realizar remoto debido a las limitantes que tiene el acceso, debido a que los motoventiladores están ubicados en el techo del horno, próximos a las válvulas de escape de aire caliente y válvula rompe vacío, lo que genera una condición insegura para realizar el análisis de vibraciones en funcionamiento.

Se propone un servicio de monitoreo por una empresa externa especialista, esto tiene un costo mensual de \$180.000, además del costo de instalación del equipo de monitoreo de \$2.500.000. (por motoventilador).

c.- Se propone utilizar una estrategia de rediseño, basada en la adquisición de dos kits de reemplazo de motoventiladores, que considera el motor y el cuerpo distanciador. Esta propuesta presenta una mejora considerable en el TPR (tiempos para reparar) reduciendo de 12 a 6 horas por la mantención de ambos componentes.

Esta inversión tiene un costo de \$4.800.000 que serán parcializado en 5 años para llegar a un valor anualizado de \$960.000.

Tabla 3-5. Comparación de propuestas de planes de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

#	Modo de Falla	Actividad de Mito	Actividad de mantenimiento a ejecutar	FA (Actv./Año)	TPR (Horas)	Fabricación y Componentes	Ingeniería del Rediseño	Servicios Contratados	Inversión inicial	Costos directos M.O., Propuesta (\$/Actv.)	Costo Material (\$/Actv.)	Costo Maquinaria (\$/Actv.)	Costos Plan Mito (\$/Año)
A1	Rodamientos con rotura	Sustitución Cíclica	Cambio de rodamientos, retenes y acoplamiento	1,2	12					\$ 420.000	\$ 750.000	\$ 240.000	\$1.692.000
A1	Rodamientos con rotura	Tarea a Condición primer año	Contratar monitoreo de vibraciones de forma remota (instalación y monitoreo)	12				\$ 360.000	\$ 5.000.000				\$9.320.000
A1	Rodamientos con rotura	Tarea a Condición	Monitoreo de vibraciones de forma remota	0,75	12					\$ 420.000	\$ 750.000	\$ 240.000	\$6.377.500
A1	Rodamientos con rotura	Rediseño	Adquisición de dos kits completos de motor y cuerpo distanciador	0,2		\$ 1.400.000	\$ 1.800.000				\$ 1.600.000		\$960.000
A1	Rodamientos con rotura	Rediseño	Adquisición de dos kits completos de motor y cuerpo distanciador	1,2	6					\$ 210.000	\$ 750.000	\$ 120.000	\$2.256.000

En la tabla se aprecia que la estrategia de sustitución cíclica es el plan de mantenimiento más económico con un valor de 1.692.000 (\$/Año), seguido la de rediseño con un valor de 2.256.000 (\$/Año), y finalmente la tarea a condición con un valor de 6.377.500 (\$/Año).

3.4.2 Comparación de los riesgos económicos esperados para el modo de fallo A1

Para este análisis las frecuencias de fallos esperados se mantendrán en 2 años, los tiempos para reparar serán iguales para las estrategias de sustitución cíclica y tarea a condición con un TPR de 16 horas, para el rediseño el TPR será de 6 horas, esta diferencia en los tiempos para reparar afectará los costos directos de mano de obra por fallo y los costos directos de materiales y maquinarias por fallo, reflejándose la diferencia en la tabla 3-6.

Tabla 3-6. Comparación de riesgos económicos esperados. Fuente: Elaboración propia

#	Modos de Falla	FF esperada (Fallas/Año)	TPR (Horas)	Imp. Prod. (\$/Horas)	Costos directos M.O. (\$/Falla)	Costos directos materiales y maquinaria (\$/Falla)	Importe SHA (\$/Falla)	Riesgo Económico Esperado (\$/Año)
A1	Rodamiento con rotura (Sustitución Cíclica)	0,500	16,00	\$4.715.380	\$560.000	\$1.070.000	\$0	\$38.538.037
A1	Rodamiento con rotura (Tarea a Condición)	0,500	16,00	\$4.715.380	\$560.000	\$1.070.000	\$0	\$38.538.037
A1	Rodamiento con rotura (Rediseño)	0,500	6,00	\$4.715.380	\$210.000	\$400.000	\$0	\$14.451.139

Los datos presentan una diferencia importante entre las estrategias favoreciendo con un riesgo económico menor a la estrategia de rediseño con un valor de 14.451.139 (\$/Año) en comparación de las demás que tienen un valor de 38.538.037 (\$/Año).

3.4.3 Comparación del ahorro potencial del modo de fallo A1

Para finalizar la comparación se analiza el riesgo económico actual en comparación de los costos de los tres planes de mantenimiento y el costo de los tres riesgos económicos esperados.

