



# Universidad Católica de Santa María

**Escuela de Postgrado**

**Maestría en Ingeniería de Mantenimiento**

**Desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para la atención de fallas en un horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú**

Tesis presentada por:

**Zevallos Grossmann, Guido Raul**

**ORCID: 0009-0000-7658-0847**

para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería de Mantenimiento

Asesor:

**Phd. Mag. Bustamante Nicholson, Alfredo Jose Francisco**

**ORCID: 0009-0008-4247-3486**

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS**

Arequipa, 19 de Diciembre del 2025

**Dictamen: 013135-C-EPG-2025**

Visto el borrador del expediente 013135, presentado por:

**2023003741 - ZEVALLOS GROSSMANN GUIDO RAUL**

Titulado:

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA  
CONFIABILIDAD (RCM) PARA LA ATENCIÓN DE FALLAS EN UN HORNO ROTATORIO DE  
CLINKERIZACIÓN EN UNA CEMENTERA DEL PERÚ**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**29667313 - ALCÁZAR ROJAS HERMANN ENRIQUE  
DICTAMINADOR**



**29267647 - VALENCIA BECERRA ROLARDI MARIO  
DICTAMINADOR**



**30857994 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO  
DICTAMINADOR**



# Desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para la atención de fallas en un horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú

## INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="https://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
4	Submitted to Universidad Alas Peruanas Trabajo del estudiante	1%
5	<a href="https://tesis.ucsm.edu.pe">tesis.ucsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://repositorio.ucsm.edu.pe">repositorio.ucsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%

## DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza inagotable.

A mis amados padres, Lili y Guido, por su amor incondicional. Su apoyo constante y su gran ejemplo de sacrificio, sueños y perseverancia.

A mis queridas hermanas y familia, Mary Ann y Anna Karina. Por su aliento y por recordarme la importancia de la familia.

A mi esposa, Banny, mi compañera de vida y mi mayor soporte. Gracias por tu paciencia y fe en mí. Este logro es de ambos.

A mi hija Gianella, mi orgullo, para que sepa que con dedicación y esfuerzo todo es posible.

A mi bebé aún en vientre, una nueva luz en nuestras vidas, que este logro sea un cimiento para su propio porvenir.

Con todo mi amor y gratitud.

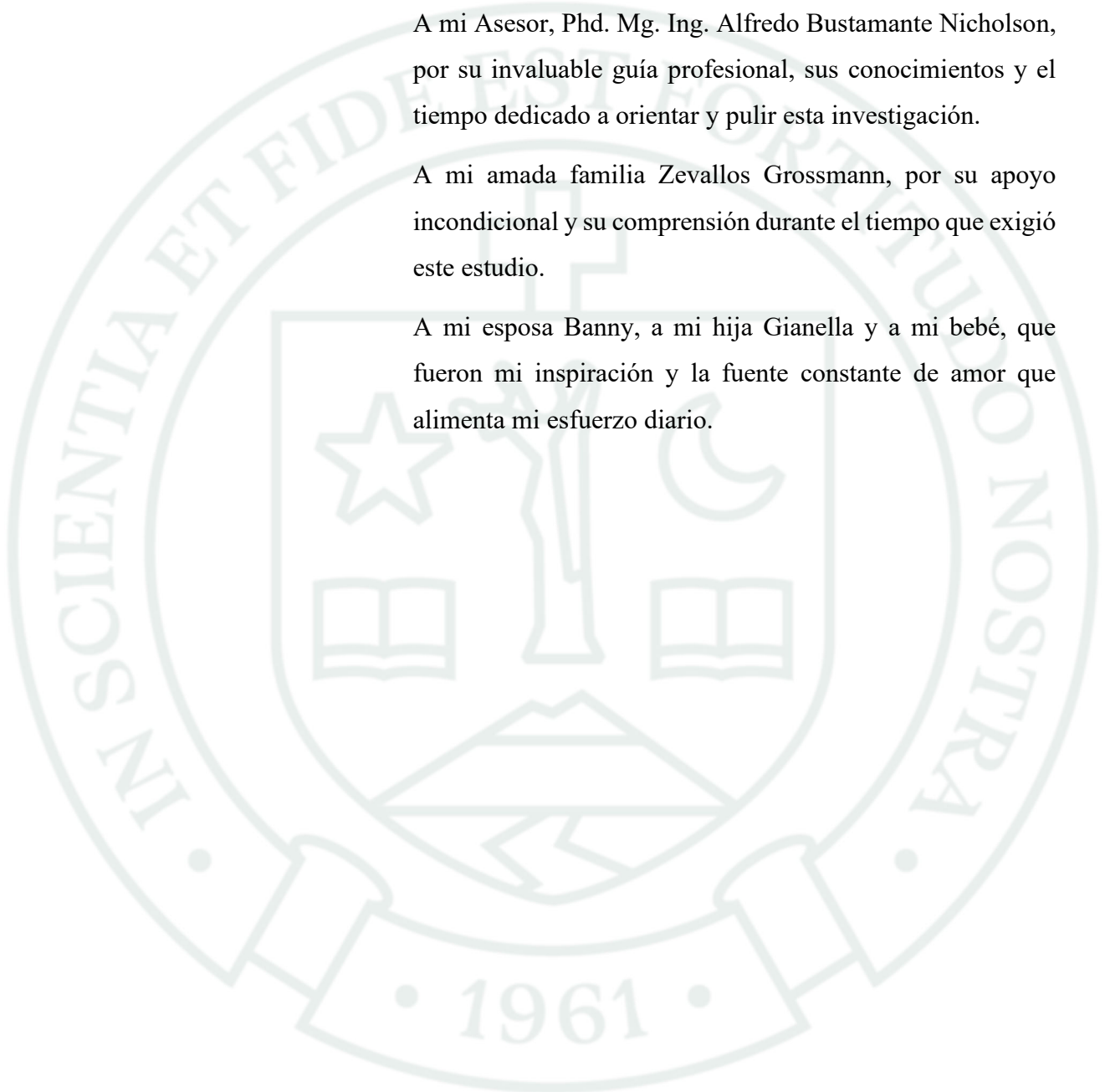
## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme la salud, la perseverancia y sabiduría necesaria para culminar este proyecto.

