

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSE MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE MEJORA A PLAN DE MANTENIMIENTO PARA UN
EQUIPO CRÍTICO EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE
CEMENTO**

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Ingeniero/a en MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL.

Alumno:

Byron Vergara Gatica

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González

2025



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: PROPUESTA DE MEJORA A PLAN DE MANTENIMIENTO PARA UN EQUIPO CRÍTICO EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE CEMENTO.

Nombre del candidato(a): Byron Luis Matias Vergara Gatica

Carrera / Grado: INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Campus: Viña del mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, CARLOS ANDRÉS BALDI GONZÁLEZ, 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

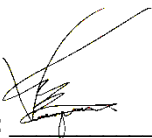
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 11-06-2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 10/06/2026 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.

RESUMEN

KEYWORDS: HORNO ROTATORIO – ANALISIS CRITICIDAD – CONTINUIDAD OPERACIONAL

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo, proponer una mejora al plan de mantenimiento de un equipo crítico, perteneciente a una planta de fabricación de cemento, mediante la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), con el fin de optimizar su disponibilidad operativa, confiabilidad y desempeño económico. La motivación principal del estudio surge a partir de la necesidad de reducir las detenciones no programadas y los elevados costos asociados a fallas recurrentes en equipos que impactan directamente la continuidad operacional y la calidad del proceso productivo.

En una primera etapa, se analizó el contexto operacional de la planta cementera y se realizó un análisis de criticidad, de los principales equipos del proceso productivo, utilizando la matriz semicuantitativa de riesgo, basada en la frecuencia de fallas y las consecuencias asociadas al impacto operacional, flexibilidad operativa, costos de mantenimiento e impacto en seguridad, higiene y medio ambiente. Como resultado de este análisis, se identificó al horno rotatorio de Clinker, como el equipo más crítico de la planta.

Posteriormente, se llevó a cabo un segundo análisis de criticidad, aplicado a los sistemas que componen al horno rotatorio, determinándose que el sistema de casco rotatorio y revestimiento, es el más crítico debido a su frecuencia de fallas e impacto en la producción. A partir de la definición del sistema crítico, se identificaron sus funciones principales y secundarias, mediante un diagrama SIPOC, para luego aplicar un análisis FMECA, que permitió identificar, evaluar y jerarquizar los modos de falla según su número prioritario de riesgo (NPR).

Se lograron identificar 36 modos de falla, de los cuales se priorizaron aquellos con mayor NPR, principalmente asociados al desgaste y desprendimiento del revestimiento refractario, ingreso de aire falso, fallas en el control térmico, desalineamiento estructurales y deficiencia en el monitoreo de condiciones. En base a los resultados, se aplicó la hoja de decisiones RCM, definiendo tareas de mantenimiento preventivo, predictivo, de inspección visual y correctivo controlado, enfocados en reducir la frecuencia de fallas y mitigar consecuencias.

Finalmente, se realizó un análisis de factibilidad, comparando los costos actuales contra la propuesta de mejora, basada en el RCM, generando un ahorro potencial estimado de \$312.520.000 CLP. Con ello, se concluye que la propuesta de mejora al plan de mantenimiento es técnica y económicamente viable.

ÍNDICE

PROPUESTA DE MEJORA A PLAN DE MANTENIMIENTO PARA UN EQUIPO
CRÍTICO EN UNA PLANTA DE FÁBRICACIÓN DE CEMENTO

RESUMEN

ÍNDICE

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN 9

OBJETIVO GENERAL 2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

CAPÍTULO 1: CONTEXTO OPERACIONAL DE LA FÁBRICA DE CEMENTO Y
SELECCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO 3

1 CONTEXTO OPERACIONAL DE LA FÁBRICA DE CEMENTO Y SELECCIÓN
DEL EQUIPO CRÍTICO 4

1.1 PLANTA DE FABRICACIÓN DE CEMENTO..... 4

1.1.1 Organigrama del personal mantenimiento 5

1.2 CONTEXTO OPERACIONAL..... 5

1.2.1 Producción de cemento etapas..... 6

1.2.2 Almacenamiento y molienda de caliza..... 6

1.2.3 Precalcinado y Clinkerización 7

1.2.4 Molienda fina y acopio..... 7

1.2.4.1 Envasado y despacho 7

1.3 PROBLEMÁTICA..... 8

1.4 ANÁLISIS DE CRITICIDAD A EQUIPOS DENTRO DE LA
FÁBRICA 9

1.4.1 IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS FÁBRICA DE CEMENTO... 10

1.4.2 MATRIZ SEMICUANTITATIVA DE RIESGO..... 10

1.5 SELECCIÓN DE EQUIPO CRÍTICO..... 14

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO Y ANÁLISIS MEDIANTE
FMECA 15

2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO HORNO ROTATORIO..... 16

2.1	ANÁLISIS DE CRITICIDAD PARA SISTEMA CRÍTICO.....	18
2.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO	19
2.2.1	SISTEMA CASCO ROTATORIO Y REVESTIMIENTO.....	19
2.3	SIPOC.....	21
2.4	ANÁLISIS FMECA.....	21
2.4.1	Jerarquización de los modos de fallo mediante NPR.....	29
3	PROGRAMA DE ACTIVIDADES Y TAREAS DE MANTENIMIENTO	35
3.1	DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM.....	35
3.1.1	Análisis de consecuencias Evidentes (H) Hidden.....	36
3.1.2	Análisis de consecuencias de seguridad “Safety” (S)	37
3.1.3	Análisis de consecuencias, medio ambiente (E).....	37
3.1.4	Consecuencias operacionales (O)	37
3.1.5	Consecuencias no operacionales (N)	37
3.1.6	Planificación actividades de mantenimiento	38
3.1.6.1	Actividades de sustitución o restauración cíclicas.....	38
3.1.6.2	Actividades preventivas o sujetas a condición	38
3.1.6.3	Actividades de inspección o prueba funcional (Failure-finding) ...	38
3.1.6.4	Actividades reactivas	38
3.2	HOJA DE DECISIÓN DEL RCM.....	41
3.3	ELABORACIÓN DE TAREAS PARA EL PLAN DE MANTENIMIENTO.....	43
3.4	FACTIBILIDAD.....	47
3.5	ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE MEJORA A PLAN DE MANTENIMIENTO.....	53
4	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	54
5	BIBLIOGRAFÍA	55
	ANEXOS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Plan de circulación planta de fabricación de cemento	Fuente: Personal
de mantenimiento empresa contratista Quant.....	4
Figura 1-2. Organigrama Personal mantenimiento planta cemento	5
Figura 1-3: Diagrama de flujo de la producción del cemento	6
Figura 1-4: Matriz cuantitativa de riesgo resultante	14
Figura 2-1: Interior Horno Rotativo.....	16
Figura 2-2: división zonas del horno rotatorio	17
Figura 2-3: Diagrama SIPOC sistema revestimiento y casco rotatorio horno	21
Figura 2-4: Ecuación NPR	29
Figura 3-1: Diagrama de toma de decisiones RCM.....	39
Figura 3-2: Diagrama de toma de decisiones RCM continuación.....	40
Figura 3-3: Ficha planificación de tareas y/o actividades	44
Figura3-4:Carta Gantt programación actividades mantenimiento.....	47
Figura 3-5: Costos propuesta de mantenimiento y ahorro potencial	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Equipos planta fabricación de cemento.....	10
Tabla 1-2: Factor de frecuencia de falla.....	11
Tabla 1-3: Factor de flexibilidad operacional	11
Tabla 1-4: Factor de impacto operacional.....	11
Tabla 1-5: Factor costos de mantención	12
Tabla 1-6: Factor de impacto a la seguridad, higiene y medio ambiente.....	12
Tabla 1-7: Riesgos por clasificación.....	13
Tabla 1-8: Resumen evaluación de equipos.	13
Tabla 2-1. Sistemas del equipo.....	17
Tabla 2-2: Factor de frecuencia de falla para horno rotatorio	18
Tabla 2-3: Resultados análisis de criticidad sistema de Horno rotatorio	18
Tabla 2-4: Riesgos por clasificación.....	18
Tabla 2-5: Descripción componentes del sistema crítico.....	20
Tabla 2-6: Funciones del sistema revestimiento y casco rotatorio horno	22
Tabla 2-7: FMECA, Función principal I.....	23
sistema revestimiento y casco rotatorio horno	23
Tabla 2-8: FMECA, Función principal II	23
del sistema revestimiento y casco rotatorio horno.....	23
Tabla 2-9: FMECA, Función secundaria III	25
del sistema revestimiento y casco rotatorio horno.....	25
Tabla 2-10: FMECA, función secundaria IV	26
sistema revestimiento y casco rotatorio horno	26
Tabla 2-11: FMECA, función secundaria V	27
sistema revestimiento y casco rotatorio horno	27
Tabla 2-12: FMECA, función secundaria VI	28
sistema revestimiento y casco rotatorio horno	28
Tabla 2-13: Criterio de ocurrencia de la falla.....	30
Tabla 2-14: Criterio de evaluación para la detección de fallas.	31
Tabla 2-15: Criterio de evaluación para determinar la severidad del efecto.....	32
Tabla 2-16: jerarquización NPR de modos de fallo sistema horno rotatorio	33
Tabla 3-1: Preguntas del RCM en diagrama de decisión del RCM.....	36
Tabla 3-2: Hoja de decisión RCM	41
Tabla 3-3: Planificación actividades para la propuesta del plan de mantenimiento.....	43
Tabla 3-4: Programación actividades de mantenimiento	45
Tabla 3-5: Plan actual según modos de falla	48
Tabla 3-6: Propuesta de mantenimiento Revestimiento y horno rotatorio	50

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

FF	.	Frecuencia de fallos
C	.	Consecuencia de los eventos de falla
IO	.	Impacto operacional
FO	.	Flexibilidad operacional
CM	.	Costos de mantenimiento
SHA	.	Impacto en seguridad, higiene y medio ambiente
FMECA	.	Análisis de modos de falla, efectos y criticidad
RCM	.	Mantenimiento centrado en confiabilidad
NPR	.	Número prioritario de riesgos
ITO	.	Inspector técnico de obra
AST	.	Análisis seguro del trabajo
SIPOC	.	Proveedores (Suppliers), Entradas (Inputs), Procesos (Process), Salidas (Outputs) y Clientes (Customers)

B. SIMBOLOGÍA

m2	.	Metro cuadrado
kg	.	Kilogramo
m3	.	Metro cúbico
min	.	Minutos
gr	.	Gramos
hrs	.	horas

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, el mantenimiento industrial ha evolucionado, para convertirse en una función estratégica dentro de las organizaciones productivas. No se trata únicamente de reparar fallas, sino de un conjunto de actividades técnicas, administrativas, organización y planificación de estas, orientadas a garantizar el desempeño óptimo de los equipos, instalaciones y sistemas de que forman parte de una planta, el propósito central es asegurar la continuidad operacional, prolongar la vida útil de los activos y mantener la producción bajo parámetros de seguridad, calidad y eficiencia.

En la actualidad, la creciente competitividad de los mercados y la necesidad de contar con sistemas de producción más confiables, exigen que las empresas implementen metodologías de mantenimiento modernas y efectivas, ya que, dentro de la planta de fabricación de cemento se estima que por cada hora de detención implica una pérdida cercana a 65 toneladas de cemento, lo que, considerando un valor promedio de venta de \$140.000 CLP por tonelada, equivale a un impacto económico de \$9,1 millones de pesos por hora de detención. En este contexto destaca la implementación del RCM (Reliability Centered Maintenance) o mantenimiento centrado en la confiabilidad, una estrategia que permite identificar las funciones críticas de los equipos, anticipar posibles modos de falla y definir acciones preventivas, que aseguren su disponibilidad. Su aplicación contribuye a disminuir interrupciones inesperadas, tanto planificadas como no planificadas, lo que impacta directamente en la reducción de costos operativos y en la optimización de recursos.

El diseño de un programa de mantenimiento basado en la confiabilidad, también ofrece beneficios adicionales: mejora la seguridad de las operaciones, disminuye el riesgo de accidentes, incrementa la eficiencia energética y asegura que los activos funcionen bajo condiciones óptimas, durante más tiempo. Además, al evitar fallas recurrentes o retrabajos, situación común cuando un equipo es intervenido, vuelve a presentar fallas al corto plazo.

En definitiva, contar con un sistema de mantenimiento bien planificado y soportado en metodologías como RCM, no sólo reduce el impacto económico de las fallas, sino que también aporta valor estratégico al negocio, al garantizar una producción estable, segura y competitiva en el largo plazo.

OBJETIVO GENERAL

- Proponer mejora al plan de mantenimiento de un equipo crítico, perteneciente a una planta de producción de cemento melón la calera, mediante la metodología RCM.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el contexto operacional de la planta de producción de cemento, identificando el equipo crítico y prioritario, mediante un análisis semicuantitativo de riesgo.
- Desarrollar el análisis funcional y de modos de fallo del equipo crítico seleccionado, aplicando la metodología FMECA, considerando su NPR para cada modo de fallo.
- Definir tareas de mantenimientos adecuadas para el equipo crítico, utilizando el árbol lógico de decisiones RCM, con el fin de establecer acciones basadas en los modos de fallo más críticos.

CAPÍTULO 1: CONTEXTO OPERACIONAL DE LA FÁBRICA DE CEMENTO
Y SELECCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO

1 CONTEXTO OPERACIONAL DE LA FÁBRICA DE CEMENTO Y SELECCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO

El primer capítulo abarca, la descripción del proceso de fabricación de cemento de la planta y su contexto operacional, para posteriormente elaborar una matriz semicuantitativa de riesgos, con el fin de poder seleccionar el equipo crítico con el cual se trabajará.

1.1 PLANTA DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

La planta de cemento Melón S.A, cuenta con distintas áreas de producción las cuales son cemento, hormigón premezclado, morteros predosificados y áridos especializados, para abastecer el sector de la construcción e industria.

El presente trabajo, se llevará a cabo en una planta de producción, específicamente a la elaboración del cemento. En esta instalación, parte de las funciones operativas y de soporte, son delegadas a empresas contratistas especializadas, las cuales poseen un contrato integral de mantenimiento, que abarca tanto labores preventivas como correctivas, dentro de toda la planta de fabricación de cemento.

Adicionalmente, las mismas empresas contratistas, tienen adjudicado el servicio de lubricación y monitoreo sintomático, el cual incluye actividades de mantenimiento predictivo y lubricación de los equipos, según rutas de trabajo previamente definidas.