Para este análisis los datos son concluyentes presentando una ventaja considerable en ahorro potencial la estrategia de rediseño con un valor de 60.368.935 (\$/Año), los datos son presentados en la tabla 3-7.

Tabla 3-7. Comparación del ahorro potencial. Fuente: Elaboración propia

#	Modos de Falla	FF (Falla/Año)	TPR (Horas)	Riesgo Económico Actual (\$/Año)	Actividad de mantenimiento genérica a partir del árbol lógico de desición del RCM	FA (Act/Año)	TPR (Horas)	Costo Plan Mtto (\$/Año)	FF esperada (Falla/Año)	TPR (Horas)	Riesgo Económico Esperado (\$/Año)	Ahorro Potencial RCM (\$/Año)
A1	Rodamientos con rotura	1,00	16,00	\$77.076.074	Sustitución Cíclica	1,20	12,00	\$1.692.000	0,500	16,00	\$38.538.037	\$36.846.037
A1	Rodamientos con rotura				Tarea a Condición	0,75	12,00	\$6.377.500	0,500	16,00	\$38.538.037	\$32.160.537
A1	Rodamientos con rotura				Rediseño	1,20	6,00	\$2.256.000	0,500	6,00	\$14.451.139	\$60.368.935

Esta comparación al modo de fallo de mayor impacto concluye con la recomendación de la aplicación de la estrategia de rediseño para el modo de fallo A1, la aplicación de esta estrategia presenta una mejora económica de ahorro potencial de 63,84%, en comparación con la estrategia de sustitución cíclica, reflejando un ahorro potencial total de 96.400.144 (\$/Año), superior a los 72.877.246 (\$/Año) que presentaba con la estrategia de sustitución cíclica, generando un aumento del ahorro potencial total de los 36,99 % a los 48,93 %.

3.5 INDICADORES RECOMENDADOS PARA EVALUAR EN UN PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM EN LA ORGANIZACIÓN

Para una implementación de RCM y las posteriores auditorias para el control del éxito de la gestión de mantenimiento implementada, es necesaria la implementación de indicadores técnicos y económicos básicos de desempeño, estos tienen la función de definir un rango aceptable de rendimiento y alertar cuando los datos están fuera de los rangos esperados, generando la revisión de los planes de mantenimiento establecidos, con el fin de mantener actualizados los planes de mantenimiento

Los indicadores básicos para la implementación son los siguientes:

Disponibilidad A(t) es una característica que resume cuantitativamente el perfil de operatividad de un elemento, representa el porcentaje del tiempo disponible de uso del

activo en un periodo determinado o también se refiere a la capacidad de un activo (que puede ser un equipo, una instalación, una infraestructura, etc.) para estar en un estado en el que esté operativo y sea capaz de desempeñar la función requerida cuando se necesite.

La fórmula para determinar la disponibilidad es la siguiente

$$A(t) = \frac{T_{TO}}{T_{TO} + T_{PR}} * 100 \% ; \frac{T_{PO}}{T_{PO} + T_{PFS}} * 100 \%$$

A(t): Disponibilidad del activo (%); **Tro**: Tiempo total operativo en horas máquina año (Horas/Año); **TPR**: Tiempo para reparar en horas por año (Horas/Año).

Tiempo promedio operativo (TPO) o en su versión en inglés **Mean time to failures (MTTF)**. Es un **indicador técnico de confiabilidad** que mide el promedio de tiempos operativos desde que comienza a operar hasta que se presenta el fallo. Definido en minutos, horas, días, semanas etc. según corresponda a la actividad. Y se calcula de la siguiente manera:

$$TPO = \frac{\sum T_o}{n}$$

To: Tiempo operativo del activo desde el comienzo de la operación hasta el fallo (Horas/Fallo);
n: Número total de fallos en el periodo evaluado.

Frecuencia de Fallo (FF), es un **indicador técnico de confiabilidad** que mide la cantidad de eventos que ocurren en un tiempo determinado generalmente expresado en frecuencia de fallos en un año (FF/Año). Y se calcula de la siguiente manera:

$$FF = \frac{1}{TPO}$$

Tiempo promedio para reparar (TPPR) o en su versión en inglés **Mean time to repair (MTTR)**. Es un **Indicador técnico de mantenibilidad**: que mide los tiempos promedios utilizados desde que ocurre el fallo hasta a la reparación donde el activo vuelve a un estado

operativo, ya sea por una mantención correctiva o preventiva. Definido en minutos, horas, días, semanas etc. según corresponda a la actividad. Y se calcula de la siguiente manera:

$$TPPR = \frac{\sum T_{PR}}{n}$$

TPR: Tiempo para reparar en horas por fallo (Horas/Fallo); **n:** Número total de fallos en el periodo evaluado.