A mi Asesor, Phd. Mg. Ing. Alfredo Bustamante Nicholson, por su invaluable guía profesional, sus conocimientos y el tiempo dedicado a orientar y pulir esta investigación.

A mi amada familia Zevallos Grossmann, por su apoyo incondicional y su comprensión durante el tiempo que exigió este estudio.

A mi esposa Banny, a mi hija Gianella y a mi bebé, que fueron mi inspiración y la fuente constante de amor que alimenta mi esfuerzo diario.



## RESUMEN

La gestión del mantenimiento es un proceso de suma importancia dentro de una empresa, ya que permite asegurar que los activos presenten un comportamiento confiable, eficiente y seguro. Se requiere que sea planificado, sistemático y, sobre todo, se base en tareas de mejora continua; involucrando a todos los niveles de gestión, desde las operaciones hasta la alta dirección, logrando disminuir los tiempos de inactividad y sus costos operativos.

Es así que la presente tesis busca desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para optimizar la disponibilidad, confiabilidad, eficiencia operativa y poder reducir los costos generados por los mantenimientos realizados en el horno rotatorio de clinkerización, ya que se logró determinar que, durante el 2024, este proceso presentó el mayor número de interrupciones inesperadas de funcionamiento y generó un fuerte impacto sobre el costo de producción y sobre la eficiencia de los activos en la manufactura del cemento.

Se aplicará sobre el equipo y su operación, una metodología completamente estructurada donde se realizará el análisis profundo de cada una de las fallas, su frecuencia y su severidad, con la finalidad de preservar las funciones críticas de este equipo de forma confiable, eficiente, segura y rentable.

Con los resultados obtenidos, se realizará el planteamiento de un programa de mantenimiento adecuado, con el objetivo de disminuir los impactos generados por los paros constantes de producción, y así mismo, establecer una comparación entre la metodología actual y la propuesta (RCM), logrando observar los beneficios obtenidos.

**Palabras clave:** Gestión de mantenimiento, confiabilidad, metodología.

## ABSTRACT

Maintenance management is a very important process within a company, as it ensures that assets demonstrate reliable, efficient, and safe behavior. It needs to be planned, systematic, and, above all, based on continuous improvement tasks; involving all management levels, from operations to top management, to reduce downtime and its operational costs.

Thus, this thesis seeks to develop a reliability-centered maintenance (RCM) management model to optimize availability, reliability, operational efficiency, and to reduce the costs generated by maintenance performed on the Rotary Kiln of Clinkerization, since it was determined that during 2024, this process presented the highest number of unexpected operational interruptions and had a strong impact on production costs and the efficiency of the assets in cement manufacture.

A completely structured methodology will be applied to the process, where an in-depth analysis of each of the most frequent and influential failures was conducted, with the aim of preserving the critical functions of this equipment in a reliable, efficient, safe, and profitable manner.

With the results obtained, it is expected to establish an appropriate maintenance program, where the impacts generated by constant production stoppages will be reduced, and likewise, to establish a comparison between the current methodology and the proposed one (RCM), achieving an observation of the benefits obtained.

**Keywords:** Maintenance management, reliability, methodology.

## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN ..... 1

CAPÍTULO I ..... 3

1. Problema de investigación ..... 4

1.1. Título del proyecto ..... 4

1.2. Línea de investigación ..... 4

1.3. Enunciado del problema ..... 4

1.4. Justificación de la investigación ..... 12

1.4.1. Teórica ..... 12

1.4.2. Práctica ..... 13

1.4.3. Relevancia social - ambiental ..... 13

1.4.4. Utilidad metodológica ..... 14

1.5. Hipótesis ..... 14

1.5.1. Hipótesis general ..... 14

1.5.2. Hipótesis específicas ..... 14

1.6. Objetivos del estudio ..... 15

1.6.1. Objetivo general ..... 15

1.6.2. Objetivos específicos ..... 15

1.7. Formulación del problema ..... 16

1.7.1. Problema general ..... 16

1.7.2. Problemas específicos ..... 16

1.8. Variables ..... 16

1.8.1. Operacionalización de variables .....	17
2. Marco teórico .....	19
2.1. Análisis de antecedentes investigativos .....	19
2.1.1. Internacional .....	19
2.1.2. Nacional .....	20
2.1.3. Local .....	20
2.2. Bases teóricas legales .....	21
2.3. Bases teóricas científicas .....	22
2.3.1. El mantenimiento .....	22
2.3.2. La evolución de la gestión del mantenimiento en el tiempo .....	23
2.3.3. Gestión de mantenimiento .....	24
2.3.4. Tipos de mantenimiento .....	25
2.3.5. Impulso de RCM.....	25
2.3.6. Definición de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) .....	26
2.3.7. Planificación y programación de mantenimiento .....	26
2.3.8. Análisis de confiabilidad de maquinarias y equipos.....	27
2.3.9. Etapas de la implementación RCM .....	28
2.3.10. Análisis de criticidad.....	28
2.3.11. Definición de términos.....	29
2.3.12. Propósito del sistema .....	31
2.3.13. Horno de clinkerización.....	32
CAPÍTULO II .....	38
1. Metodología .....	39
1.1. Método de investigación .....	39
1.2. Tipo de investigación .....	39
1.3. Datos de los investigadores.....	39

1.4.	Campo de verificación .....	39
1.4.1.	Ubicación espacial .....	39
1.4.2.	Ubicación Temporal .....	39
1.5.	Población y muestra .....	40
1.5.1.	Población .....	40
1.5.2.	Muestra .....	40
1.6.	Matriz de consistencia.....	41
1.7.	Técnica de procesamiento y análisis de datos.....	44
1.8.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	44
1.8.1.	Técnica.....	44
1.8.2.	Instrumentos .....	44
CAPÍTULO III.....		46
1.	Resultados.....	47
1.1.	Desarrollar e implementar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el horno rotatorio de clinkerización .....	47
1.1.1.	Implementación de un modelo de Gestión de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) .....	47
1.1.2.	Para la implementación del RCM.....	47
1.1.3.	Plan de actividades - estrategias de mantenimiento basadas en la confiabilidad (RCM) para el horno rotatorio de clinkerización .....	50
1.1.4.	Descripción técnica del horno rotativo de clinkerización.....	51
1.1.5.	Ejecución del mantenimiento actual del horno rotativo de clinkerización .....	51
1.1.6.	Determinación de sistemas y componentes del horno de clinkerización .....	52
1.1.7.	Determinación de criticidad de los sistemas y componentes del proceso de clinkerización.....	55