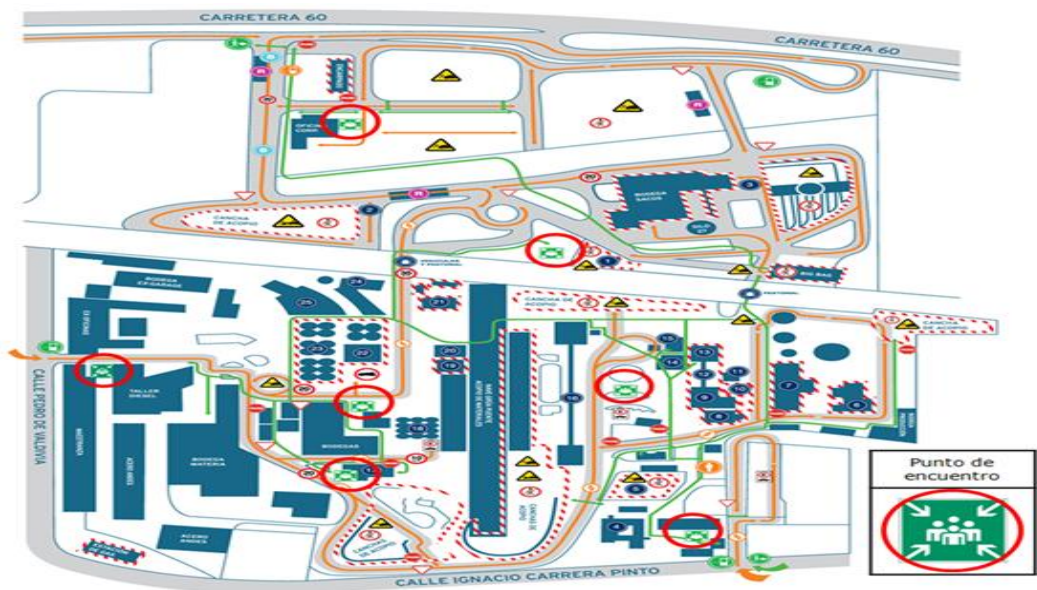


Figura 1-1. Plan de circulación planta de fabricación de cemento
Fuente: Personal de mantenimiento empresa contratista Quant.

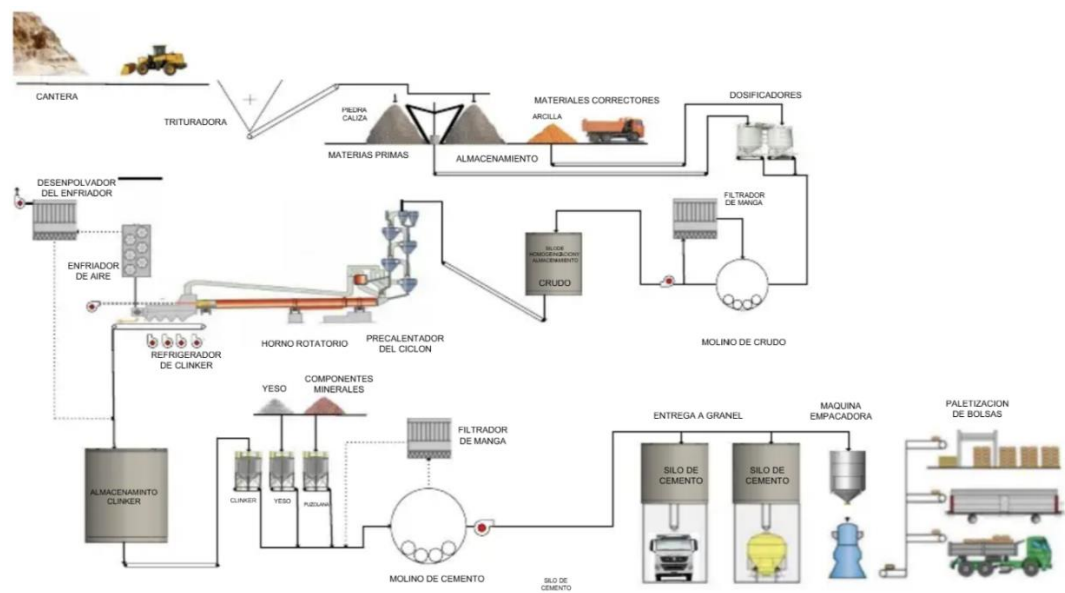


Figura 1-3: Diagrama de flujo de la producción del cemento

Fuente: Figura extraída de presentación Melón S.A

1.2.1 Producción de cemento etapas

La producción n o fabricación de cemento las dividiremos en las siguientes etapas: almacenamiento dosificación y molienda de caliza,

1.2.2 Almacenamiento y molienda de caliza

Las materas primas son almacenadas por tipo y se dosifican para ajustar la formulación química estas materias primas, son trasladadas mediante cintas transportadoras y elevadores de capacho hasta las tolvas de dos molinos de bolas. Una corriente de gases a través de los molinos permite el secado de la caliza. El molido crudo es trasladado mediante cintas transportadoras y elevadores es llevado a silos de aproximadamente 700 toneladas cada uno. Cumpliendo así el proceso de la molienda con material de gran finura con un % retenido en 90µm. y humedad menor al 1-2% En este proceso se efectúa la selección de los materiales, de acuerdo con el diseño de mezcla previsto, para optimizar el material crudo que ingresará al horno.

1.2.3 Precalcinado y Clinkerización

El polvo de caliza almacenado en los silos es transportado hacia el horno para iniciar el proceso de calcinación. Etapa clave para la producción de Clinker. La harina cruda se introduce mediante un sistema de transporte neumático y es cuidadosamente dosificada por suspensión de gases a un intercambiador de calor, que cuenta con varias etapas de precalentamiento donde parte del carbonato de calcio comienza a descomponerse (700–900 °C) liberando CO₂ dando lugar a la formación del Clinker. El intercambio de calor se produce mediante transferencias térmicas por contacto íntimo a temperaturas de 950 a 1,100°C, en un sistema de 4 a 6 ciclones en cascada, Dispuestos al interior de una torre con una altura de más de 100 metros denominada torre de ciclones

La materia prima cae por gravedad al horno (cilindro horizontal levemente inclinado), donde el calor alcanza 1450°C al interior y 2000°C la llama.

Posteriormente al final del horno sale Clinker en forma de nódulos con un tamaño 2-25mm, como el Clinker sale a una alta temperatura para poder cristalizar las fases deseadas pasa a un proceso de enfriamiento rápido los cuales son tipo parrilla o “grate” con aire forzado bajando su temperatura entre unos 100-200 °C en cuestión de minutos. Luego pasa a silos de almacenamiento para el control de humedad hasta la molienda fina.

1.2.4 Molienda fina y acopio

El Clinker se muele junto con yeso (3-5%) , y según el tipo de cemento con adiciones (filler, escoria, puzolana) en los molinos de bolas para cemento o prensas de rodillos con separadores neumáticos, que permiten obtener la finura requerida y específica necesaria. El yeso regula el fraguado al controlar la hidratación del C₃A. Como último punto, el cemento es transportado al proceso de envaso y despacho.

1.2.4.1 Envasado y despacho

El cemento es enviado mediante equipos neumáticos a los silos de almacenamiento. Desde estos silos, se pueden cargar camiones para vender cemento a granel o mediante cintas transportadoras, se envía el cemento a la máquina envasadora que entrega sacos de

diferentes pesos. Desde allí, una cinta de transporte lleva los sacos a los lugares de almacenamiento y despacho.

1.3 PROBLEMÁTICA

De acuerdo con los estados financieros al primer trimestre del año 2025, la planta cementera registró una ganancia neta aproximada de \$8.432 millones de pesos chilenos, cifra que, si bien refleja un resultado positivo, representa menos del 50% de las utilidades alcanzadas en períodos considerados óptimos para la operación. Uno de los principales factores que incide en esta situación es el mantenimiento correctivo no planificado en equipos críticos del proceso productivo, cuya falla genera detenciones no programadas de la planta. Se estima que cada hora de detención provoca una pérdida aproximada de 65 toneladas de cemento, lo que, considerando un valor promedio de venta de \$140.000 CLP por tonelada, representa un impacto económico cercano a los \$9,1 millones de pesos por hora de parada. Este escenario pone en evidencia la necesidad de mejorar la estrategia de mantenimiento, orientada hacia un enfoque más preventivo y predictivo.

La planta dispone de maquinaria y equipos que permiten llevar a cabo labores de mantenimiento preventivo y correctivo, sin embargo, la experiencia demuestra que este ámbito está en constante evolución. Las estrategias actuales, aunque funcionales, no siempre resultan suficientes para enfrentar las contingencias derivadas de fallas imprevistas o retrabajos, lo cual impacta tanto en la confiabilidad de los activos como en la continuidad de la producción.

Por ello surge la necesidad de fortalecer el sistema de gestión de mantenimiento mediante la aplicación de la metodología RCM, que permite identificar y priorizar los equipos más críticos, reducir las intervenciones correctivas no planificadas y aumentar la confiabilidad operacional.

Como parte de este trabajo, se realizará un análisis de criticidad de los equipos, seleccionando el más crítico para someterlo a un análisis funcional y un estudio de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA). A partir de estos resultados, se elaborará un plan de mantenimiento actualizado, con pautas y procedimientos que fortalezcan la gestión de activos de la planta.

1.4 ANÁLISIS DE CRITICIDAD A EQUIPOS DENTRO DE LA FÁBRICA

Para poder identificar el equipo con mayor criticidad, se pretende jerarquizarlos, utilizando el método de matriz semicuantitativa de riesgo, en el cual se evalúa el riesgo de ciertos factores y genera un modelo de factores ponderados. Se utiliza el valor del producto de dos ítems, que son Frecuencia de Falla (FF) por consecuencia (C).

$$\text{CRITICIDAD} = \text{FF} \times \text{C} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

C: Consecuencias de los eventos de falla

FF: Factor de frecuencia de falla

La consecuencia se conforma a través de los factores: Impacto Operacional (IO), Flexibilidad Operacional (FO), Costo de mantenimiento (CM) e impacto en Salud – higiene – medio ambiente (SHA). Estos factores se pueden resumir en la siguiente ecuación:

$$\text{CONSECUENCIA} = ((\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}) \quad (\text{Ec. 1.2})$$

La ecuación se define de la siguiente manera:

C: Consecuencias de los eventos de falla

FF: Factor de frecuencia de falla

IO: Impacto operacional

FO: Impacto por flexibilidad operacional en la producción

CM: Impacto en costos de mantenimiento

SHA: Impacto en Seguridad, Higiene y Medio Ambiente

Obteniendo estos resultados se disponen en la matriz, para identificar aquellos equipos dentro del rango críticos para continuar seleccionando uno

1.4.1 IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS FÁBRICA DE CEMENTO.

Cada uno de los equipos a modo macro más involucrados en el proceso de fabricación hasta envasado del cemento, son ordenados mediante un código identificador (Ver tabla 1-1), para posteriormente ser analizados por medio de la matriz semicuantitativa de riesgo y poder clasificar aquellos más críticos y dentro de estos el más crítico.

Tabla 1-1: Equipos planta fabricación de cemento

IDENTIFICADOR	EQUIPOS EN PLANTA CEMENTO
M-1	Filtro de mangas
M-2	Dosificadores
M-3	Molino crudo
M-4	Precalentador de ciclones
M-5	Horno rotatorio
M-6	Enfriador de Clinker
M-7	Desempolvador del enfriador
M-8	Cintas de alimentación
M-9	Transportadores y elevadores
M-10	Molino cemento
M-11	Silos de almacenamiento y homogenización
M-12	Maquina envasadora

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa.

1.4.2 MATRIZ SEMICUANTITATIVA DE RIESGO

A continuación, se evaluarán cada uno de los equipos anteriormente identificados considerando los siguientes factores estipulados en, tabla 1-2 (FF), tabla 1-3 (FO), tabla 1-4 (IO), tabla 1-5 (CM), tabla 1-6 (SHA), una vez obtenidos los resultados para cada equipo se utilizarán las ecuaciones (Ec. 1.1) y (Ec. 1.2), para poder tener el valor final total de criticidad.

Tabla 1-2: Factor de frecuencia de falla

Frecuencia de fallos (FF)	Factor
sobre 6 fallos/año	5
de 5 a 6 fallos/año	4
de 3 a 4 fallos /año	3
de 1 a 2 fallos/año	2
menor a 1 fallos/ año	1

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa.

Tabla 1-3: Factor de flexibilidad operacional

Flexibilidad operacional (FO)	Factor
No hay función de repuesto	7
Repuestos solo por encargo a fabricante	6
Existe respaldo	5
Hay opción de repuestos alternativos	4

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Tabla 1-4: Factor de impacto operacional

Impacto operacional (IO)	Factor
Parada inmediata de la producción del área asociada	6
Impacto en niveles de producción y calidad	5
Impacto en costos operacionales asociados a la detención	4
No ocurre un impacto significativo en la producción	3

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Tabla 1-5: Factor costos de mantención

Costo de mantenimiento (CM)	Factor
Mayor a \$2.000.000	6
De \$1.500.001 hasta \$2.000.000	5
De \$1.000.001 hasta \$1.500.000	4
De \$600.001 hasta \$1.000.000	3
De \$200.000 hasta \$600.000	2
Menor a \$200.000	1

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Tabla 1-6: Factor de impacto a la seguridad, higiene y medio ambiente

Impacto de SHA	Factor
Afecta el ambiente produciendo daños severos	8
Afecta seguridad humana tanto interna como externa	6
Provoca daños menores a las instalaciones	5
El impacto en instalaciones es alto y requiere de precaución para el personal humano	7
Provoca daños menores al personal propio (accidentes, incidentes)	2
Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	3
No provoca ningún tipo de daño a personas, instalaciones o al Ambiente	1

Fuente: Elaboración propia basado en capítulo I Mantenimiento Industrial

Una vez determinados los parámetros de análisis y la ponderación asignada a cada factor, se realiza la evaluación de los equipos pertenecientes al área de la planta de cemento previamente identificados, con el propósito de calcular su nivel de criticidad (ver tabla 1-8). Posteriormente, con los resultados obtenidos, se define una escala de clasificación que permite jerarquizar los equipos según su grado de criticidad (ver tabla 1-7).

Tabla 1-7: Riesgos por clasificación

CLASIFICACION POR CRITICIDAD	
Críticos	151-275
Semicríticos	71-150
No críticos	14-70

Fuente: Elaboración propia con información apuntes de clases

Tabla 1-8: Resumen evaluación de equipos.

IDENTIFICADOR	EQUIPOS EN PLANTA CEMENTO	FF	IO	FO	CM	SHA	C	TOTAL	Clasificación
M-1	Filtro de mangas	4	5	5	3	8	36	144	Semi-crítico
M-2	Dosificadores	2	5	5	2	3	30	60	No crítico
M-3	Molino crudo	4	6	6	4	3	43	172	crítico
M-4	Precalentador de ciclones	3	6	6	5	6	47	141	Sem-crítico
M-5	Horno rotatorio	4	6	7	6	7	55	220	crítico
M-6	Enfriador de Clinker	3	5	5	4	6	35	105	Semi-crítico
M-7	Desempolvador del enfriador	2	4	5	2	5	27	54	No crítico
M-8	Cintas de alimentación	5	5	4	3	2	25	125	Semi-crítico
M-9	Transportadores y elevadores	5	5	4	3	2	25	125	Semi-crítico
M-10	Molino cemento	4	6	6	4	4	44	176	crítico
M-11	Silos de almacenamiento y homogenización	2	5	5	3	6	34	68	No crítico
M-12	Maquina envasadora	3	4	5	2	1	23	69	No crítico

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa.