Costo indisponibilidad por fallo (CIF). Es un Indicador económico:

$$CIF = FF * TPPR * (MC + CP) \left(\frac{\$}{\text{Año}} \right)$$

Donde **FF: Frecuencia de fallo** (FF/Año); **TPPR:** Tiempo promedio para reparar (Horas/fallo); **MC:** Costos directos por mantenimiento correctivo en materiales y horas hombre y repuestos (\$/Hora); **CP:** Costos por penalización, incluye costos de penalización provocados por los eventos de fallos como (paros de plantas, bajas de producción, productos deteriorados, baja calidad, reproceso, impacto en seguridad higiene y medio ambiente, etc.) medido en (\$/Hora).

3.6 COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM

3.6.1 Cálculo del indicador de disponibilidad

Para cualquier industria de manufactura o de producción de algún producto, el mantenimiento presenta un papel importante en el éxito de las metas productivas ya que se enfoca en asegurar la continuidad operacional, para la gestión del mantenimiento el indicador de disponibilidad es un indicador clave para la planificación de la producción ya que con este se proyecta la capacidad productiva de las operaciones, y para este estudio

será un indicador que reflejara el impacto positivo o negativo que presenta la aplicación de la metodología RCM.

Los datos son extraídos del mismo análisis económico presentado anteriormente, en donde se utilizarán los datos de frecuencias de fallos (Fallos/Año) y los tiempos para reparar (Horas/Fallo) del análisis económico actual y esperado, también será necesario el tiempo operativo del horno anualmente, dato que fue presentado en la definición del contexto operacional con 1670 a 2900 (Horas/Año).

La fórmula para determinar la disponibilidad es la siguiente

$$A(t) = \frac{T_{TO}}{T_{TO} + T_{PR}} * 100 \%$$

Donde **A**: Disponibilidad del activo (%); **T_{TO}**: Tiempo total operativo en horas máquina año (Horas/Año); **T_{PR}**: Tiempo para reparar en horas por año (Horas/Año).

Para el cálculo del **T_{PR}** necesitaremos datos del FMECA donde se debe realizar a partir de la siguiente sumatoria.

$$\sum_{x=1}^n (FF_x * TPR_x)$$

Donde **FF_x**: Frecuencia de fallo del modo de fallo **x** ocurridas en el año (FF/Año); **TPR_x**: Tiempo para reparar para el modo de fallo **x** en horas por año (Horas); **x**: Cada modo de fallo identificado en el FMECA; **n**: Número total de modos de fallo considerados en el FMECA.

En la Tabla 3-8 se presenta el TPR Anual a partir de la sumatoria de las frecuencias de fallos por el tiempo para reparar de cada modo de fallo de los datos obtenidos en el FMECA.

En la Tabla 3-9 se presenta el TPR Anual a partir de la sumatoria de las frecuencias de fallos por el tiempo para reparar de cada modo de fallo, de los datos obtenidos en el riesgo económico esperado.

Tabla 3-8. Sumatoria de FF y TPR antes de implementar RCM. Fuente: Elaboración propia

#	Frecuencia (Fallas/Año)	(TPR/Falla)	(TPR/Año)
A1	1	16	40,87
A2	0,5	4	
A3	0,125	5	
A4	0,125	6	
A5	0,2	5	
A6	0,2	2	
A7	0,2	2	
B1	0,125	5	
B2	0,2	4	
B3	0,2	8	
B4	0,125	6	
B5	0,2	5	
B6	0,2	2	
B7	0,2	2	
C1	0,25	5	
C2	0,125	6	
C3	0,125	8	
C4	0,2	2	
C5	0,125	3	
D1	0,125	5	
D2	0,125	8	
D3	0,2	4	
D4	0,33	24	

Tabla 3-9. Sumatoria de FF y TPR después de implementar RCM. Fuente: Elaboración propia

#	Frecuencia (Fallas/Año)	(TPR/Falla)	(TPR/Año)
A1	0,5	6	19,865
A2	0,333	5	
A3	0,1	5	
A4	0,1	6	
A5	0,125	5	
A6	0,125	2	
A7	0,125	2	
B1	0,1	5	
B2	0,125	4	
B3	0,125	8	
B4	0,05	6	
B5	0,125	5	
B6	0,125	2	
B7	0,125	2	
C1	0,2	5	
C2	0,1	6	
C3	0,1	8	
C4	0,125	2	
C5	0,1	3	
D1	0,1	5	
D2	0,1	8	
D3	0,125	4	
D4	0,2	24	

Con los datos obtenidos podemos calcular el indicador de disponibilidad antes y después de la aplicación de la metodología RCM.