1.1.8. Cuadro de equipos críticos.....	59
1.2. O1: Identificar y definir las funciones y fallas funcionales del horno rotatorio de clinkerización. ....	61
1.3. O2: Identificar los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización.....	64
1.4. O3: Seleccionar las estrategias de mantenimiento más apropiado para eliminar o disminuir los modos de falla críticos. ....	67
1.5. O4: Elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el horno rotatorio de clinkerización.....	85
1.5.1. Tareas de mantenimiento.....	86
1.6. O5: Plantear un procedimiento de implementación y evaluación continua del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad y mantenimiento de un horno rotatorio de clinkerización.....	91
1.6.1. Indicadores de mantenimiento.....	91
1.6.2. Costo del proyecto.....	95
CONCLUSIONES.....	100
RECOMENDACIONES.....	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

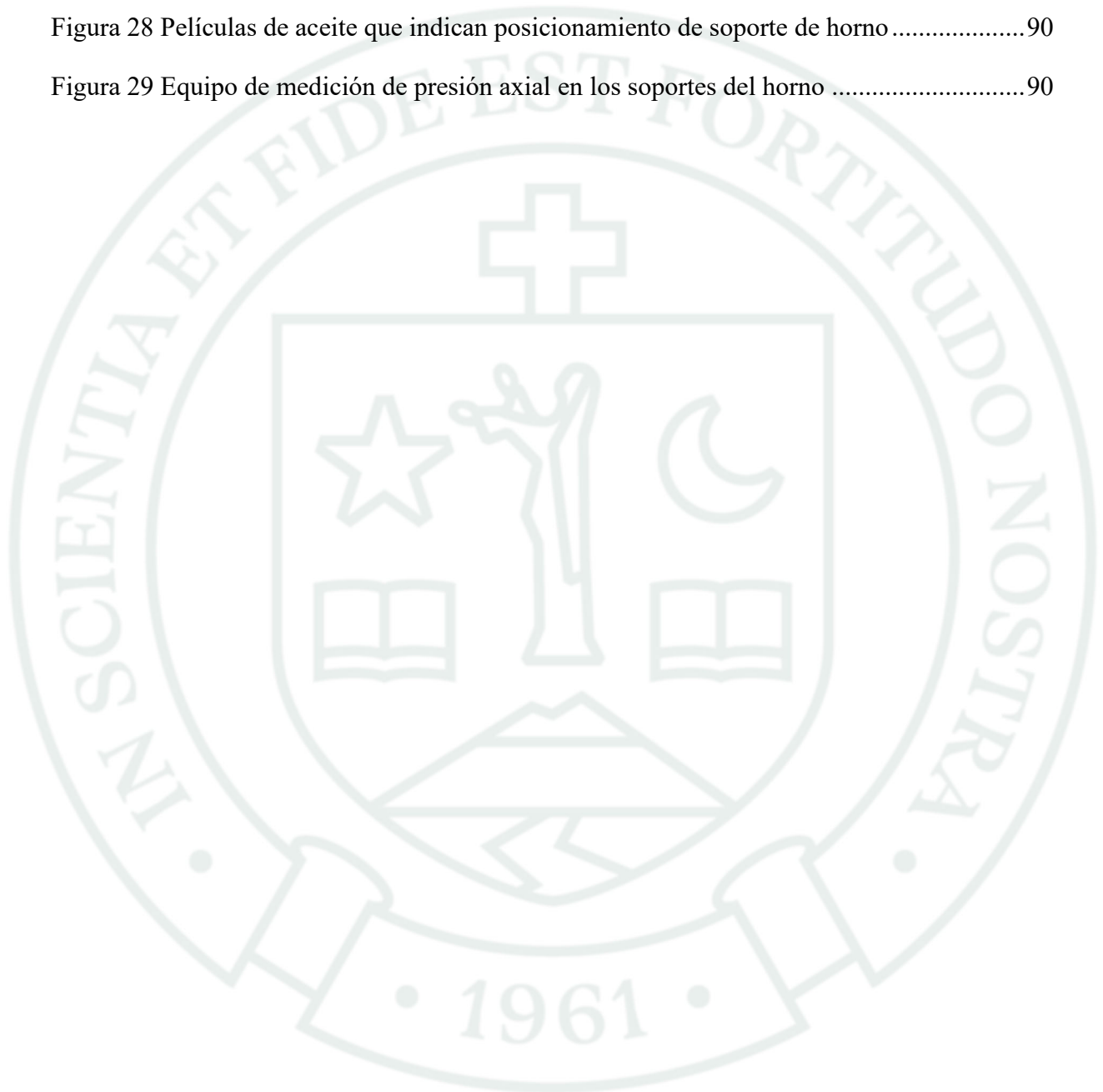
## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Mantenimientos ejecutados en el año 2024 y su impacto económico en nuevos soles (s/.).....	8
Tabla 2 Número de fallas y su impacto económico por cada uno de los procesos durante el 2024 .....	10
Tabla 3 Matriz de operacionalización de variables.....	17
Tabla 4 Enfoques recientes: Mantenimiento y producción.....	24
Tabla 5 Matriz de consistencia .....	41
Tabla 6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.....	45
Tabla 7 Plan de actividades - estrategias de mantenimiento RCM para el horno rotatorio de clinkerización.....	50
Tabla 8 Tabla de datos del horno de clinkerización .....	51
Tabla 9 Tabla de sistemas y componentes del horno de clinkerización .....	54
Tabla 10 Tabla de severidad y criticidad .....	57
Tabla 11 Resultado de criticidad de sistemas y componentes .....	59
Tabla 12 Funciones primarias de los componentes críticos.....	61
Tabla 13 Fallas funcionales de los componentes críticos .....	62
Tabla 14 Modos y efectos de falla de los componentes críticos.....	64
Tabla 15 Acciones requeridas para la atención de los modos de falla.....	67
Tabla 16 Consecuencias y estrategias.....	75
Tabla 17 Programa de tareas de mantenimiento .....	86
Tabla 18 Indicadores de mantenimiento .....	94
Tabla 19 Comparación de costos de mantenimiento .....	96
Tabla 20 Costos para implementación de la metodología de RCM.....	98
Tabla 21 Flujo de caja.....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