Una vez se presentan los resultados de cada equipo evaluados según los criterios y parámetros anteriormente establecidos, se presenta la imagen de la matriz semicuantitativa de riesgo (Ver figura 1-4), donde se esquematiza las áreas y valores que abarcan según su cuan más alto es su riesgo de criticidad calculado, pudiendo observar que dentro del área crítica se ubican más de un equipo, por lo que se ubicara el con mayor total de criticidad calculada según la tabla anterior.

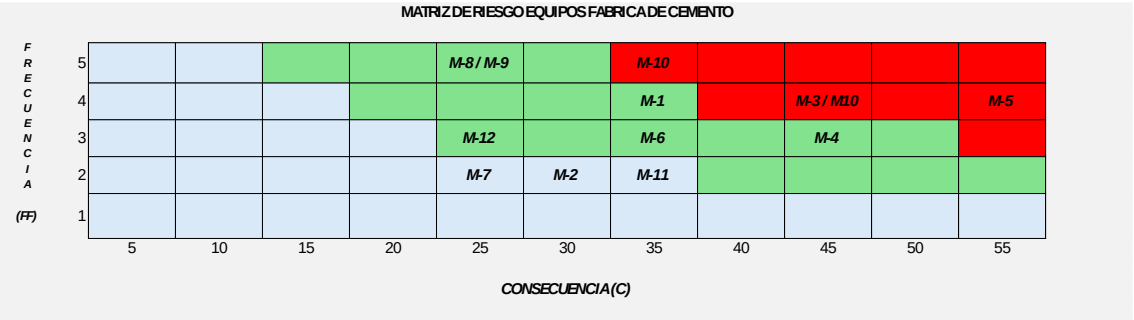


Figura 1-4: Matriz cuantitativa de riesgo resultante

Fuente: Elaboración propia con información de la Fabrica cementera.

1.5 SELECCIÓN DE EQUIPO CRÍTICO.

Del análisis semicuantitativo de riesgos, aplicado a los equipos de la planta de cemento, se identifican como más críticos el M-5 (Horno rotatorio), el M-10 (Molino de cemento) y el M-3 (Molino crudo), debido a que concentran los mayores valores de criticidad, en comparación con el resto de los equipos, tal como se muestra en la Tabla 1-8 “Matriz semicuantitativa de riesgo resultante”. De ellos, se priorizará el Horno rotatorio (M-5), dado su rol esencial en la transformación del crudo en Clinker y la alta severidad de sus consecuencias ante fallas, tanto en términos de impacto operativo, como en costos de mantenimiento e impacto al medio ambiente. Para este equipo se recomienda un fortalecimiento del plan de mantenimiento, mediante la aplicación de una metodología FMECA, que permita detallar sus posibles fallas funcionales y críticas dentro del proceso, identificar las causas raíz de los modos de fallas recurrentes y evaluar la gravedad de sus consecuencias. Con ello se podrán implementar acciones correctivas y preventivas, que contribuyan a disminuir la frecuencia de fallas y aumentar la probabilidad de detectar las fallas, antes de su ocurrencia, optimizar la disponibilidad y reducir costos asociados a mantenimiento correctivos que se pueden evitar.

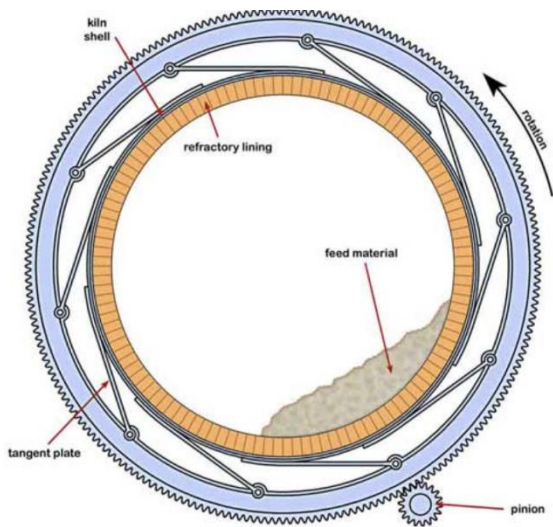
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO Y ANÁLISIS
MEDIANTE FMECA

2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CRÍTICO HORNO ROTATORIO

El horno rotatorio es uno de los equipos clave en la producción de cemento. Se utiliza en el proceso de calcinación, donde las materias primas (caliza, arcilla y otros aditivos) se someten a altas temperaturas para formar Clinker, el componente principal del cemento. Es un cilindro metálico de gran longitud, inclinado ligeramente hacia abajo desde el extremo de alimentación hasta el extremo de descarga. Suele estar revestido internamente con ladrillos refractarios para protegerlo del calor extremo y la abrasión (Ver figura 2-1), en este equipo ocurren todas aquellas reacciones químicas más importantes donde se forma el silicato tricálcico, a temperaturas de 1200 -1300 °C el crudo se deshidrata y se descarbonata formando silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos.

A continuación, se señalan la división de sistemas del horno rotatorio utilizada para realizar un análisis de criticidad, y poder trabajar con su sistema más crítico, destacando su función y relevancia en el proceso

Figura 2-1: Interior Horno Rotativo



Fuente: www.https://cementplants.es/clinker-production/rotary-kiln/

Además, podemos analizar el horno rotatorio identificando tres zonas, zona de precalentamiento, zona intermedia y la zona fría la cual es donde termina el proceso de

Clinker y se busca bajar su temperatura a 400°C desde la temperatura de proceso de 1450°C (Ver figura 2-2).

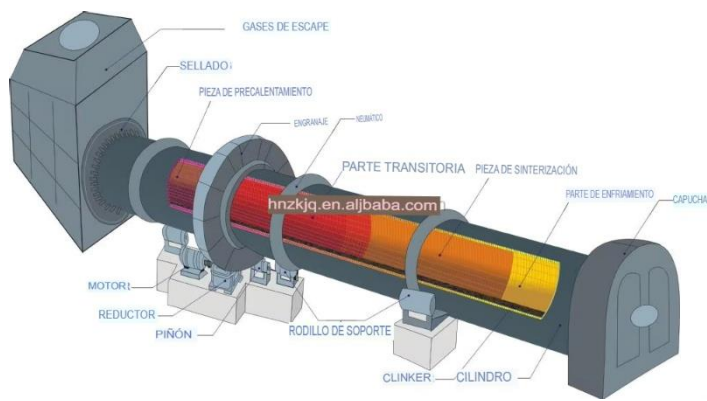


Figura 2-2: división zonas del horno rotatorio

Fuente: [www.https://trends.directindustry.es/xinxiang-great-wall-machinery-co-ltd](https://trends.directindustry.es/xinxiang-great-wall-machinery-co-ltd)

Tabla 2-1. Sistemas del equipo

Sistema	Descripción General
Motor y Soporte Mecánico	Conjunto encargado de soportando su peso y asegurando la alineación estructural, y accionamiento principal de giro del horno
Revestimiento y casco Rotatorio del horno	Comprende la Estructura metálica principal con su revestimiento y componentes que permiten la rotación encargados de la distribución uniforme a lo largo del proceso y contención del material a altas temperaturas
Combustión y alimentación de calor	Incluye el quemador Principal, suministro de combustible y control de llama, responsables del proceso térmico de Clinkernización.
Control Térmico monitoreo y flujo de gases	Sistema de ventiladores, sellos y ductos de aire que regulan el flujo de gases, presión interna y eficiencia energética.

Fuente: Elaboración propia en base a información planta cementera

2.1 ANÁLISIS DE CRITICIDAD PARA SISTEMA CRÍTICO

Para determinar cuál es el sistema del equipo con mayor nivel de criticidad, se realizará una jerarquización, empleando el método de matriz de riesgo semicuantitativa, de acuerdo con lo establecido en la Tabla 2-2, en la cual se consideran nuevos rangos en la frecuencia de fallas ya que se está analizando los sistemas en detalle y no generalizadas. Además, para evaluar los demás factores involucrados, se tomarán en cuenta las Tablas 1-3 (FO), 1-4 (IO), 1-5 (CM) y 1-6 (SHA), las cuales fueron detalladas en el capítulo anterior.

Tabla 2-2: Factor de frecuencia de falla para horno rotatorio

Frecuencia de fallos (FF)	Factor
sobre 7 fallos/año	3
de 4 hasta 7 fallos/año	2
de 0 hasta 3 fallos /año	1

Fuente: elaboración propia

Tabla 2-3: Resultados análisis de criticidad sistema de Horno rotatorio

Identificador	Sistemas	FF	IO	FO	CM	SHA	CC	TOTAL	Clasificación
SIS-1	Motor y Soporte Mecánico	3	5	4	4	7	31	93	Semi críticos
SIS-2	Revestimiento y casco Rotatorio del horno	3	6	5	4	8	42	126	critico
SIS-3	Combustión y alimentación de calor	3	4	4	3	8	27	81	Semi críticos
SIS-4	Control Térmico y flujo de gases	2	4	3	4	5	21	42	No Crítico

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-4: Riesgos por clasificación

Riesgo por clasificación	Críticos	101-165
	Semi críticos	61-100
	No críticos	14-60

Fuente: Elaboración propia en base a tabla de criterios 1-1 y fórmula de cálculo de riesgo.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO

Con base en los resultados obtenidos del análisis crítico, aplicado a los sistemas del equipo horno rotatorio evaluados y jerarquizados en la Tabla 2-3, y considerando los riesgos de clasificación mostrados en la Tabla 2-4, se determina que el sistema revestimiento y casco rotatorio del horno es el más crítico dentro del Equipo Horno rotativo. Esto se debe a su alta recurrencia de fallas tanto estructurales como de proceso, impacto dentro de la operación y producción de cemento, ya que al no poder mantenerse operando genera pérdidas por no producción y la importancia del factor SHA, ya que el estado de este sistema influye directamente en el control de la contaminación ambiental y en la salud del personal que trabaja en la fábrica.

2.2.1 SISTEMA CASCO ROTATORIO Y REVESTIMIENTO

Dentro de este sistema su función principal es el proceso de fabricación de cemento es llevar a cabo la calcinación y sinterización de las materias primas para producir Clinker el cual es el componente base del cemento, proceso que inicia con harina cruda a altas temperaturas (hasta 1450°C) promoviendo las reacciones químicas necesarias , posteriormente se descarbonata la caliza eliminando el CO_2 y convirtiéndola en óxido de calcio (CaO), sintetiza el material para formar nodos de Clinker compuestos por silicatos , aluminatos y ferritos de calcio, esenciales para las propiedades del cemento todo este proceso llevado a cabo dentro de este sistema se optimiza energéticamente aprovechando el calor de los gases y asegurando una mezcla homogénea de las materias en movimiento continuo a continuación se muestra la descripción de los componentes del sistema (ver tabla 2-5)

Tabla 2-5: Descripción componentes del sistema crítico

CASCO ROTATORIO DEL HORNO Y REVESTIMIENTO	
Componentes	Descripción
Casco del horno	Cilindro metálico fabricado en acero al carbono su función es contener la mezcla de crudo, permitir su desplazamiento, debe resistir altas temperaturas, tensiones mecánicas, vibraciones y la expansión térmica generada en su operación.
Revestimiento refractario	Recubrimiento interno hecho de ladrillos de magnesita, espinela, alúmina o dolomita, según su zona del horno (400-1450 °C). proteger el casco, minimizar perdidas térmicas y resistir abrasión y ataque químico del Clinker, es el elemento más crítico: si falla, se expone el casco a deformaciones graves.
Anillos de retención (tires)	Aros metálicos de acero fundido colocados alrededor del casco, con tolerancias de expansión. Distribuyen uniformemente el peso total del horno, mantienen su circularidad, son esenciales para la alineación estructural durante la rotación.
Juntas de dilatación	Espacios y empaques entre secciones del casco que permiten absorber la expansión térmica longitudinal del horno, evita que las dilataciones generen esfuerzos excesivos, fisuras, pandeo o desalineación.
Sensores de temperatura y desgaste	Son fundamentales para el mantenimiento preventivo, detectan (hot spots) puntos calientes, pérdida de revestimiento, anomalías térmicas y desgaste estructural.
Rodillos de soporte	Rodillos metálicos de gran resistencia que sostienen el peso del horno y permiten su rotación sobre los anillos.
Sellos radiales y axiales	Ubicados en ambos extremos del horno, evitan la entrada de aire falso, que enfría la llama y aumenta el consumo de combustible. también evitan la fuga de gases calientes hacia el ambiente, aseguran eficiencia térmica y seguridad para el personal.
Componentes lubricantes y piñón	línea de lubricación y dosificadores automáticos encargados de mantener los componentes lubricados para evitar su desgaste por fricción.

Fuente: elaboración propia en base a información planta fabricación de cemento

2.3 SIPOC

A continuación, en la siguiente figura 2-3, podemos identificar mediante un diagrama SIPOC las funciones principales y secundarias teniendo en cuenta la finalidad del proceso del sistema critico seleccionado.

(S) Suppliers	(I) Inputs	(P) Process	(O) Outputs	(C) Customers
Operadores de alimentación, sistema de combustión planta de molienda de crudo	Harina cruda pre-calcificada, flujo de gases calientes combustible (Carbón, gas natural)	Contención del material, procesamiento uniforme de la mezcla por el revestimiento para lograr calcinación y sinterización en el horno rotatorio, enfriamiento del Clinker	-Clinker enfriado y estabilizado	Molino de cemento y control de calidad envasado.
			-Energía termica recuperada para precalentamiento	Torre de ciclones

Figura 2-3: Diagrama SIPOC sistema revestimiento y casco rotatorio horno
Fuente: Elaboración propia en base a información planta fabricación de cemento

2.4 ANÁLISIS FMECA

Después de obtener un análisis del proceso de funcionamiento del sistema de horno rotatorio por medio del diagrama SIPOC identificando la función principal y secundarias establecidas en la tabla 2-6. A través del análisis FMECA, es posible identificar los componentes clave que intervienen en las diversas fallas funcionales del sistema, así como los modos de fallo asociados y los diferentes efectos que generan en el proceso crítico de calcinación y sinterización en el sistema de horno rotatorio. Este enfoque permite establecer un orden de prioridad para las actividades de mantenimiento, enfocándose en los elementos más críticos, con el objetivo de optimizar la operación del sistema y prevenir interrupciones o impactos significativos en su rendimiento.