Cálculo de disponibilidad ANTES de la aplicación:

Nota: El tiempo total operativo será una media entre 1670 y 2900 horas maquina/año

$$A(t) = \frac{2285}{2285 + 40,87} * 100 \% = 98,24 \%$$

Cálculo de disponibilidad DESPUÉS de la aplicación:

$$A(t) = \frac{2285}{2285 + 19,865} * 100 \% = 99,13 \%$$

A pesar de que la disponibilidad del equipo presenta un buen desempeño, existe un incremento en la disponibilidad del horno después de la aplicación de la metodología, afectada netamente por las frecuencias presentadas en la estimación de riesgos esperado, donde se estimó que la frecuencia baja por efecto del plan de mantenimiento propuesto.

Para este estudio se entrega un dato de mejora de disponibilidad conservador por dos consideraciones.

La primera: La frecuencia presentada en el riesgo económico esperado presenta valores cercanos a los del riesgo económico actual. Donde estos valores pueden llevarse a frecuencias muy lejanas en comparación de las iniciales.

La segunda: En el análisis de riesgo económico esperado se consideran tiempos para reparar iguales a los del análisis de riesgo económico actual, donde estos tiempos podrían mejorar con el tiempo considerando que ya existe un mantenimiento preventivo asociado a los modos de fallo y las actividades podrían presentar más agilidad en la ejecución reflejando un menor tiempo en la actividad.

3.6.2 Cálculo del indicador de confiabilidad

Frecuencia de fallo (FF), es un indicador técnico de confiabilidad

$$FF = \frac{1}{TPO} \quad ; \quad TPO = \frac{1}{FF}$$

Según los datos del estudio antes de la aplicación de la metodología RCM se presenta la siguiente frecuencia de fallo.

$$FF = 5,205 \left(\frac{Fallas}{Año} \right)$$

$$TPO = \frac{1}{FF} \quad ; \quad TPO = \frac{1}{5,205} = 0,192 \text{ años} = 2,3 \text{ meses}$$

Según los datos del estudio después de la aplicación de la metodología RCM se presenta la siguiente frecuencia de fallo.

$$FF = 3,333 \left(\frac{Fallas}{Año} \right)$$

$$TPO = \frac{1}{FF} \quad ; \quad TPO = \frac{1}{3,333} = 0,300 \text{ años} = 3,6 \text{ meses}$$

Para este estudio el TPO presenta una mejora de 2,3 a 3,6 meses, presentando una mejora de 56,52 %.

3.6.3 Cálculo del indicador de mantenibilidad

Según tablas 3-8 y 3-9 presenta la mejora en los tiempos para reparar donde sus valores son 40,87 horas para antes de la aplicación y 19,865 horas para después de la aplicación, presentando una mejora considerable con una reducción del tiempo en un 105 %.

3.7 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE INDICADORES A PARTIR DE CÁLCULOS ESTADÍSTICOS ANTES Y DESPUÉS DEL RCM

3.7.1 Ejemplo de aplicación de cálculos estadísticos antes del RCM

Para este análisis se utiliza como ejemplo el modo de fallo A1, correspondiente al fallo de rodamientos del motoventilador, se estima que los datos de tiempos operativos están mayormente cercanos a la media y en menor proporción en los extremos, donde se presenta un TPO de valor inferior de 1670 horas, una media de 2288 horas, y un valor superior de 2900 horas.

Además de estimaciones de tiempos para reparar alrededor de las 16 horas según lo establecido para el modo de fallo A1.

Para este ejercicio se utiliza una planilla de Excel que incorpora los cálculos estadísticos para mantenimiento mediante una programación a partir de macro, esta planilla analiza los datos y proponer el tipo de distribución más adecuada para realizar los cálculos.

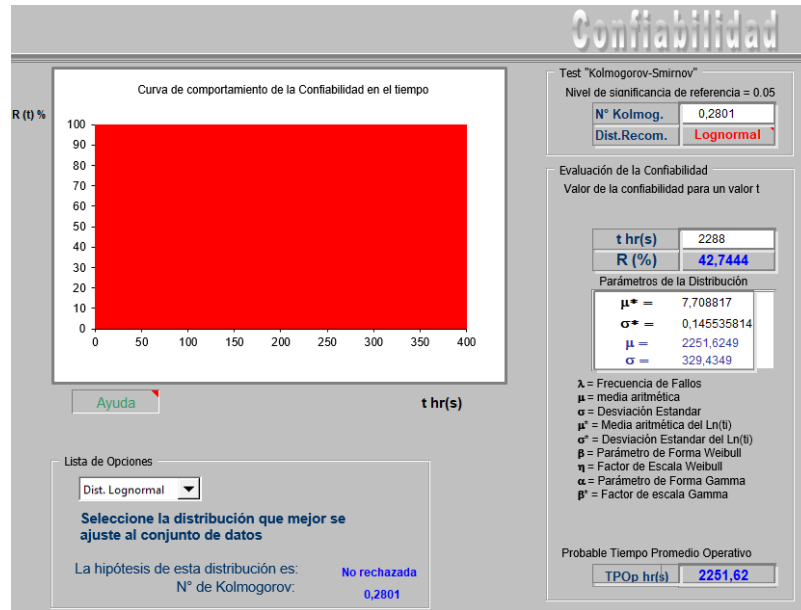
Tabla 3-10. Datos de TO y TFS antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia