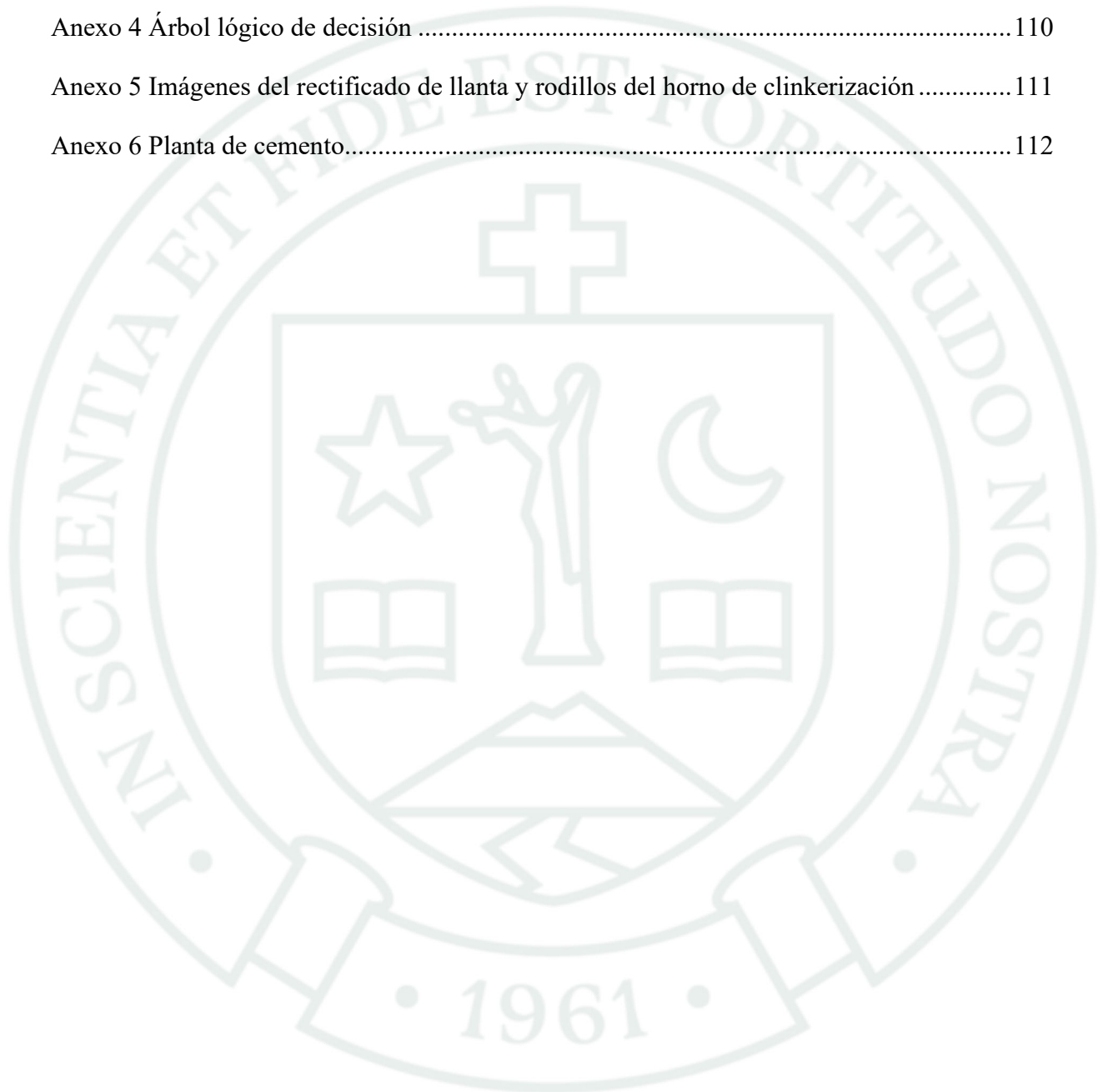
Figura 1 Esquema de aplicación de los distintos tipos de mantenimiento dentro del RCM.....	2
Figura 2 Proceso de producción de cemento .....	5
Figura 3 Diagrama de flujo del proceso del cemento .....	6
Figura 4 Histograma de mttos correctivos vs mttos preventivos - predictivos ejecutados en el 2024.....	8
Figura 5 Histograma de mantenimientos correctivos vs preventivos – predictivos ejecutados 2024 / Costo de mtto por mes. ....	9
Figura 6 Diagrama de Pareto de costo / %Acum / Cantidad de falla por proceso 2024.....	11
Figura 7 Análisis de las fallas y tiempos de paro en el horno rotatorio de clinkerización - 2024.....	11
Figura 8 Valor para el dueño .....	22
Figura 9 Evolución histórica de la gestión del mantenimiento a nivel mundial.....	23
Figura 10 Categorías de mantenimiento .....	25
Figura 11 Etapas para la implementación RCM.....	28
Figura 12 Campos de aplicación de análisis de criticidad .....	29
Figura 13 Diagrama de producción del cemento .....	31
Figura 14 Gráfica de EPS de procesos del horno de clinkerización .....	33
Figura 15 Diagrama de proceso de clinkerización del cemento .....	33
Figura 16 Diseño de horno seco de 3 estaciones .....	34
Figura 17 Llanta revestida con ladrillo refractario .....	35
Figura 18 Rodillos de apoyo de llantas – estación de giro .....	36
Figura 19 Distribución de fuerzas axiales del horno .....	37
Figura 20 Etapas de implementación del RCM .....	48
Figura 21 Descripción del mantenimiento actual del horno rotativo de clinkerización .....	52
Figura 22 Identificación física de un horno rotatorio de clinkerización .....	53
Figura 23 Porcentaje de fallas del horno de clinkerización .....	55