Tabla 2-6: Funciones del sistema revestimiento y casco rotatorio horno

Funciones Sistema casco rotatorio y revestimiento		
Función principal	I	Mantener la integridad térmica del horno durante la sinterización a una temperatura de 1450°C.
	II	Garantizar la rotación continua y uniforme durante la operación entre 2,5 – 4 rpm.
Función secundaria	III	Proteger estructura metálica del horno frente al calor y corrosión
	IV	Mantener hermeticidad del sistema y conservar eficiencia térmica
	V	Monitoreo y control de condiciones térmicas del casco y revestimiento
	VI	Permitir la dilatación térmica controlada del casco sin generar sobreesfuerzos.

Fuente: Elaboración propia con información de empresa cementera

A partir de las funciones tanto principales como secundarias definidas en la tabla 2-6 se debe identificar todas las posibles fallas funcionales, y para cada una de las fallas funcionales encontradas todos los modos de falla y efectos que generan, el modo de falla se evalúa según su probabilidad de ocurrencia, detección y severidad, especialmente aquellos que impiden que el proceso cumpla su función correctamente. Los resultados del análisis FMECA, se presentan a continuación (ver tablas 2-7, 2-8, 2-9, 2-10, 2-11, 2-12 respectivamente).

Tabla 2-7: FMECA, Función principal I
sistema revestimiento y casco rotatorio horno

Funciones			Falla Funcional		Modos de Falla		Efectos de Falla	
P R I N C I P A L	I	Mantener la integridad térmica del horno durante la sinterización a una temperatura de 1450°C.	A	Temperaturas insuficientes para completar la sinterización.	1	Sellos dañados ingreso de aire falso no deseado	1	Genera una mala calidad en el Clinker
					2	Fallo control térmico o sensor defectuoso	1	Aumento consumo energético
					3	Aislamiento térmico deficiente por desprendimiento refractario	1	Formación irregular de Clinker
			2	Acumulación de material no sinterizado en la descarga.				
			B	Temperatura excesiva dentro del horno	1	Llama descentrada o sobrealimentación de combustible	1	Daño severo en revestimiento refractario
					2	Fallo de ventiladores o flujo de aire secundario	1	Sobrecalentamiento del casco metálico (> 350°C)
		3			Acumulación de material que impide disipar el calor	1	Riesgo de deformación estructural o colapso del casco	

Fuente: Elaboración propia con información de empresa cementera

Tabla 2-8: FMECA, Función principal II
del sistema revestimiento y casco rotatorio horno

Funciones			Falla Funcional		Modos de Falla		Efectos de Falla	
P R I N C I P A L	II	Garantizar la rotación continua y uniforme durante la operación entre 2,5 – 4 rpm.	A	Interrupción de la rotación del horno	1	Falla del engranaje corona piñón	1	Parada completa del horno
					2	Bloqueo de rodillos de soporte	1	Acumulación de Clinker sin sinterizar en zona caliente
					3	Desalineación por desgaste de anillos de retención	1	Deformación posible del casco por exposición al calor
			B	Velocidad de rotación inadecuada	1	Error en control del variador de frecuencia	1	Formación irregular del Clinker
					2	Desgaste de rodamientos de rodillos	1	Golpeteos y vibraciones en el cuerpo del horno
					3	Bloqueo parcial por acumulación de material	1	Daño progresivo del revestimiento refractario

Fuente: Elaboración propia con información de empresa cementera

Tabla 2-9: FMECA, Función secundaria III del sistema revestimiento y casco rotatorio horno

Funciones			Falla Funcional		Modos de Falla		Efectos de Falla	
S E C U N D A R I A	III	Proteger estructura metálica del horno frente al calor y corrosión	A	Pérdida de capacidad aislante del revestimiento refractario	1	Fisura o desprendimiento de ladrillos	1	Incremento de temperatura casco metálico
					2	Desgaste químico por álcalis y sulfuros	1	Riesgo de pandeo o fisura del casco
					3	Instalación incorrecta de mortero refractario	1	Reducción de eficiencia térmica general del horno
			B	Incapacidad del revestimiento para evitar el deterioro del casco metálico	1	Condensación interna de gases ácidos	1	Debilitamiento estructural del casco
					2	Infiltración de humedad durante paradas	1	Fugas de gases o fractura localizada
					3	Acumulación de polvo de Clinker entre los ladrillos	1	Ineficiencia térmica daño en revestimiento

Fuente: Elaboración propia con información de empresa cementera

Tabla 2-10: FMECA, función secundaria IV
sistema revestimiento y casco rotatorio horno

Funciones			Falla Funcional		Modos de Falla		Efectos de Falla	
S E C U N D A R I A	IV	Mantener hermeticidad del sistema y conservar eficiencia térmica	A	Perdida de hermeticidad en los extremos del horno	1	Desgaste o rotura de sellos radiales	1	Pérdida presión interna
					2	Mal ajuste eje del horno	1	Enfriamiento de la llama principal
					3	Deformación anillos de soporte	1	Aumento consumo de combustible
			B	Incapacidad del sistema para contener los gases del proceso	1	Daño en sellos axiales o empaques cerámicos	1	Pérdida de eficiencia térmica del sistema
					2	Desalineación del casco en la zona de salida	1	Riesgo para el personal por exposición térmica
					3	Rotura del refractario en la boca del horno	1	Deterioro acelerado de estructuras cercanas

Fuente: Elaboración propia con información de empresa cementera

Tabla 2-11: FMECA, función secundaria V
sistema revestimiento y casco rotatorio horno

Funciones			Falla Funcional		Modos de Falla		Efectos de Falla	
S E C U N D A R I A	V	Monitoreo y control de condiciones térmicas del casco y revestimiento	A	Falta de detección de puntos calientes (Hot spots)	1	Sensor infrarrojo desconectado o sucio	1	No detección temprana de la falla refractaria
					2	Fallo del sistema de adquisición de datos	1	Riesgo de sobrecalentamiento o deformación del casco
					3	Pérdida de calibración del instrumento	1	Mantenimiento reactivo , por daño de componentes
			B	Lecturas erróneas de temperaturas	1	Interferencias electromagnéticas en señal	1	Control térmico impreciso del horno
					2	Desajuste en el rango de medición	1	Sobreconsumo energético o sinterización incompleta
					3	Fallo en circuitos del equipo	1	Dificultad para establecer preventivos

Fuente: Elaboración propia con información de empresa cementera

Tabla 2-12: FMECA, función secundaria VI
sistema revestimiento y casco rotatorio horno

Funciones			Falla Funcional		Modos de Falla		Efectos de Falla	
S E C U N D A R I A	VI	Permitir la dilatación térmica controlada del casco sin generar sobreesfuerzos	A	Bloqueo de juntas de dilatación	1	Acumulación de Clinker o polvo refractario	1	Aumento de tensiones en el casco
					2	Deformación térmica anillos	1	Fisuras longitudinales o deformaciones
					3	Obstrucción por acumulación de residuos	1	Vibraciones mecánicas durante la rotación
			B	Excesiva holgura en juntas	1	Desgaste mecánico o perdida de material de relleno	1	Desalienación del horno
					2	Error de montaje	1	Vibraciones radiales
					3	Dilatación anormal por sobrecalentamiento	1	Golpeteo entre secciones del casco

Fuente: Elaboración propia con información de empresa cementera

2.4.1 Jerarquización de los modos de fallo mediante NPR

Los modos de falla identificados anteriormente podemos jerarquizarlos mediante el numero prioritario de riesgo (NPR), se observa en detalle la ecuación para el cálculo de este en la figura 2-4.

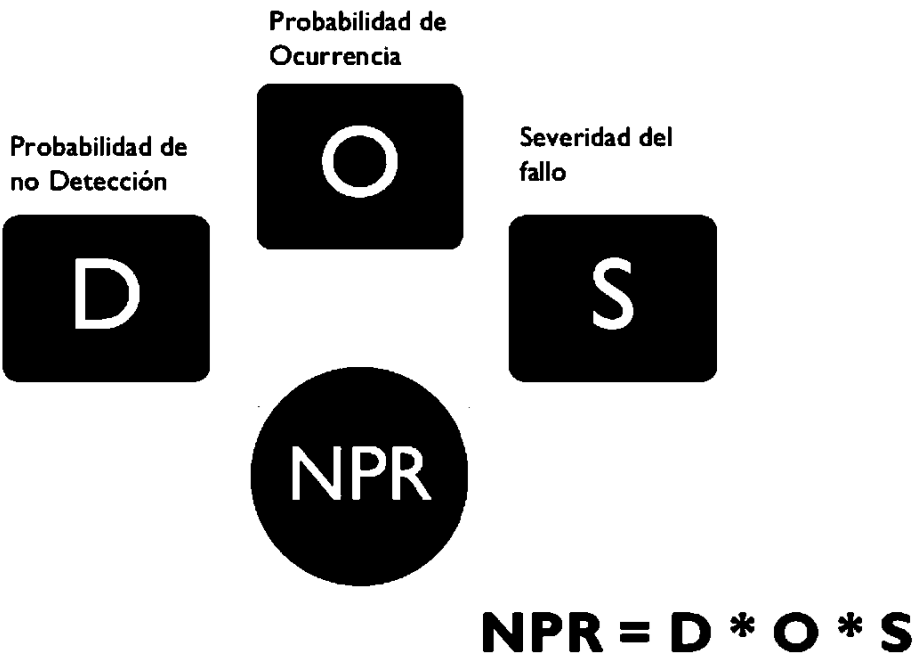


Figura 2-4: Ecuación NPR

Fuente: imagen extraída de internet, <https://cl.pinterest.com/pin/466263367667472571/>

Una vez identificados los parámetros en los cuales evaluaremos cada uno de los modos de falla encontrados podremos establecer la prioridad de estos, parámetros que encontramos en detalle en las tablas de: ocurrencia (ver tabla 2-13), Detección (ver tabla 2-14), Severidad (ver tabla 2-15)

Tabla 2-13: Criterio de ocurrencia de la falla

Probabilidad de falla	Tasa de falla	Ranking
Muy alta: falla inminente	≥ 1 en 2	10
	1 en 3	9
Alta: Asociadas generalmente a procesos previos que presentan fallas con frecuencia	1 en 8	8
	1 en 20	7
Moderada: Generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos que experimentan fallas ocasionales, pero en mayores proporciones	1 en 80	6
	1 en 400	5
	1 en 2.000	4
Bajas: Fallas asociadas con procesos similares	1 en 15.000	3
Muy bajas: Solo fallas aisladas asociadas con procesos casi idénticos	1 en 150.000	2
Remota: muy poco probable	≤ 1 en 1.500.000	1

Fuente: Norma SAE J1739.

Tabla 2-14: Criterio de evaluación para la detección de fallas.

Detección	Criterios: Probabilidad de detección de un modo de falla	Ranking
Casi imposible	No existen controles disponibles para detectar el modo de falla.	10
Muy remota	Probabilidad muy remota de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	9
Remota	Remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	8
Muy baja	Probabilidad muy baja de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	7
Baja	Baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	6
Moderada	Probabilidad moderada de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	5
Moderadamente alta	Probabilidad moderadamente alta de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	4
Alta	Alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	3
Muy alta	Probabilidad muy alta de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	2
Casi cierta	Los controles actuales son casi certeros para detectar el modo de falla.	1

Fuente: Norma SAE J1739.

Tabla 2-15: Criterio de evaluación para determinar la severidad del efecto

Efecto	Criterios: Severidad del efecto	Ranking
Peligro sin advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario, Muy alto ranking de severidad, cuando el modo de falla afecta la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla no se advierte al ocurrir	10
Peligro con advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario. Muy alto ranking de severidad, cuando el modo de falla afecta la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla se advierte al ocurrir	9
muy alto	Perturbación grave a la línea productiva. Las pérdidas pueden alcanzar al 100% del producto. Equipo inoperable, pérdida de la función primaria. Cliente muy insatisfecho	8
Alta	Perturbación menor en la línea productiva. La producción puede tener que ser ordenada y una parte desechada (menor al 100%). Equipo operable, pero con un nivel de calidad reducido. Cliente insatisfecho	7
Moderado	Perturbación menor en la línea productiva. Una porción (menor al 100%) puede tener que ser desechada (no ordenada). Equipo operable, pero con algunos ítems de confort inoperables. El cliente experimenta insatisfacción	6
Bajo	Perturbación menor en la línea productiva, 100% del producto tiene que ser adaptado. Equipo operable, pero con algunos ítems de confort con un nivel de calidad reducido. El cliente experimenta algo de insatisfacción.	5
Muy bajo	Perturbación menor en la línea productiva. El producto puede ser ordenado y una porción (menor al 100%) adaptado. Ajustes y terminaciones y sonido en el ítem no están en conformidad. Defecto notado por la mayoría de los clientes.	4
Menor	Perturbación menor en la línea productiva. Una parte (menor al 100%) puede ser modificada en línea, pero fuera de la estación. Se presentan desajustes y chirridos que no están en conformidad. Defecto notado por el promedio de los clientes	3
Muy menor	Perturbación menor en la línea productiva. Una parte (menor al 100%) puede ser modificada en línea, pero fuera de la estación. Se presentan desajustes y pequeñas vibraciones en el ítem que no están en conformidad. Defecto notado por la minoría de los clientes.	2
Ninguno	Sin efectos.	1

Fuente: Norma SAE J1739.