TO Hr(s)	TFS Hr(s)
2288	16
2250	15
1700	16
2290	16
2275	15
2800	14
2300	17
1664	15
2000	16
2250	14
2900	18
2200	15
2288	16
2250	15
2290	17

Iniciamos revisando la confiabilidad según distribución Lognormal para la media de 2288 horas, nos presenta una confiabilidad $R(t)$ de 42,74 % que corresponde a la probabilidad que el horno funcione en un tiempo correspondiente a la media calculada.

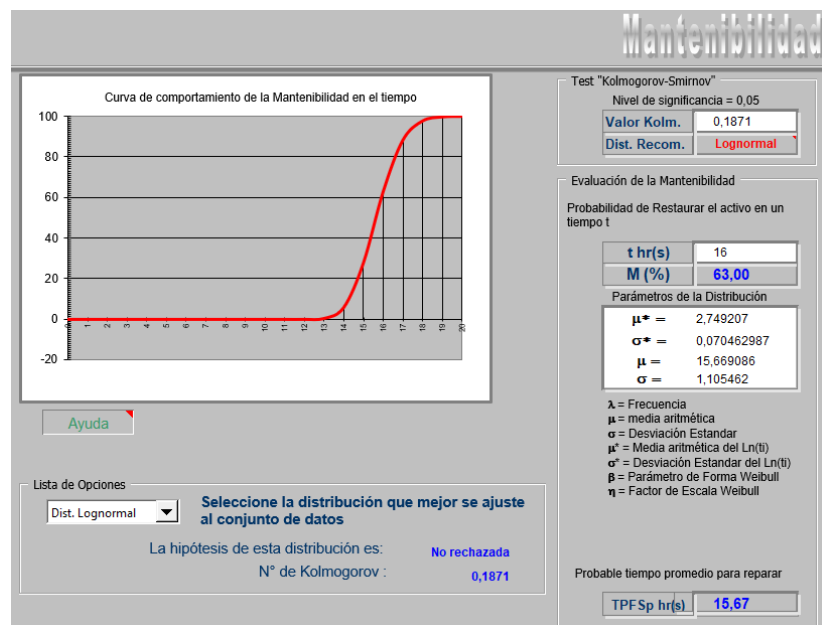
La planilla también presenta un TPO según distribución Lognormal de 2251,62 horas.

Tabla 3-11. Datos de TPO y R(t) antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia



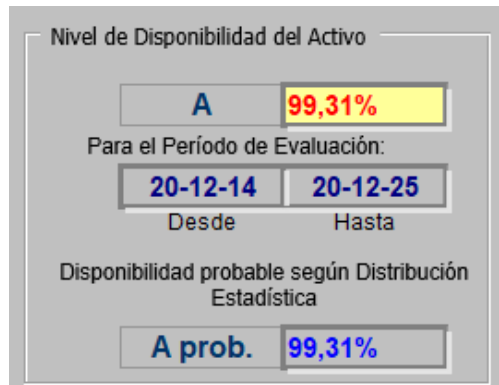
Para el cálculo de la mantenibilidad M(t) se presenta un éxito de realizar la tarea en el tiempo de 16 horas, con un porcentaje de 63 % y un tiempo promedio fuera de servicio de 15,67 horas según distribución Lognormal.

Tabla 3-12. Datos de TPFS y M(t) antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia



La disponibilidad A(t) presenta un valor de 99,31 % en la situación actual, para conceptos de disponibilidad es un valor positivo, pero aun así esta buena disponibilidad presenta un importante riesgo económico.

Tabla 3-13. Indicador de disponibilidad A(t) antes del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia



3.7.2 Ejemplo de aplicación de cálculos estadísticos después del RCM

Para el cálculo después del RCM consideraremos igualmente el modo de fallo A1, pero esta vez con datos del riesgo esperado, en donde se proyecta una frecuencia de fallo cada 2 años, correspondiente a 4576 horas (2288x2), en consecuencia, por la mejora al aplicar el plan de mantenimiento, además de una reducción en los tiempos para reparar de 16 a 6 horas por la implementación de la estrategia de rediseño.