Figura 24 Matriz de determinación de riesgo .....	58
Figura 25 Rectificado de llantas y rodillos soportes de horno.....	88
Figura 26 Rodillos de soporte y chumaceras del sistema de soporte y giro .....	89
Figura 27 Fuerzas axiales que trabajan sobre el horno de clinkerización.....	89
Figura 28 Películas de aceite que indican posicionamiento de soporte de horno .....	90
Figura 29 Equipo de medición de presión axial en los soportes del horno .....	90



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Tabla de costos y tiempos de paro de todos los procesos 2024”.....	107
Anexo 2 Ficha de registro de falla de los equipos .....	108
Anexo 3 Ficha de observación de horno rotativo de clinkerización.....	109
Anexo 4 Árbol lógico de decisión .....	110
Anexo 5 Imágenes del rectificado de llanta y rodillos del horno de clinkerización .....	111
Anexo 6 Planta de cemento.....	112



## INTRODUCCIÓN

En América Latina, Perú ocupa el sexto lugar como productor de cemento. Esta industria, en nuestro país, posee un mercado segmentado geográficamente, ocasionado por los elevados costos de transporte; esto origina que cada productor de cemento, se desarrolle dentro de su región como monopolio zonal, estimulando su impacto económico y regulando sus propios precios. (González, 2018)

La empresa cementera de la cual se va a desarrollar la presente tesis, se destaca como una de las más grandes en producción a nivel nacional, su mercado se encuentra impulsado por la alta demanda del sector de la construcción desde el 2002 y por el crecimiento en proyectos de infraestructura gubernamentales. Es por ello que es crucial implementar una sólida gestión de producción, asegurar la eficiencia operativa y la reducción de costos para poder mantener su posición en el mercado y satisfacer la creciente demanda.

Sin embargo, actualmente, enfrenta desafíos en la gestión de fallas en sus líneas de elaboración de cemento, con informes de múltiples fallos que afectan significativamente la producción. Estos paros no programados, no solo conllevan a grandes pérdidas económicas, como resultado de tiempos de inactividad, costos de reparaciones de emergencia y uso de recursos que podrían destinarse a otras actividades; sino que adicionalmente a ello, impactan también en la calidad del producto final (cemento) y en el tiempo de entrega.

Analizando esta situación, la gestión del mantenimiento nace como una herramienta necesaria para poder eliminar estas deficiencias. Sin embargo, la sencilla realización de programas de mantenimiento sin un análisis profundo en su generación, planeación y ejecución, puede resultar ineficaz e ineficiente.

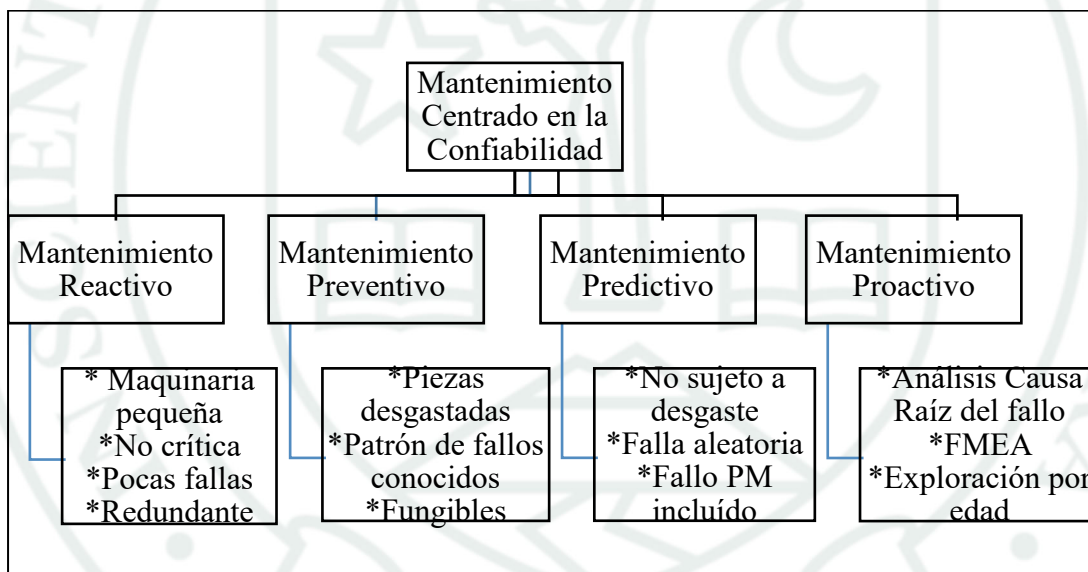
En esta tesis, se realizará el análisis de la totalidad del proceso de elaboración del cemento, para poder identificar el sector más crítico, donde se ha logrado detectar el mayor índice de fallas, que vienen influyendo directamente en los costos de producción, en paros inesperados, en el medio ambiente y en la calidad del cemento obtenido. El objetivo principal es identificar el origen de las oportunidades de mejora que permita la realización de un estudio del proceso de trabajo del equipo, para determinar en base a su criticidad e historial de fallas una estrategia de mejora de mantenimiento que optimice la disponibilidad de los equipos, reduzcan los costos operativos y fortalezcan la productividad del proceso seleccionado.

Se necesita tomar medidas de mejora en la metodología de mantenimiento actual, donde la planificación, se basa en el historial de fallas y en las actividades preventivas y correctivas, generando bases estratégicas para lograr un crecimiento sostenible de su performance en el tiempo. Se pretende emplear la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), que según Moubray en su libro RCM II, indica que esta metodología se presenta como una solución eficaz para gestionar el mantenimiento de equipos industriales, debido a que permite identificar las funciones críticas de un sistema, en nuestro caso el de clinkerización, los modos de falla, sus efectos y las repercusiones asociadas, facilitando la implementación de estrategias de mantenimiento más proactivas y eficientes (Moubray, 1997).