A continuación, se presenta la Jerarquización de cada uno de los modos 36 modos de falla identificados tanto principales como secundarios por su NPR (Ver tabla 2-16)

Tabla 2-16: jerarquización NPR de modos de fallo sistema horno rotatorio

Código	Modo de Falla	S (Severidad)	O (Ocurrencia)	D (Detección)	NPR
FP-I A3	Aislamiento deficiente por desprendimiento refractario	9	7	6	378
FS-III A1	Fisura o desprendimiento parcial de ladrillos refractarios	9	7	6	378
FS-III A2	Desgaste químico por álcalis/sulfuros	8	6	7	336
FP-I B2	Falla de ventiladores/aire secundario	9	6	6	324
FP-I A2	Fallo de control térmico o sensor defectuoso	9	5	7	315
FP-I A1	Sellos dañados ingreso de aire falso no deseado	8	6	6	288
FP-II A3	Desalineación por desgaste de anillos (tires)	8	6	6	288
FS-V A1	Sensor IR desconectado o sucio	9	4	8	288
FP-I B3	Acumulación de material que impide disipar calor	8	5	7	280
FS-III A3	Instalación incorrecta de mortero refractario	8	5	7	280
FS-V A3	Pérdida de calibración del instrumento	8	5	7	280
FP-I B1	Llama descentrada/sobrealimentación de combustible	9	5	6	270
FS-IV B3	Rotura del refractario en la boca del horno	9	5	6	270
FP-II B2	Desgaste de rodamientos de rodillos	7	6	6	252
FS-VI A3	Obstrucción por acumulación de residuos	7	6	6	252
FS-VI B1	Desgaste/pérdida de material de relleno	7	6	6	252
FS-III B3	Acumulación de polvo entre ladrillos	7	5	7	245
FS-V B3	Fallo en circuitos del equipo	7	5	7	245
FP-II A2	Bloqueo de rodillos por falta de lubricación	8	5	6	240
FS-IV B2	Desalineación del casco en zona de salida	8	5	6	240
FS-VI A1	Acumulación de Clinker/polvo en juntas	8	5	6	240
FS-VI B3	Dilatación anormal por sobrecalentamiento	8	5	6	240
FS-III B1	Condensación interna de gases ácidos	8	4	7	224
FS-V B2	Rango de medición mal configurado	8	4	7	224
FS-V A2	Falla del sistema de adquisición de datos	9	3	8	216
FP-II B3	Bloqueo parcial por acumulación de material	7	5	6	210
FS-III B2	Infiltración de humedad durante paradas	7	5	6	210
FS-IV A1	Desgaste/rotura de sellos radiales	7	6	5	210
FS-IV A2	Mal ajuste del eje/entrada-salida	7	5	6	210
FS-IV B1	Daño en sellos axiales/empaques	7	6	5	210
FS-V B1	Interferencia electromagnética en señal	7	4	7	196
FS-IV A3	Deformación del anillo de soporte	8	4	6	192
FS-VI A2	Deformación térmica del anillo	8	4	6	192
FP-II B1	Error en control VFD de velocidad	7	5	5	175
FS-VI B2	Error de montaje	7	4	6	168
FP-II A1	Falla del engranaje corona piñón	8	4	5	160

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE TAREAS A PLAN DE MANTENIMIENTO
SEGÚN MODO DE FALLA

3 PROGRAMA DE ACTIVIDADES Y TAREAS DE MANTENIMIENTO

3.1 DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM

Teniendo en cuenta que el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, es aquel proceso utilizado para determinar qué se debe hacer, para asegurar que cualquier activo físico, continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga, en su contexto operacional actual. Por tanto, el RCM es una herramienta utilizada en la gestión del mantenimiento, que nos permite maximizar la confiabilidad operacional de los activos, a partir de los requerimientos reales de mantenimiento.

En el capítulo anterior, identificamos los modos de fallas, ahora daremos inicio a la planificación de tareas para prevenir estos modos de fallas, es por esta razón que se desarrollara la hoja de decisión del RCM, que está basada en el diagrama de decisión del RCM. El diagrama deberá responder las siguientes preguntas, con las consecuencias que podría generar cada modo de falla, de esta manera relaciona las fallas ocultas, fallas evidentes, seguridad o medio ambiente, operacional y no operacional, designadas con las letras H,S,E,O y N respectivamente. Para luego seguir un orden sistemático, según sean las respuestas a cada pregunta establecida.

Tabla 3-1: Preguntas del RCM en diagrama de decisión del RCM

H	¿Será evidente a los operarios la pérdida de función causada por este modo de fallo actuando por sí solo en circunstancias normales?
S	¿Produce este modo de fallo una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien?
E	¿Produce este modo de falla una pérdida de función u otros daños que pudieran infringir cualquier normativa o reglamento del medio ambiente
O	¿Ejerce el modo de falla un efecto adverso directo sobre la capacidad operacional (producción, calidad, servicio o costes operativos además de la reparación)?
H1-S1-E1-O1-N1	¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea a condición?
H2-S2-E2-O2-N2	¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de reacondicionamiento de ciclo?
H3-S3-E3-O3-N3	¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de situación cíclica?
H4-S4	¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una combinación de tareas
H5	¿Podría la falla múltiple afectar a la seguridad o el medio ambiente?

Fuente: John Moubray. RCM II Mantenimiento centrado en confiabilidad

3.1.1 Análisis de consecuencias Evidentes (H) Hidden

Según el libro de mantenimiento centrado en la confiabilidad escrito por John Moubray, las fallas evidentes se definen como “Falla que eventual e inevitablemente se hará evidente por sí sola a los operadores en circunstancias normales”, el mayor riesgo de una falla oculta no es la falla en sí, sino la posibilidad de que coincida con otra falla, produciendo consecuencias graves.

3.1.2 Análisis de consecuencias de seguridad “Safety” (S)

Al analizar un modo de falla se podrá dar cuenta que tiene consecuencias, cuando puede causar daño físico, lesiones graves y/o hasta la muerte de personas, tales como operadores, personal de mantenimiento o terceros.

Principio clave en RCM, las consecuencias de seguridad tienen prioridad absoluta, independientemente del costo o la probabilidad. Cita Mounbray *“Safety consequences override all economic considerations”*

3.1.3 Análisis de consecuencias, medio ambiente (E)

Mounbray indica que las consecuencias ambientales deben tratarse con el mismo rigor y precaución que las de seguridad, aunque no exista riesgo directo a personas.

Se considera consecuencia ambiental cuando un modo de falla puede:

- Provocar derrames
- Generar emisiones contaminantes
- Infringir normativas ambientales
- Causar daño ecológico medible

3.1.4 Consecuencias operacionales (O)

Se refiere a todos aquellos modos de fallo que afecten directamente a la producción, calidad del producto, continuidad del servicio, costos operativos totales, etc...

No involucra riesgos a personas ni al medioambiente, solo desempeño del negocio.

3.1.5 Consecuencias no operacionales (N)

En esta categoría entran todos aquellos modos de falla que no provocan un impacto considerable, tanto en seguridad, medio ambiente y operación, solo se genera un costo asociado a la reparación de la falla. Es posible que el costo de la reparación en si sea más alto, que otro modo de falla con consecuencias en las áreas antes mencionados.

3.1.6 Planificación actividades de mantenimiento

Mediante la aplicación del diagrama de decisiones RCM, se establecerán tareas de mantenimiento específicas orientadas a prevenir, detectar o mitigar los modos de falla, priorizando aquellas que reducen el riesgo de detecciones no programadas y el impacto sobre la producción. Estas tareas pueden ser tanto para acciones preventivas planificadas como en acciones correctivas controladas, siempre bajo un enfoque de confiabilidad.

3.1.6.1 Actividades de sustitución o restauración cíclicas

Son aquellas tareas que deberán ser realizadas en un tiempo fijo, aplicables cuando un modo de falla presenta un patrón de desgaste asociado a la edad o al uso del componente, y donde el remplazo programado resulta la alternativa menos costosa.

3.1.6.2 Actividades preventivas o sujetas a condición

Actividades basadas en el monitoreo de variables de condición (temperatura, vibraciones, presión, señales de proceso, etc..) las cuales mediante estas alarmas permiten intervenir el activo únicamente cuando se detecta evidencia de degradación por medio de la variación en estos parámetros monitoreados continuamente.

3.1.6.3 Actividades de inspección o prueba funcional (Failure-finding)

Orientadas a verificar la operatividad de funciones ocultas, sistemas de protección o instrumentos críticos, cuya falla no es evidente durante la operación normal.

3.1.6.4 Actividades reactivas

Corresponden a las actividades no programadas post-falla las cuales afectan las funciones de los componentes y/o equipos provocando ineficiencia o algún daño mayor a largo plazo por acumulación de ineficiencias.

A continuación, se presenta en árbol lógico de decisiones RCM, (Ver figuras 3-1, 3-2) en base a este se llenará la hoja de decisiones RCM

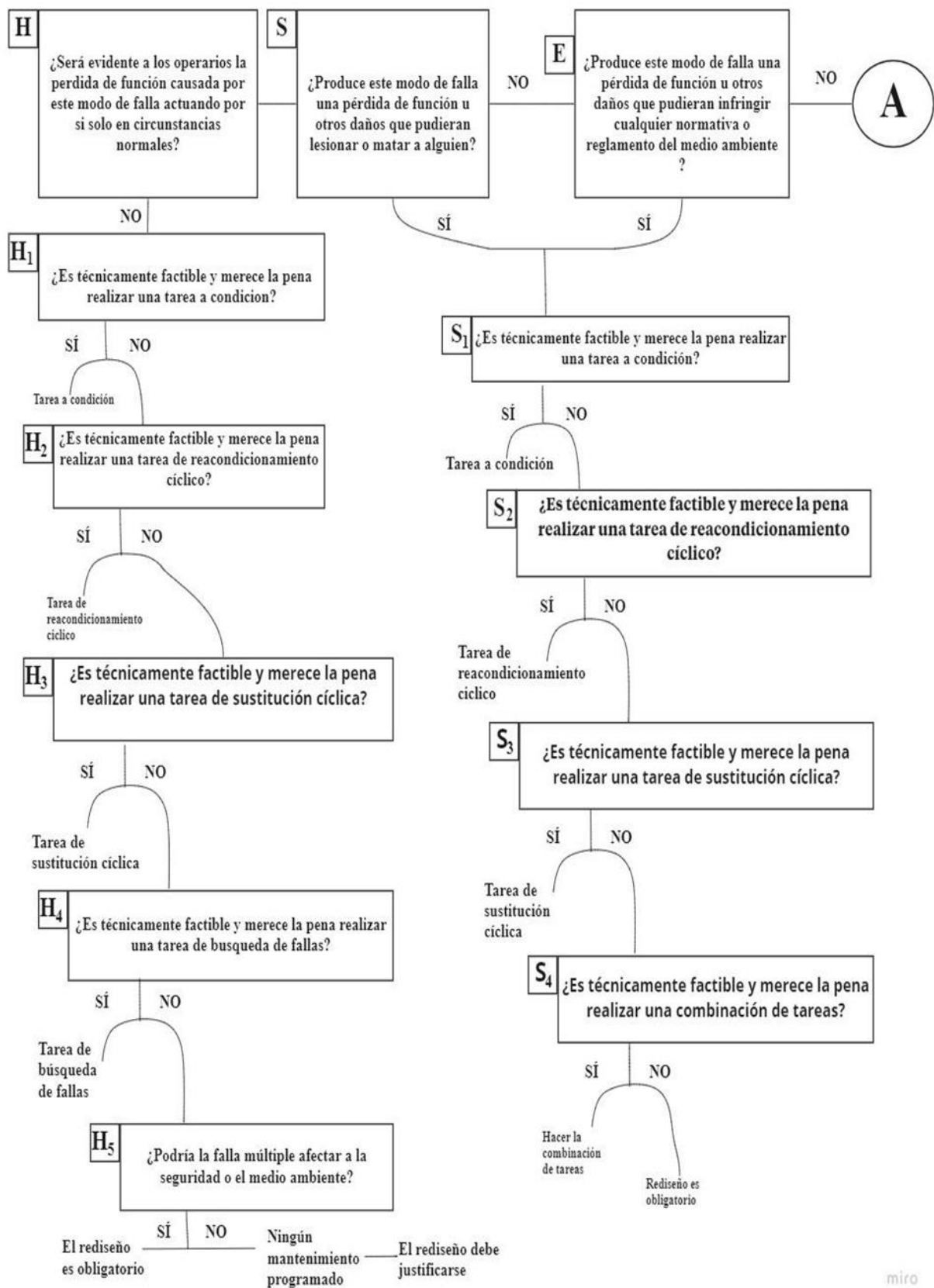


Figura 3-1: Diagrama de toma de decisiones RCM

Fuente: Elaboración propia según libro John Moubray. RCM II Mantenimiento centrado en confiabilidad

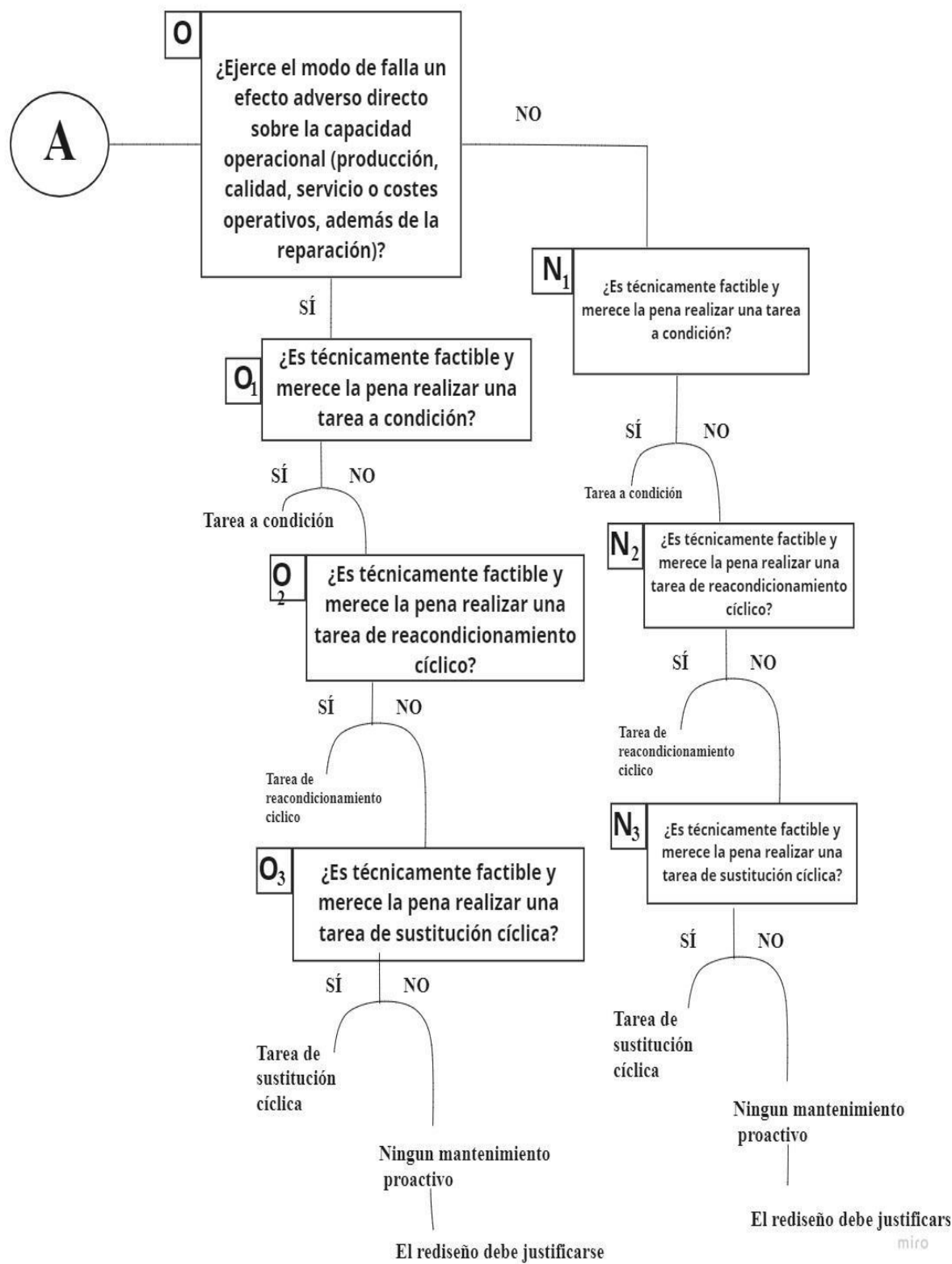


Figura 3-2: Diagrama de toma de decisiones RCM continuación

Fuente: Elaboración propia según libro John Moubray. RCM II Mantenimiento centrado en confiabilidad

3.2 HOJA DE DECISIÓN DEL RCM

Para la correcta aplicación de las decisiones definidas en el diagrama de flujo o árbol lógico RCM y la determinación de las actividades de mantenimiento asociadas, se procederá al llenado sistemático de la hoja de decisiones RCM, en la cual se registrarán los modos de falla, sus consecuencias y las tareas de mantenimiento propuestas. Este proceso permitirá estructurar y justificar técnicamente cada acción a implementar.