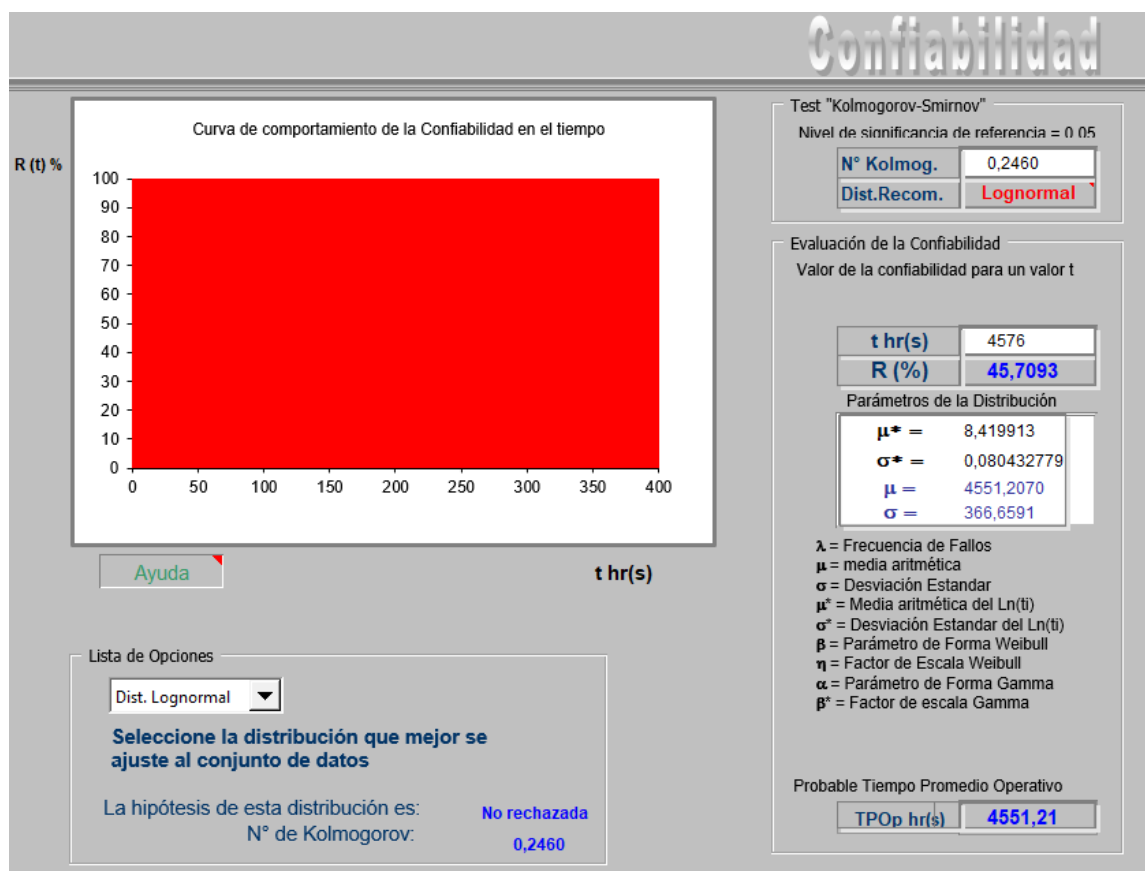
Tabla 3-14. Datos de TO y TFS después del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia

TO Hr(s)	TFS Hr(s)
4576	6
4400	7
4000	6
4580	5
4600	7
5200	6
4650	5
3800	6
4400	6
4600	6
5250	5
4520	7
4576	6
4500	5
4600	7

La confiabilidad según distribución Lognormal para la media analizada de 4576 horas, presenta una $R(t)$ de 45,70 % que corresponde a la probabilidad que el horno funcione en un tiempo correspondiente a la media calculada.