Mediante la aplicación de esta metodología, podemos estar seguros que mejoraremos los valores hasta estar dentro de los indicadores de clase mundial, como se muestra en el esquema 1.

**Figura 1**

*Esquema de aplicación de los distintos tipos de mantenimiento dentro del RCM*



*Nota.* (Cruz, 2025).

Así, este trabajo se convierte en una contribución importante al ámbito del mantenimiento industrial, ofreciendo una perspectiva práctica y aplicable que puede ser replicada en otros procesos de la producción del cemento. La aplicación del RCM en una planta de cemento, permitirá que el resultado muestre mejoras en MTBF, OEE y sostenibilidad, validando la replicabilidad del enfoque RCM en entornos productivos modernos más allá de industrias tradicionales. (Jena et al, 2024)



## **CAPÍTULO I**

## **1. Problema de investigación**

### **1.1. Título del proyecto**

Desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para la atención de fallas en un horno rotatorio de clinkerización en una cementera que se desarrolla en el Perú.

### **1.2. Línea de investigación**

Ingeniería de Mantenimiento.

### **1.3. Enunciado del problema**

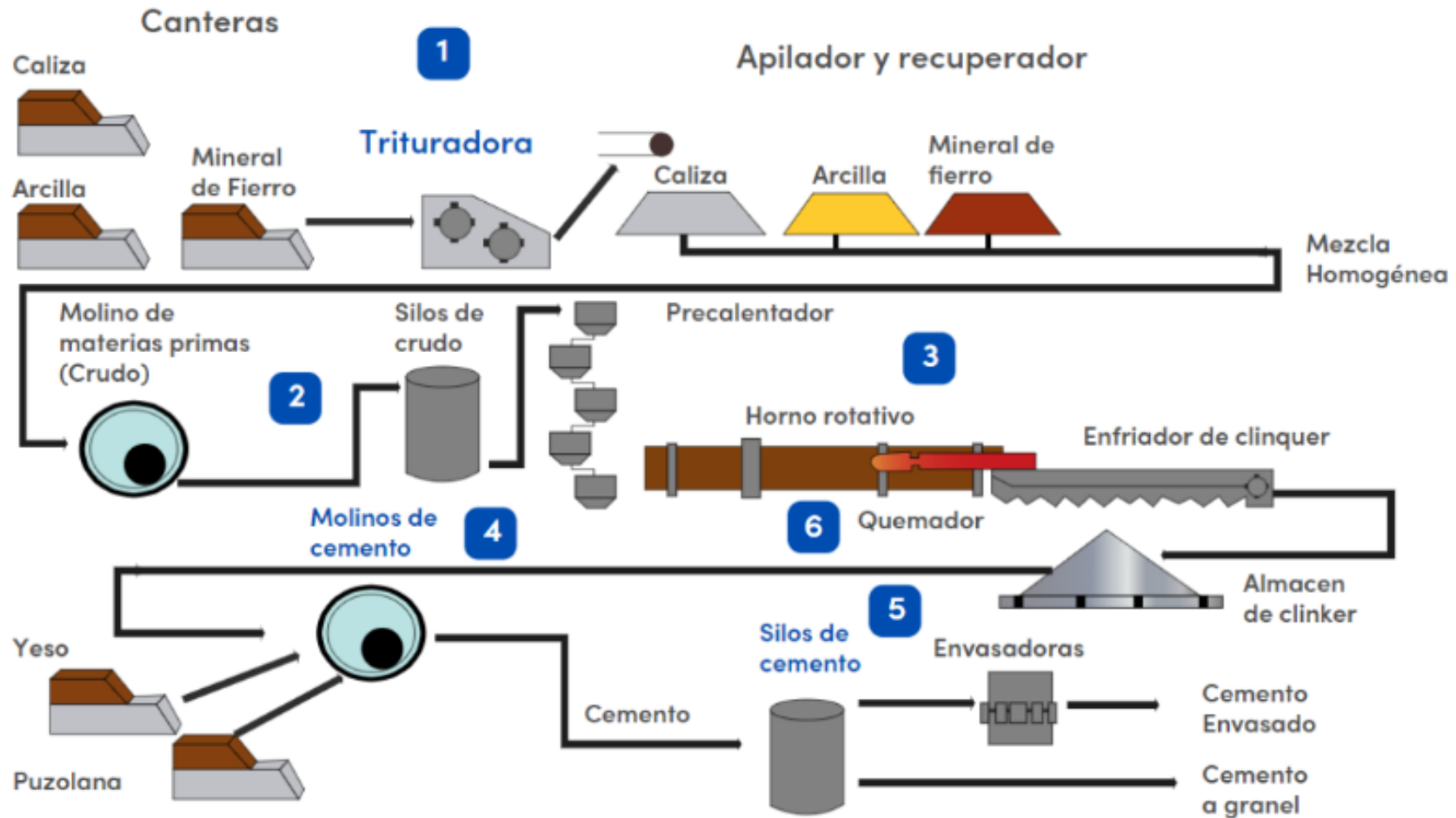
La empresa sobre la cual se desarrollará la presente tesis, elabora diferentes tipos de cemento, siguiendo la misma secuencia de procesos de producción, pero agregando diferentes porcentajes de materia prima para su conformación, según sea el requerimiento de cada producto.