Las tareas definidas en la hoja de decisiones RCM serán utilizadas como base para la elaboración de un plan de mantenimiento optimizado, enfocado prioritariamente en aquellos componentes que presentan modos de falla con altos valores de NPR, y que representan un mayor riesgo para la continuidad operacional, los costos de producción y confiabilidad del proceso.

Tabla 3-2: Hoja de decisión RCM

HOJA DE DECISIÓN RCM			Sistema/activo: Revestimiento y casco rotatorio del horno												
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H 1	H 2	H 3	Tareas “a falta de”			Tareas Propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
							S 1	S2	S3						
							O 1	O 2	O 3	H 4	H 5	S 4			
F	FF	M F	H	S	E	O	N 1	N 2	N 3						
FP- I	A	3	S	S			N	N	N				S -Monitoreo continuo -reemplazo revestimiento refractario a condición	-Revisión diaria - Reemplazo anual	Operador horno Empresa externa
FS- III	A	1	S	S			S						-Reemplazo parcial de revestimiento (a condición)	Semestral	Empresa externa
FS- III	A	2	S	N	N	S	S						-Monitoreo temperatura de carcasa y índices químicos del proceso (a condición)	-Mensual	Ingeniero de proceso
FP- I	B	2	S	S			S						Reemplazo de rodamientos y mantención motor ventilador (a condición)	Anual	Electricista mecánico de turno

FP- I	A	2	N				S							Prueba de señal, rango y alarma sensores -Limpieza y ajuste de sensores (a condición)	Trimestral	Instrumentista
FP- I	A	1	N				S							Ajuste/remplazo sellos (preventiva)	Mensual	Mecánico turno
FP- II	A	3	S	N	N	S	S							Monitoreo de cargas en rodillos (a condición)	Mensual	Operador horno
FS-V	A	1	N				N	S						Limpieza del lente del sensor, prueba de señal (reacondicionamiento cíclico)	Semanal	Instrumentista
FP- I	B	3	S	N	N	S	N	S						Limpieza localizada (reacondicionamiento cíclico)	Trimestral	Operador y mecánicos turno
FS- III	A	3	S	N	N	S	S							Inspección QA/QC de instalación refractaria (	En cada intervención refractaria	Supervisor mantenimiento, mecánico de turno
FS-V	A	3	N				S							Calibración instrumentos (preventiva)	Mensual	Instrumentista
FP- I	B	1	S	S			S							Ajuste de quemadores	Trimestral	Mecánicos en turno
FS-IV	B	3	S	S			S							Inspección visual (preventiva cíclica)	Semanal	Operador horno
FP- II	B	2	S	N	N	S	S							Análisis de vibraciones y monitoreo temperatura (preventiva)	Mensual	Operador del horno y analista vibraciones
FS-VI	A	3	S	N	S		S							Limpieza área juntas	Mensual	Mecánico de turno
FS-VI	B	1	N				S							Reposición relleno juntas	Mensual	Mecánico refractario
FS- III	B	3	N	N	N	S	S							Monitoreo y análisis variación de temperaturas (preventiva cíclica)	Mensual	Mecánico refractario
FS-V	B	3	S	S			S							Reemplazo circuito eléctrico (a condición)	Anual	Eléctrico
FP-II	A	2	S	N	N	S	S							Lubricación de rodillos (a condición)	Mensual	Mecánico de turno
FS-VI	A	1	S	N	N	S	S							Limpieza área de juntas (a condición)	Mensual	Mecánico de turno

3.3 ELABORACIÓN DE TAREAS PARA EL PLAN DE MANTENIMIENTO

A continuación, se describen las tareas de mantenimiento definidas para la planificación del mantenimiento del horno rotatorio, las cuales han sido establecidas del análisis realizado mediante la hoja de decisiones RCM (Ver tabla 3-3). Dichas tareas se presentan más organizadas, priorizando los modos de falla con mayor criticidad, de acuerdo con los valores más elevados del número prioritario de riesgo (NPR) previamente evaluados.

Este enfoque permite desarrollar un plan de mantenimiento enfocado y orientado en mitigar los riesgos más significativos.

Tabla 3-3: Planificación actividades para la propuesta del plan de mantenimiento

Actividades para considerar dentro del plan de mantenimiento a elaborar				
Equipo: Horno rotatorio, revestimiento refractario				
Modo de falla	Actividad por realizar Preventiva/correctiva	Intervalo	Ejecutor	NPR
FP-I A3	Monitoreo continuo inspección focalizada de refractario en zonas " hot spot"	Revisión diaria	Mecánico turno, Empresa externa	378
FS-III A1	-Reemplazo de revestimiento parcial	Semestral	Mecánico refractario	378
FS-III A2	-Monitoreo temperatura de carcasa y índices químicos del proceso	Mensual	Ingeniero de proceso	336
FP-I B2	- Reemplazo de rodamientos y mantención motor ventilador	Anual	Electricista Mecánico de turno	324
FP-I A2	-Prueba de señal, rango y alarma sensores, Limpieza y ajuste de sensores	Trimestral	Instrumentista	315
FP-I A1	-Ajuste/reemplazo sellos por condición	Mensual	Mecánico turno	288
FP-II A3	-Monitoreo de cargas en rodillos	Mensual	Operador horno	288
FS-V A1	-Limpieza del lente del sensor, prueba de señal	Semanal	Instrumentista	288
FP-I B3	Limpieza localizada	Trimestral	Operador y mecánicos turno	280
FS-III A3	inspección QA/QC de instalación refractaria	En cada intervención refractaria	Supervisor mantenimient o, mecánico de turno	280

Fuente: Elaboración propia en base a información área mantención cemento melón

En la Figura 3-3 se puede observar la planificación de actividades o tareas propuestas, de la hoja de decisiones RCM generalizada, el detalle paso a paso para la realización de dichas tareas y/o actividades se pueden apreciar en el Anexo 3.

Tareas		Plan de Tareas			
← Tareas					
Remplazo rodamientos y mantenimiento ventilador					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Alta				
Duración Estimada:	08H 00mins				
Tipo de Tarea:	CAMBIO DE COMPONENTE				
Remplazo de revestimiento parcial					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Alta				
Duración Estimada:	01D 06H 00mins				
Tipo de Tarea:	AJUSTES MAYORES				
Prueba señal y calibración de sensores					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Media				
Duración Estimada:	04H 00mins				
Tipo de Tarea:	MANTENIMIENTO PREVENTIVO				
Monitoreo temperatura carcasa y índices químicos					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Media				
Duración Estimada:	04H 00mins				
Tipo de Tarea:	MANTENIMIENTO PREVENTIVO				
Monitoreo de cargas en rodillos					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Media				
Duración Estimada:	01D 00H 00mins				
Tipo de Tarea:	Monitoreo				
Limpieza localizada					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Media				
Duración Estimada:	04H 00mins				
Tipo de Tarea:	MANTENIMIENTO PROGRAMADO				
Inspección QA/QC de instalación refractaria					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Media				
Duración Estimada:	01H 00mins				
Tipo de Tarea:	inspeccion visual				
Ajuste/reemplazo de sellos por condición					
Configurada:	● Si				
Prioridad:	Alta				
Duración Estimada:	10H 00mins				
Tipo de Tarea:	MANTENIMIENTO PROGRAMADO				

Figura 3-3: Ficha planificación de tareas y/o actividades

Fuente: Elaboración propia en base a información planta cementera

A continuación, se presenta la programación de actividades (Ver tabla 3-4), donde se puede observar los tiempos de duración a ejecutar en aquellas actividades más significativas que involucren a los modos de falla más relevantes como el desprendimiento o remplazo del revestimiento, reemplazo de sellos, rodamientos y ventiladores.

Tabla 3-4: Programación actividades de mantenimiento

PROGRAMACIÓN ACTIVIDADES MANTENIMIENTO		
Horno rotatorio y revestimiento refractario		
1. Reemplazo parcial de revestimiento refractario		
Fase	Actividad	Duración (h)
1.2	Bloque LOTO y verificación de energías	1
1.2	Enfriamiento controlado programado	4
1.3	Instalación andamios internos	2
1.4	Retiro ladrillos dañados	5
1.5	Inspección de carcasa y mediciones	2
1.6	Preparación de superficie	2
1.7	Instalación nuevo revestimiento	7
1.8	Ajuste dimensional y cierre	2
1.9	Desbloqueo de equipo puesta en marcha curado	1
1.10	Curado térmico controlado	3
1.11	Inspección QA/QC y cierre	1
2. Reemplazo de rodamientos y mantenimiento de ventilador		
2.1	Bloqueo y verificación energía 0	0,5
	Desmontaje rodamientos	2
2.2	Extracción de rodamiento	4
2.3	Inspección de eje	2

2.4	Instalación nuevos rodamientos	5
2.5	Alineación láser	2
	Desbloqueo y puesta en marcha	0,5
2.6	Pruebas operacionales	2
3. Reemplazo de sellos		
3.1	Verificación bloque de equipo	1
3.2	Desmontaje de sellos	3
3.3	Instalación nuevos sellos	4
3.4	Desbloqueo horno puesta en marcha	1
3.5	Ajuste y pruebas	1
4. Pruebas y calibración de sensores		
4.1	Programación estructurada en bloque continuo durante parada programada	4
5. Monitoreo de cargas en rodillos		
5.1	Actividad ejecutada durante paradas programadas en reposo	4
5.2	Monitoreo continuo horno zonas “hot spot”	24

Fuente: Elaboración propia en base a información área mantención cemento melón

Una vez definidas las tareas y actividades de mantenimiento propuestas y programadas para cada modo de falla crítico, se procede a la elaboración del plan de mantenimiento correspondiente.

Además, podemos apreciar la distribución de estos tiempos en la carta Gantt de la programación en detalla (Ver figura 3-4). Dicho plan se desarrolla considerando de manera integral los riesgos asociados a la ejecución de cada actividad dentro del área de trabajo, con el objetivo de asegurar una intervención segura, controlada y técnicamente adecuada. Para este análisis se incorpora las evaluaciones de riesgos específicas, las cuales se detallan en el Anexo 2, permitiendo así fortalecer la gestión de seguridad y apoyar una correcta implementación del plan de mantenimiento propuesto.

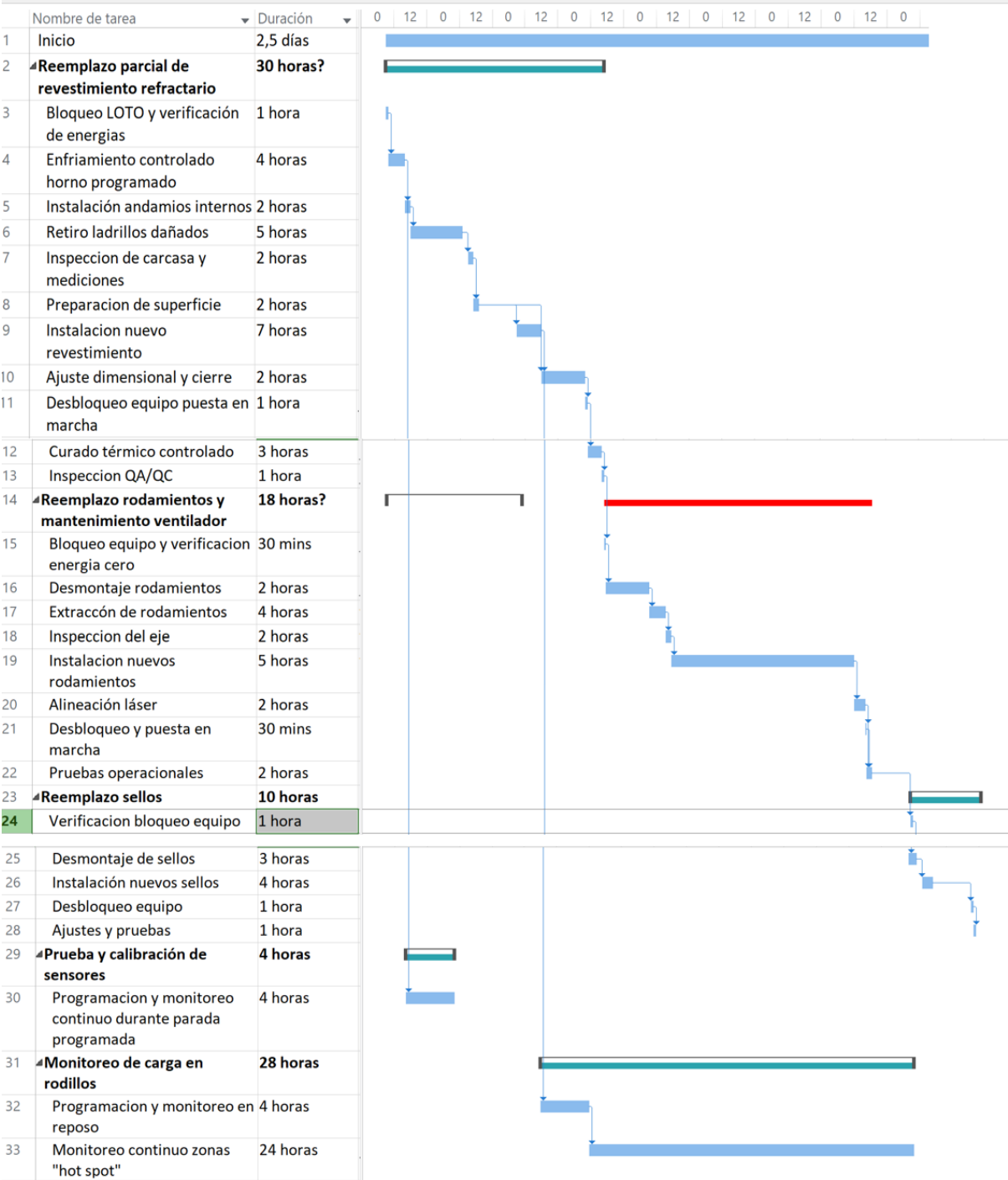


Figura 3-4: Carta Gantt programación actividades mantenimiento

Fuente: Elaboración propia en base a información planta cementera

3.4 FACTIBILIDAD

En este punto se evaluarán los costos de la propuesta del plan de mantenimiento a aquellos modos de falla más críticos dentro del sistema del horno rotatorio y refractario, para esto se considerará con mayor relevancia el cambio de revestimiento refractario en zonas parciales que actualmente en el plan suelen ser 2-3 veces al año lo que genera un paro de producción total y eso es lo que se busca mitigar, junto con otras detenciones por falta de monitoreo, se mostrara

los costos por asociados a servicio o repuesto , costos por no producción, gastos operacionales , frecuencia anual en la cual ser realiza dicha actividad, remplazo o en su defecto chequeo o mantenimiento del equipo (Ver Tabla 3-5). Se considera que el horno produce 65 toneladas /hora y el precio por tonelada de Clinker es de \$140.000