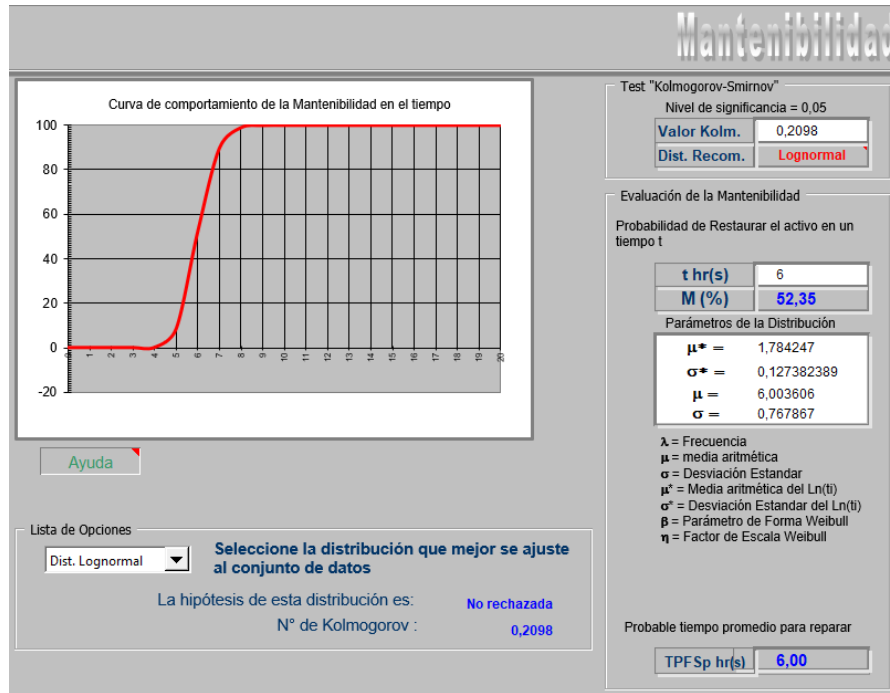
La planilla también presenta un TPO según distribución Lognormal de 4551,21 horas

Tabla 3-15. Datos de TPO y $R(t)$ después del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia



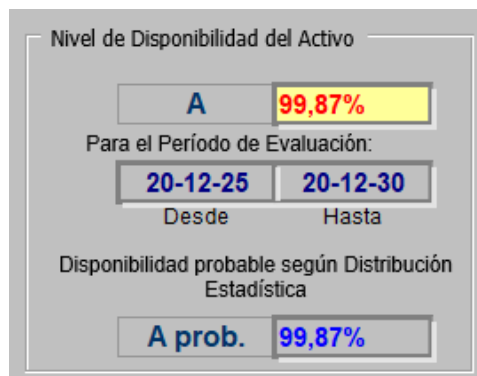
Para el cálculo de la mantenibilidad $M(t)$ se presenta un éxito de realizar la tarea en el tiempo de 6 horas, en un porcentaje de 52,35 % y un tiempo promedio fuera de servicio de 6,0 horas, según distribución Lognormal.

Tabla 3-16. Datos de TPFS y $M(t)$ después del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia



La disponibilidad $A(t)$ presenta un valor de 99,87 % en la situación esperada, para conceptos de disponibilidad en un valor positivo, que supera el valor de la situación actual antes del RCM.

Tabla 3-17. Indicador de disponibilidad $A(t)$ después del RCM cargados a la planilla. Fuente: Elaboración propia



CONCLUSIÓN

El presente trabajo de titulación cumplió con el objetivo general de mejorar la gestión de mantenimiento del horno de ventilación de aire caliente y secado bajo vacío mediante la aplicación de la metodología RCM, evidenciando resultados concretos tanto en indicadores técnicos como económicos.

En una primera etapa, el levantamiento de información y la definición del contexto operacional del horno permitieron comprender el comportamiento del activo, la funcionalidad de sus sistemas y su alta criticidad dentro del proceso productivo. Este análisis evidenció falencias en la gestión de mantenimiento y justificó la necesidad de implementar una estrategia basada en confiabilidad, considerando los impactos operacionales y económicos asociados a sus fallos.

Posteriormente, la aplicación estructurada de la metodología RCM permitió identificar al sistema de ventilación de aire caliente como el más crítico, a partir de un análisis de riesgo cualitativo basado en el tiempo para reparar (TPR), costos de mantenimiento (CM) e impacto en seguridad, higiene y medio ambiente (SHA). Sobre este sistema se desarrolló el análisis FMECA, identificándose 23 modos de fallo en 4 equipos, con un riesgo económico total de \$196.982.879 anuales, donde solo dos modos de fallo concentran el 70,7% del impacto económico en un estudio preliminar.

A partir de estos resultados, se definió un plan de mantenimiento compuesto por 23 actividades, incluyendo tareas de sustitución cíclica, reacondicionamiento, búsqueda de fallos ocultos y mantenimiento basado en condición, con un costo anual de \$4.237.070. Este plan se enfoca en intervenir los modos de fallo de mayor criticidad, bajo criterios de confiabilidad iguales o superiores al 80%, además de incorporar mejoras en la mantenibilidad mediante optimización de tiempos de reparación, logística de repuestos y gestión de recursos.

La implementación de este plan permite proyectar una reducción significativa del riesgo económico, disminuyéndolo a \$119.868.563 anuales, lo que representa un ahorro potencial de \$96.400.144 al año. En términos específicos, el modo de fallo A1 (rotura de rodamientos) concentra el 39,12% del riesgo actual y aporta inicialmente un 50,6% del ahorro potencial total, lo que justificó la realización de un segundo análisis más detallado. En este análisis se compararon las estrategias de sustitución cíclica, tarea a condición y rediseño, determinándose que la estrategia de rediseño es un 63,84% más conveniente que la sustitución cíclica. Además, esta alternativa incrementa su contribución al ahorro

potencial total, alcanzando un 62,6% respecto del total de los 23 modos de fallo, superando el 50,6% estimado en el análisis preliminar.