Actualmente, el proceso de producción se compone de la siguiente manera:

- Trituración Primaria (01 Chancadora de Barras)
- Trituración Secundaria (01 Chancadora de Barras)
- Molienda de Harina (01 Molino Vertical)
- Clinkerización (01 horno rotatorio vía seca)
- Molienda de cemento (02 Molinos Verticales y 04 Horizontales)
- Embolsado (02 Embolsadoras Haver)

**Figura 2**

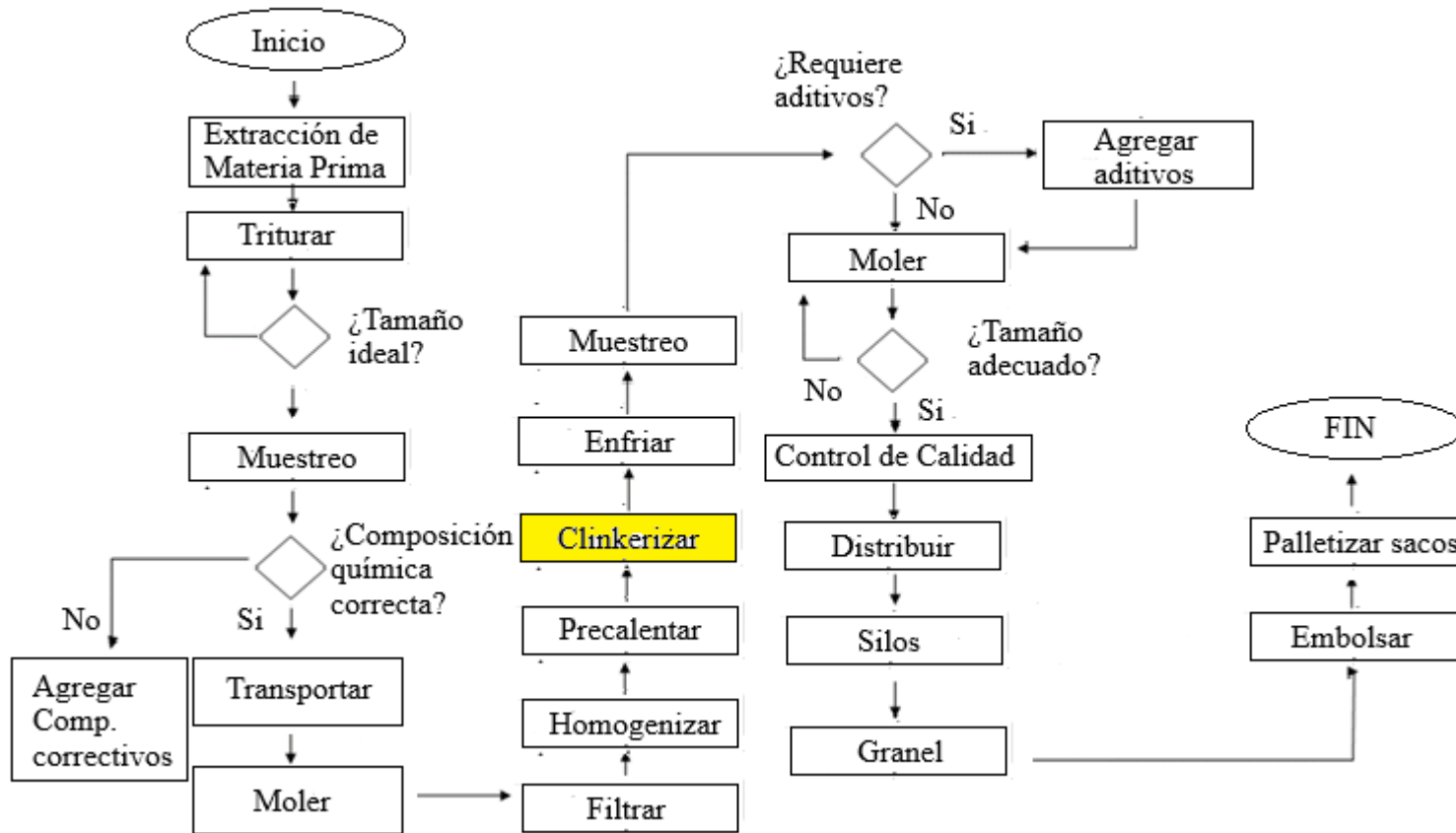
*Proceso de producción de cemento*



*Nota.* (ECN automation, 2025).

**Figura 3**

*Diagrama de flujo del proceso del cemento*



*Nota.* (Espinoza, 2020).

Para que se pueda desarrollar cada uno de los procesos de elaboración de cemento, en forma continua y eficiente, el equipo de mantenimiento realiza trabajos de reparación y mantención en cada uno de los activos que se emplean en planta, por lo que, se puede decir que esta área es de vital importancia y no solo es un soporte del proceso, sino un pilar estratégico para cumplir con la elaboración del cemento.

Los equipos utilizados en el proceso de producción trabajan en condiciones extremas y pueden estar sujetos a fallas diarias que pueden interrumpir su funcionamiento cuando más se necesita.

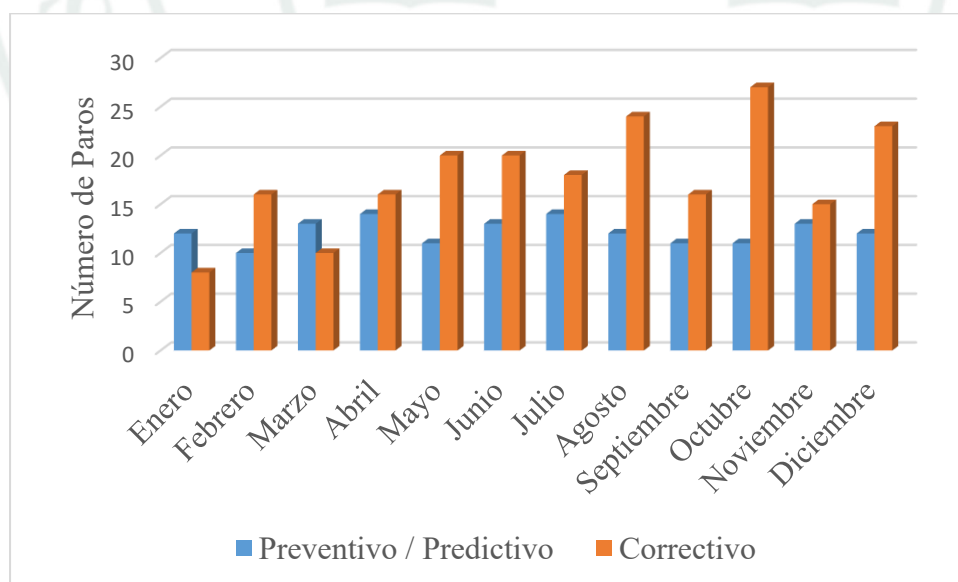
Actualmente, la planta cementera sobre la cual se va a realizar la presente tesis, ha presentado un incremento considerable en la frecuencia y severidad de fallas no programadas en los equipos, influenciando directamente sobre el número de paros de emergencia, el costo de reparaciones y las eficiencias operativas.