Tabla 3-5: Plan actual según modos de falla

HOJA DE REGISTRO RCM		PLAN ACTUAL SEGÚN MODO DE FALLA						
Organización: Planta: Cemento melon								
#	MODO DE FALLA		Frecuencia de eventos por año fallas/año	TPPR horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
	CODIGO							
1	FP-I A3	Aislamiento deficiente por desprendimiento refractario	1	36	\$ 9.100.000	\$ 100.000.000	\$ 5.000.000	\$ 432.600.000
	FS-III A1	Fisura o desprendimiento parcial de ladrillos refractarios	1,5	36	\$ 9.100.000	\$ 150.000.000	\$ 5.000.000	\$ 723.900.000
	FS-III A2	Desgaste quimico por alcalis/sulfuros	1	24	\$ -	\$ 80.000.000	\$ 2.000.000	\$ 82.000.000
2	FP-I B2	Falla de ventiladores /aire secundario	0,7	12	\$ 9.100.000	\$ 35.000.000	\$ 2.000.000	\$ 102.340.000
	FP-I A2	Falla de control termico o sensor defectuoso	3	4	\$ 9.100.000	\$ 5.000.000	\$ -	\$ 124.200.000
	FP-I A1	Ingreso de aire falso por sellos	2	10	\$ 9.100.000	\$ 18.000.000	\$ -	\$ 218.000.000
	FP-II A3	Desalineacion por desgaste de anillos	1	18	\$ 9.100.000	\$ 40.000.000	\$ 3.000.000	\$ 206.800.000
	FS-V A1	Sensor IR desconectado o sucio	4	4	\$ -	\$ 1.500.000	\$ -	\$ 6.000.000
	FP-I B3	Acumulacion de material que impide disipar el calor	1	16	\$ 9.100.000	\$ 15.000.000	\$ 5.000.000	\$ 165.600.000
	FS-III A3	Instalacion incorrecta de mortero refractario	0,4	24	\$ 9.100.000	\$ 60.000.000	\$ 5.000.000	\$ 113.360.000
						COSTOS ACTUALES		\$ 2.174.800.000

Fuente: Elaboración propia en base a información área mantención cemento melón

En la tabla 3-5, la asignación de impacto económico en el ámbito de seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) se efectuó exclusivamente en aquellos modos de falla cuya consecuencia directa pudiera derivar en daño a las personas, afectación al entorno o incumplimiento de requisitos normativos. En los casos donde los modos de falla generan exclusivamente impactos operacionales como pérdida de eficiencia térmica, desviaciones de proceso o fallas en sistemas de monitoreo, no se les asignó valorización económica en el ámbito SHA, dado que no representa una exposición inmediata a condiciones inseguras ni evidencian antecedentes históricos de incidentes asociados dentro de la planta cemento melón.

Se puede observar que el principal impacto económico no se origina en los costos directos de reparación, sino en las pérdidas asociadas a la detención operacional del horno rotatorio. Considerando el costo por no producción estimado de \$9.100.000 por hora, los modos de fallo con mayores tiempos promedio de reparación (TPPR), particularmente aquellos vinculados al revestimiento refractario, generan riesgos económicos anuales elevados. En efecto, fallas como la fisura o desprendimiento del revestimiento concentran las mayores pérdidas, debido a su alta incidencia en la continuidad operacional y prolongados tiempos de intervención. En consecuencia, el costo total anual estimado de \$2.174.800.000 refleja que la variable más crítica económicamente hablando es la indisponibilidad del activo, a continuación, se aplicarán las tareas propuestas anteriormente señaladas por la hoja de decisión RCM destacando las más críticas (Ver tabla 3-6), para poder comparar si es factible aplicar la propuesta de mejora.

Tabla 3-6: Propuesta de mantenimiento Revestimiento y horno rotatorio

PLAN DE MANTENIMIENTO TAREAS PROPUESTAS					
SISTEMA: ROTATORIO Y REVESTIMIENTO					
Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación por año	Responsable	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costos del plan Anual
Preventiva	Inspeccion focalizada de refractario en zonas "hot spot" , monitoreo continuo	12	Operador horno	\$ 1.300.000	\$ 15.600.000
Preventiva	Reemplazo de revestimiento parcial	2	Empresa externa, y pesonal planta	\$ 150.000.000	\$ 300.000.000
Predictivo	Monitoreo temperatura de carcasa y índices químicos del proceso	12	Ingeniero de proceso	\$ 1.200.000	\$ 14.400.000
Preventiva	Reemplazo de rodamientos y mantencion motor ventilador	1	Electrico y mecanico de turno	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
Preventiva	-Prueba de señal, rango y alarma sensores, Limpieza y ajuste de sensores	4	Instrumentista	\$ 1.500.000	\$ 6.000.000
Condición	Ajuste/reemplazo sellos por condición	3	Mecanico de turno	\$ 6.000.000	\$ 18.000.000
Predictivo	Monitoreo de cargas en rodillos	6	Operador horno	\$ 15.000.000	\$ 90.000.000
Preventiva	Limpieza del lente del sensor, prueba de señal	3	Instrumentista	\$ 1.000.000	\$ 3.000.000
Preventiva	Limpieza localizada	4	Operador y mecanicos de turno	\$ 4.000.000	\$ 16.000.000
Preventiva	Inspección QA/QC de instalación refractaria	1	Supervisor de mantenimiento y mecanico de turno	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
			COSTOS PLAN DE MANTENIMIENTO		\$ 485.000.000

Fuente: Elaboración propia en base a “Excel mantención mayor horno”

En la tabla 3-6 la propuesta de mejora al plan orientada estratégicamente a reducir los tiempos de indisponibilidad del horno, la planificación y programación de estas actividades (Ver Anexo 3), se abordan de manera preventiva y predictiva según los modos de falla de mayor impacto económico, las tareas planteadas priorizan el monitoreo continuo del estado del revestimiento refractario, así como actividades de inspección de calidad en revestimiento refractario y su estado. Destaca la incorporación de inspecciones focalizadas en zonas críticas (hot spots), remplazo planificado y parcial del revestimiento, junto con intervenciones programadas en componentes mecánicos, aislamiento y sistema de instrumentación, busca transformar fallas correctivas de alta duración en intervenciones controladas de menor impacto operativo. El costo total del plan asciende a \$485.000.000 CLP, el aplicar dichas tareas propuestas para mejora del plan de mantenimiento se verá reflejado una disminución en la frecuencia de fallas de estos modos, la cual se considerará para calcular un nuevo riesgo futuro y se proyecta en base a esto un futuro ahorro potencial (Ver tabla 3-7).

Tabla 3-7: Costos esperados al aplicar propuesta de mantenimiento

Indicador de ahorro potencial esperado después de implantar el RCM						
Frecuencia esperada de eventos por año fallas/año	TPPR horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo Futuro esperado \$/año	Ahorro potencial
0,8	30	\$ 9.100.000	\$ 100.000.000	\$ 5.000.000	\$ 302.400.000	\$ 114.600.000
1	28	\$ 9.100.000	\$ 150.000.000	\$ 5.000.000	\$ 409.800.000	\$ 14.100.000
0,7	18	\$ -	\$ 80.000.000	\$ 2.000.000	\$ 57.400.000	\$ 10.200.000
0,5	10	\$ 9.100.000	\$ 35.000.000	\$ 2.000.000	\$ 64.000.000	\$ 18.340.000
1,5	6	\$ 9.100.000	\$ 5.000.000	\$ -	\$ 89.400.000	\$ 28.800.000
1,5	10	\$ 9.100.000	\$ 18.000.000	\$ -	\$ 163.500.000	\$ 36.500.000
0,5	18	\$ 9.100.000	\$ 40.000.000	\$ 3.000.000	\$ 103.400.000	\$ 13.400.000
2	4	\$ -	\$ 1.500.000	\$ -	\$ 3.000.000	\$ -
0,6	16	\$ 9.100.000	\$ 15.000.000	\$ 5.000.000	\$ 99.360.000	\$ 50.240.000
0,3	24	\$ 9.100.000	\$ 60.000.000	\$ 5.000.000	\$ 85.020.000	\$ 26.340.000
					\$1.377.280.000	\$ 312.520.000

Fuente: Elaboración propia en base a “Excel Mantención Mayor horno”

3.5 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE MEJORA A PLAN DE MANTENIMIENTO

Al sumar los costos proyectados una vez aplicada la propuesta de mejora a los costos del plan en sí y lo comparamos con los costos actuales que tienen esos modos de fallo crítico, se puede observar un ahorro potencial, ya que, en la propuesta se apunta a reducir la frecuencia de fallos totales que involucran detener el horno y realizar reparaciones parciales por condición al revestimiento por lo cual se busca realizar un monitoreo y programar reparaciones pudiendo así identificar las zonas más vulnerables y críticas lo que ayuda a reducir los tiempos de reparaciones parciales ayudando a minimizar las perdidas por no producción. (Ver figura 3-3)

COSTOS ACTUALES	COSTOS PLAN DE MANTENIMIENT O	COSTOS ESPERADOS APLICADO PLAN DE MANTENIMIENTO	AHORRO POTENCIAL
\$ 2.174.800.000	\$ 485.000.000	\$ 1.377.280.000	\$ 312.520.000

Figura 3-5: Costos propuesta de mantenimiento y ahorro potencial

Fuente: Elaboración propia en base a información planta cementera

4 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En conclusión, a partir del levantamiento de información operacional y de mantenimiento del horno rotatorio de Clinker, y mediante la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), se logró identificar que este activo corresponde a uno de los equipos más críticos dentro del proceso productivo de la planta, debido a su impacto directo en la continuidad operacional y calidad del Clinker y los costos asociados a paradas no programadas. La elevada frecuencia de fallas, principalmente asociadas a componentes mecánicos.

Para profundizar en el análisis, se desarrolló un estudio FMECA, aplicado a los subsistemas del horno, lo que permitió establecer de manera estructurada, las funciones primarias y secundarias del equipo, identificando sus fallas funcionales, sus respectivos modos de falla y los efectos operacionales, logrando así jerarquizarlos por medio del NPR y seleccionando aquellos que generan mayor impacto en términos de indisponibilidad del equipo, deterioro acelerado de componentes y aumento significativo de los costos de mantenimiento correctivo.

El FMECA, constituyó la base técnica para la aplicación de la hoja de decisiones RCM, a partir de la cual, se definieron las tareas de mantenimiento más adecuadas para cada modo de falla, priorizando acciones preventivas y predictivas por sobre el mantenimiento reactivo. El plan de mantenimiento propuesto se orienta principalmente a la reducción de la frecuencia de fallas, mediante monitoreo de condiciones de componentes, control de parámetros operacionales y programación de reparaciones parciales del revestimiento.

Desde el punto de vista económico, la propuesta de mejora del plan de mantenimiento basado en RCM, permite evidenciar un impacto positivo significativo. Considerando que los costos actuales asumidos para esos modos de falla corresponden a \$2.174.800.000, la aplicación de la propuesta de mejora al plan implica un costo de \$ 485.000.000, a esto agregándole los costos proyectados totales esperados de \$1.377.280.000. Esto se traduce a un ahorro potencial estimado de \$312.520.000, asociado principalmente a las disminuciones de fallas repetitivas, reducción en intervenciones correctivas mayores, que detengan la producción, por tiempos muy elevados.

Por lo que, el desarrollo del RCM apoyado en un análisis FMECA, permite establecer una estrategia de mantenimiento técnica y económicamente justificada para el horno rotatorio de Clinker, orientada a mejorar la confiabilidad, reducir la variabilidad operativa y optimizar los costos del activo. Se recomienda la implementación progresiva de la propuesta de mejora al plan de mantenimiento, acompañada de revisiones periódicas de desempeño, con el fin de asegurar su sostenibilidad y mejora continua en el tiempo.

5 BIBLIOGRAFÍA

JOHN MOUBRAY, Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Edición en español
Publicado por Aladon Ltd. 44 Regent Street, Lutterworth, Leicestershire LE 17 4BD, United Kingdom.

Introducción a la gestión de activos. Integración con las técnicas de ingeniería de confiabilidad y mantenimiento. NOTA TÉCNICA 6, Reliability Centered Maintenance (RCM). Autores: Carlos Parra Márquez, Adolfo Crespo Márquez, Dept, industrial management. University of Seville.

Memoria Cemento Melón

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiPib6_36vyAhWyILkGHadiB0sQFnoECCUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.melon.cl%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F03%2FMemoria-Melon-2020.pdf&usg=AOvVaw0svvyj4fmS_be45bgWM3i6

Info%20horno/Informe%20final.%20Melón.%20Rev1.%20HKS%20(1).pdf

Info%20horno/El%20Melon%20Kiln%20Sheel%20x%2052.7m%20(virola%20pesada%20llanta%202)%20(1).pdf

Info%20horno/2024_10_41010025_OVME_OL_%2009._ES%20(1).pdf

<https://inspenet.com/articulo/horno-rotatorio-principio-aplicaciones/>

https://www.sae.org/standards/j1739_202101-potential-failure-mode-effects-analysis-fmea-including-design-fmea-supplemental-fmea-msr-process-fmea

<https://www.melon.cl/>

<https://www.cmfchile.cl/institucional/mercados/entidad.php?mercado=V&rut=76109779&tipoe=entidad=RVEMI&vig=VI&control=svs&pestanía=1>

ANEXOS

ANEXO 1. Pauta de trabajo revestimiento

PAUTA DE TRABAJO HORNO ROTATORIO	
ACTIVIDADES	EJECUTOR
Reconocimiento del área de trabajo y condiciones del horno	Mecánico
Coordinación con sala de control para detención y liberación de equipo	Operador
Aplicar procedimiento de bloqueo y etiquetado del horno	Operador
Verificar ausencia de energía y condiciones seguras de trabajo	Mecánico
Trasado de herramientas, equipos y repuestos al área de trabajo	Mecánico
Revisión y uso de EPP específicos para trabajo e refractarios	Mecánico
Delimitar y señalizar zona de trabajo	Mecánico
Acceso al interior del horno	Operador
Inspección visual general al revestimiento refractario	Mecánico
Identificar y marcar ladrillos refractarios dañados	Mecánico
Verificar estado de anclajes y carcasa metálica	Mecánico

Retiro de material suelto y polvo refractario	Mecánico
Retirar ladrillos refractarios dañados utilizando herramientas manuales	Mecánico
Limpieza de superficie de apoyo y juntas	Mecánico
Verificar alineación y estado de los ladrillos adyacentes	Mecánico
Preparar mortero refractario según especificaciones	Mecánico
Instalar nuevo ladrillo refractario en sector intervenido	Operador
Asegurar correcto asentamiento y trabado de ladrillos	Mecánico
Aplicar mortero refractario en juntas según procedimiento	Mecánico
Inspección final del trabajo realizado	Mecánico
Retiro de herramientas y limpieza del área	Mecánico
Cierre de acceso al horno rotatorio	Mecánico
Retiro de bloqueo y entrega del equipo para operación	Mecánico
Registro de trabajo realizado en bitácora de mantenimiento	Mecánico

ANEXO 2. Riesgos asociados

Riesgos	Medidas de control
Desconocimiento del área y riesgos asociados	Solicitar autorización a ITO para el reconocimiento de área. Verificar que todos los miembros de la cuadrilla conozcan el procedimiento de trabajo
Caídas a igual nivel	Verificar amarre de calzados, transitar por áreas delimitadas, tener visibilidad al caminar.
Equipos energizados	Se aplicará tercer y quinto elemento de jerarquía de control, al utilizar equipo alza hombre no existe interacción directa con el equipo, y la utilización de elementos de protección personal.