En relación con el desempeño técnico, la disponibilidad del activo mejora desde un 98,24% a un 99,13%, evidenciando una optimización en la confiabilidad del sistema. Si bien el análisis considera un escenario conservador en mantenibilidad, manteniendo constantes los tiempos de reparación, los resultados reflejan mejoras significativas en la frecuencia de fallos y en la gestión global del mantenimiento.

Finalmente, cabe señalar que el estudio se basa en datos reales complementados con estimaciones, por lo que su precisión puede ser aún mayor mediante la validación continua por parte de equipos multidisciplinarios en terreno.

En conclusión, la metodología RCM se valida como una herramienta altamente efectiva para la gestión de mantenimiento en activos críticos, permitiendo una toma de decisiones basada en riesgo y costo, con impactos directos en la reducción de pérdidas, mejora de la disponibilidad y optimización de recursos, constituyendo además una base sólida para la mejora continua y su futura implementación en otros sistemas del proceso productivo.

RECOMENDACIONES

Se recomienda la aplicación de esta metodología de gestión de mantenimiento, donde se puede aplicar a distintos niveles de la organización, ya sea a una planta, un área o a un equipo, a pesar de que inicialmente pueda generar un costo por las horas hombre utilizadas, además que el proceso de mantenimiento de RCM no trae resultados inmediatos, el beneficio de una buena implementación siempre será reflejado en mayor ganancia para la empresa

En este trabajo se obtuvieron dos modos de fallos presentan el 77,8 % ahorro potencial, un modo de fallo corresponde al equipo motoventilador que es el de mayor impacto económico, para este modo de fallo donde su actividad de mantenimiento es el cambio de los rodamientos del cuerpo distanciador y del motor, se recomienda invertir en un nuevo kit de motoventiladores que permita realizar la actividad mantención en un tiempo estimado de 6 horas en vez de las 16, de tal manera que la detención solo sea el cambio de componente sin realizar el cambio de rodamientos en el taller, que es lo que consume el tiempo. Mejorando la mantenibilidad de este modo de fallo.

Y el segundo modo fallo correspondiente al intercambiador de calor donde su función es reducida por la pérdida de propiedades térmicas del aceite, el impacto en este modo de fallo es el tiempo que se necesita para realizar la actividad donde se debe respetar un procedimiento que establece un filtrado del aceite de 24 horas, para este modo de fallo se recomienda realizar un análisis del aceite en laboratorio para medir las propiedades térmicas en periodos de 6 meses, buscando utilizar la curva PF del RCM para optimizar el uso del aceite y extender los tiempos de cambio de aceite.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. (2025). *Página Web Oficial RHONA S.A.* Obtenido de <https://rhona.cl/seccion/2/rhona-chile.html>
- [2]. (Abril de 2019). Procedimiento interno de secado RHONA. *Procedimiento de Secado*. Viña del Mar, Valparaiso, Chile.
- [3]. (10 de Septiembre de 2012). Especificación técnica del horno Arras Maxei. Francia.
- [4]. (2021). *Carlos Parra, Giovanni Tino, Lenin Mondaca, Arnoldo Sánchez, Jorge Parra: Aplicación práctica de técnica: Mantenimiento centrado en confiabilidad MCC/RCM*. Caso de estudio, Molcasa, Sector planta de envases biodegradable, Honduras. doi:10.13140/RG.2.2.33776.79365/1
- [5]. (1995). *Jones, Richard: Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- [6]. (1991). *Moubray, John: RCM II: Reliability-Centered Maintenance*. New York, USA: Industrial Press Inc.
- [7]. (2002). *UNE-EN 13306: Terminología del mantenimiento*.
- [8]. (1996). *Parra, Carlos: Metodología de Implantación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en la Refinería de Amuay*. Universidad de los Andes, Merida, Venezuela.
- [9]. (2006). *Bloom, N.: Reliability Centered Maintenance: Implementation Made Simple*. New York, USA: McGraw-Hill Inc.
- [10]. (1999). *NORMA SAE JAI011: Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad*. USA: SAE.
- [11]. (2015). *Parra, Carlos; Crespo, Adolfo: Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos*. España: INGEMAN.
- [12]. (1996). *Woodhouse, J.: Course of Reliability Centered Maintenance (RCM) – Section Two: Failure Modes and Effects Analysis*. England: The Woodhouse Partnership.
- [13]. (2022). *NORMA SAE JAI012: Una guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. USA: SAE.