Atrapamiento de manos	Se deberá mantener las manos fuera de la línea de fuego.
Atrapamientos	Solicitar a ITO la realización de la prueba local y estado de cero energías del equipo a intervenir.
Caídas de herramientas y materiales a distinto nivel	Zona inferior deberá ser delimitada con malla de seguridad y letreros que indiquen caídas de materiales, utilizar líneas de fuego y segregar área de trabajo.
Golpeado por/contra	Coordinación eficiente entre los miembros de la cuadrilla y terceros, planificar los trabajos, verificar líneas de fuego y segregar área de trabajo.
Desalineación de actividades	Coordinación eficiente entre los miembros de la cuadrilla supervisor e ITO melón.
Exposición a polvo en suspensión	Uso de respiradores medio rostro con filtros mixto 7093C
Caídas a distinto nivel	Utilización de arnés de seguridad anclado a canastillo, realización de inspección de arnés de seguridad y dar cumplimiento a estándar de trabajo en altura (evaluación y permiso de trabajo).

ANEXO 3. Planificación actividades, remplazo parcial revestimiento refractario

Planificación de mantenimiento	
Horno rotatorio y revestimiento refractario	
6. ¿Qué trabajo se requiere realizar?	
1.1	Inspección focalizada de refractario en zonas (hot spots)
1.2	Monitoreo de temperaturas de carcasa e índices químicos del proceso
1.3	Remplazo parcial del revestimiento
1.4	Remplazo de rodamientos y mantenimiento motor ventilador.
1.5	Pruebas y calibración de sensores
1.6	Ajustes y reemplazo de sellos por condición
1.7	Monitoreo de cargas rodillos
1.8	Limpieza localizada e inspección QA/QC instalación refractaria
7. ¿Por qué se debe realizar?	
2.1	Reducir tiempos de indisponibilidad no programada
2.2	Disminuir pérdidas económicas por no producción
2.3	Prevenir fallas catastróficas del revestimiento
2.4	Aumentar confiabilidad y disponibilidad del horno
8. ¿Cuáles son las recomendaciones de vendedor o especialistas para esta actividad? ¿se consideraron en el alcance del trabajo?	
3.1	Control permanente de temperatura de carcasa
3.2	Remplazo parcial programado antes de alcanzar desgaste crítico
3.3	Inspección QA/QC en cada intervención refractaria
3.4	Revisión de ductos de ventilación
3.5	Verificación de alineación y cargas en rodillos
3.6	Verificación sellos y instrumentación.

9. ¿Cómo se debe realizar el trabajo?	
-----Consideración y pasos a realizar antes de cualquier actividad de mantenimiento -----	
4.1	Reconocimiento del lugar de trabajo y evaluación de accesos al horno rotatorio
4.2	Revisión de historial de fallas reportes termográficos para identificar zonas críticas
4.3	Identificación de puntos calientes (hot spots) mediante Cámara termográfica
4.4	Verificación de espesor remanente del revestimiento en zonas de mayor desgaste
4.5	Identificación de sectores con desprendimiento, fisuración o vitrificación
4.6	Determinación del tramo angular y longitudinal a intervenir
4.7	Validación técnica del alcance del remplazo parcial personal a cargo de actividad
4.8	Coordinación con operaciones para programación de parada controlada
4.9	Elaboración de análisis seguro del trabajo (AST)
4.10	Traslado herramientas, ladrillos y mortero refractario al área
4.11	revisión de stock y certificación de calidad del material refractario
4.12	Verificación de equipo de izaje
4.13	Instalación de iluminación interna adecuada
4.14	Delimitación del área mediante barreras de seguridad
4.15	Uso obligatorio EPP especializado (respirador, casco, protección térmica, arnés)
4.16	Aplicación de procedimiento de bloqueo y consignación (LOTO)
4.17	Confirmación de ausencia de energía mecánica, térmica y eléctrica
-----Enfriamiento y preparación del horno-----	
4.18	Inicio de enfriamiento controlado del horno
4.19	Monitoreo de temperatura hasta alcanzar nivel seguro (< 60°C en carcasa)
4.20	Apertura de escotilla de inspección
4.21	Ventilación interna forzada si es necesario
4.22	Instalación de plataformas internas o andamios certificados
-----Retiro del revestimiento dañado-----	
4.23	Marcado del perímetro exacto del sector a intervenir
4.24	Verificación estructural del tramo antes de iniciar retiro

4.25	Retiro manual controlado de ladrillos fracturados
4.26	Uso de herramientas neumáticas de bajo impacto si es necesario
4.27	Extracción progresiva evitando comprometer zonas sanas
4.28	Clasificación de material retirado (recuperable / desecho)
4.29	Limpieza de restos de mortero adherido
4.30	Inspección detallada de la carcasa metálica expuesta
4.31	Verificación de deformaciones o fisuras en la chapa del horno
4.32	Medición de circunferencial si corresponde al sector intervenido
4.33	Registro fotográfico del estado estructural
-----Preparación de superficie-----	
4.34	Limpieza mecánica de superficie metálica
4.35	Eliminación de polvo y partículas sueltas
4.36	Aplicación de capa de protección anticorrosiva si procede
4.37	Verificación dimensional del diámetro interno del horno
4.38	Revisión de alineación longitudinal

-----Instalación del nuevo revestimiento-----	
4.39	Preparación del mortero refractario según especificación técnica
4.40	Verificación de proporción agua/mortero
4.41	Instalación de primera hilada base
4.42	Aseguramiento de correcta posición entre ladrillos
4.43	Instalación progresiva respetando patrón geométrico original
4.44	Control de juntas y espesor uniforme
4.45	Verificación continua de alineación circunferencial
4.46	Ajuste dimensional del sector de cierre
4.47	Instalación de ladrillos llave de cierre
4.48	Comparación adecuada de mortero en juntas
4.49	Eliminación de excedentes de mortero

4.50	Inspección intermedia de montaje por supervisor a cargo
-----Curado térmico controlado -----	
4.51	Cierre parcial del horno para inicio de calentamiento
4.52	Aplicación de rampa térmica progresiva según fabricante
4.53	Monitoreo continuo de temperatura interna
4.54	Control de gradientes térmicas para evitar choque térmico
4.55	Mantención de temperatura estable durante periodo de secado
4.56	Registro de curva de calentamiento
-----Inspección final y liberación-----	
4.57	inspección visual final del sector intervenido
4.58	Verificación de estabilidad mecánica del revestimiento
4.59	Control de alineación y continuidad estructural
4.60	Retiro de andamios y limpieza interior
4.61	Revisión de herramientas u objetos olvidados
4.62	Cierre escotilla de inspección
4.63	Retiro de bloqueo LOTO bajo autorización
4.64	Puesta de marcha controlada del horno
4.65	Monitoreo de temperatura de carcasa durante primeras horas de operación
4.66	inspección termográfica post-arranque
4.67	Elaboración de informe técnico detallado
4.68	Registro de horas hombre utilizadas
4.69	Actualización historial de mantenimiento del activo
4.70	Liberación formal del equipo a operaciones
10. ¿Cuál es la secuencia correcta de las actividades asociadas al trabajo?	
5.1	Planificación y coordinación con área de operaciones
5.2	Bloqueo del equipo
5.3	Ejecución del reemplazo parcial y tareas asociadas

5.4	Inspección QA/QC
5.5	Desbloqueo y puesta en marcha controlada
11. ¿Qué errores o fallas se han cometido en mantenciones anteriores en este equipo, cuáles y como se evitarán?	
6.1	Instalación incorrecta de ladrillos refractarios
6.2	Falta de control térmico en curado
6.3	Demoras por faltas de stock de repuestos
6.4	Coordinación con área de operaciones para detención del equipo y puesta en marcha
6.5	Mezcla inadecuada de mortero
12. ¿Qué trabajos previos se deben realizar?	
7.1	Revisión planificación de mantenimiento en condiciones adecuadas
7.2	Revisión stock de repuestos ladrillos refractarios y mortero
7.3	Revisión de condiciones asociadas al riesgo del trabajo realizar (AST)
7.4	Retirar herramientas necesarias de bodega
7.5	Verificar lista de equipos y EPP requeridos
7.6	Delimitar área de trabajo
7.7	Evaluar riesgos de operación junto a ITO encargado del área
13. ¿Cuándo se deben realizar?	
8.1	Reemplazo parcial: 2 veces por año en paradas programadas
8.2	Inspecciones térmicas y monitoreo: mensual
8.3	Monitoreo cargas rodillos: bimensual
8.4	Pruebas sensores y limpieza: trimestral
14. ¿El inicio de este trabajo depende del término o entrega de otras actividades?	
9.1	El inicio de este trabajo no depende del término de actividades externas
15. ¿El término de este trabajo afecta el inicio de otro trabajo?	
10.1	La finalización afecta ya que permite la continuidad del proceso de clinkernización (producción de cemento)
16. ¿Existen otros trabajos paralelos que deben realizarse en este equipo?	

11.1	Revisión y limpieza de ventilador
11.2	Mantenimiento rodillos y sellos
11.3	Calibración instrumentación
11.4	Limpieza sensores térmicos
17. ¿Qué repuestos se necesitan	
12.1	Ladrillos refractarios del tipo específico según zona
12.2	Mortero refractario compatible
12.3	Cuñas refractarias de ajuste
12.4	Fibra cerámica de respaldo
12.5	Elementos de sujeción temporal
12.6	Material de relleno para juntas
12.7	Placas aislantes

18. ¿Qué herramientas se necesitan?	
13.1	Martillos neumáticos de baja vibración
13.2	Combo y cinces especiales
13.3	Mezcladores de mortero refractario
13.4	Llaves dinamométricas
13.5	Equipo de izaje
13.6	Andamios certificados
13.7	Medidor de circunferencia
13.8	Equipo de soldadura si hay fisuras en carcasa metálica
13.9	Instrumentos de medición dimensional
13.10	Espátulas
13.11	Lijas
13.12	Respirador con filtro de polución
13.13	Arnés de seguridad con línea de vida
13.14	Martillo neumático

13.5	Esmeril angular
13.6	Nivel laser
13.7	Calibrador de espesores
13.8	Prensa manual
19. ¿Qué equipos se necesitan?	
14.1	pirómetro infrarrojo
14.2	Detector de gases portátil
14.3	Mezclador industrial
14.4	Sistema de monitoreo SCADA
14.5	Camara termográfica
14.6	Aspiradora industrial
14.7	Equipos de elevación certificados
20. ¿Qué competencias técnicas requiere el trabajo	
15.1	Mecánico especialista en instalación refractarios
15.2	Ingeniero mantenimiento industrial
15.3	técnicos mecánicos
15.4	Soldador
21. ¿Qué servicios se requieren contratar?	
16.1	Servicios de instalación de ladrillos refractarios
22. ¿Quien o quienes realizan el trabajo?	
17.1	QUANT CHILE SPA. servicios de mantención
17.2	Equipo de mantenimiento planta melón S. A
23. ¿Quién será el responsable del trabajo?	
18.1	ITO encargado del área
18.2	Supervisor de mantenimiento
24. ¿Cómo asegura usted que las personas que ejecutarán el trabajo sabrán cómo realizarlo?	
19.1	Realizar revisión de planificación de trabajo en conjunto con ITO cemento melón

19.2	Entregar pauta de trabajo, check list de la planificación de mantenimiento a ITO melón
19.3	Charla de seguridad previa
25. ¿Cuál es el tiempo disponible para realizar el trabajo?	
20.1	Ventanas de paradas mayor programadas (24-36 horas según alcance)
26. ¿En qué horario se realizará el trabajo?	
21.1	Durante parada programada con coordinación operaciones-mantenición
27. ¿Estimación de recursos necesarios para realizar el trabajo?	
22.1	Cuadrilla: 2 técnicos mecánicos, 2 especialistas refractarios, 1 supervisor, 1 soldador
22.1	Apollo empresa contratista de mantención Quant SPA
28. ¿Cómo se recepcióno el trabajo?	
23.1	cuadrilla mantención Quant spa.
23.2	inspección QA/QC
23.3	Informe técnico de intervención
23.4	Liberación formal por ITO
29. ¿Qué pruebas se realizarán?	
24.1	Termografía post-arranque
24.2	Verificación estabilidad térmica
24.3	Control de consumo energético
30. ¿Quién o quiénes realizarán las pruebas?	
25.1	Equipo de mantención Quant spa e ITO melón
25.2	Supervisor de mantenimiento, mecánicos planta melón

31. Realice un análisis de riesgo de esta actividad (¿what if?)	
26.1	¿Qué pasaría si el curado es inadecuado? : Riesgo de fisura temprana
26.2	¿Qué pasa si no se remplazan los ladrillos en mal estado a tiempo? : Falla catastrófica y detención prolongada de la producción
26.3	¿Qué pasaría si hay error en la alineación del horno? : Desgaste acelerado

32. ¿Cuáles son los documentos que aseguran la calidad del trabajo?	
27.1	Putas de trabajo. Procedimiento técnico refractario
27.2	Check list remplazo parcial
27.2	Registro fotográfico e informe técnico final
33. Instrucciones de seguridad	
28.1	Buen uso de EPP adecuado
28.2	Capacitación al personal en labores de mantenimiento
28.3	Mantener área de trabajo limpia estableciendo un perímetro
28.4	Aplicación bloqueo LOTO
28.5	Contar con la autorización necesaria para realizar labores de mantenimiento
28.6	Control de atmosferas confinadas
34. Temas pendientes:	
29.1	Confirmación stock refractario en bodega
29.2	Validación fechas paradas programadas