Como respuesta inmediata a ello, el área de mantenimiento en los últimos meses de trabajo, se ha basado en una metodología caracterizada por un enfoque reactivo, donde la inspección predictiva se ha dejado de lado, basándose netamente en la experiencia individual. Directamente, se recurre con regularidad al mantenimiento correctivo y en menor proporción el mantenimiento preventivo para asegurar la continuidad de la producción y el funcionamiento adecuado de los equipos.

Durante el año 2024, mensualmente, se realizó una recolección y análisis de datos, referente al número de atenciones correctivas, preventivas y predictivas (inspecciones visuales y de equipos en paro) que se tuvieron durante dicho año, así como el impacto económico que presentaron, para ello, solo fue considerado el costo por tiempo de paro por proceso, ya que los costos de repuestos por mantenimiento realizado no son considerados significativos en comparación con los costos anteriormente nombrados. Todo ello se puede ver en el anexo 1, donde se describe claramente el impacto que se tuvo mes a mes por cada uno de los procesos y que se presenta de modo resumido en la Tabla 1 y figura 4, a continuación.

**Tabla 1***Mantenimientos ejecutados en el año 2024 y su impacto económico en nuevos soles (S/.)*

Mes	Tipo de mantenimiento				Total # Paros	Costo Mensual de Mtto (S/.)
	Cant. De Mttos Preventivo / Predictivo	Costo Mtto Prevent – Predict (S/.)	Cant. De Mttos Correctivo	Costo Mtto Correct. (S/.)		
Enero	12	264,500.00	8	115,500.00	20	380,000.00
Febrero	10	199,500.00	16	291,700.00	26	491,700.00
Marzo	13	295,000.00	10	338,850.00	23	633,850.00
Abril	14	310,000.00	16	256,430.00	30	566,430.00
Mayo	11	214,500.00	20	475,215.00	31	689,715.00
Junio	13	295,000.00	20	283,720.00	33	578,720.00
Julio	14	310,000.00	18	355,250.00	32	665,250.00
Agosto	12	264,500.00	24	427,850.00	36	692,350.00
Septiembre	11	214,500.00	16	354,455.00	27	568,955.00
Octubre	11	214,500.00	27	504,050.00	38	718,550.00
Noviembre	13	295,000.00	15	404,252.00	28	699,525.00
Diciembre	12	264,500.00	23	410,325.00	35	674,825.00
<b>Total</b>	<b>146</b>	<b>3,141,500.00</b>	<b>213</b>	<b>4,217,870.00</b>	<b>359</b>	<b>7,359,370.00</b>

*Nota.* Elaboración propia.**Figura 4***Histograma de mttos correctivos vs mttos preventivos - predictivos ejecutados en el 2024**Nota.* Elaboración propia.

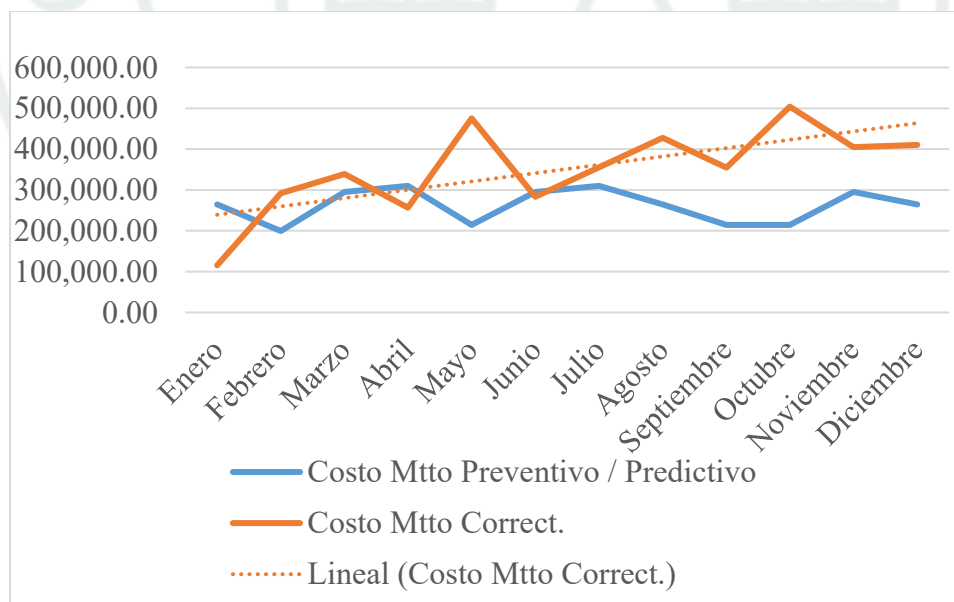
Como se puede apreciar en la tabla 1 y la figura 4, se debe considerar que los mantenimientos preventivos programados, generalmente tienden a darse una vez al mes por cada uno de los procesos que se tienen para la elaboración de los distintos tipos de cemento, se considera que en esta planta son 12 procesos; la variación se presenta cuando alguno de ellos (molienda de cemento) se mantiene sin producción por un tiempo determinado, ya que se tiene mayor requerimiento de un tipo de cemento en especial; así como también, si se cuenta con fallas no funcionales detectadas por parte del área de predictivo, que son programadas para su atención en paros anticipados.

Adicionalmente a ello, se debe de considerar que el número de mantenimientos predictivos, tienen la misma frecuencia que los preventivos, ya que se está tomando en cuenta las actividades de inspección visual y mantenimiento en paro por parte de cada uno de los equipos principales de cada proceso.

También, se logró determinar que, durante el año 2024, el número de paros correctivos ha presentado una tendencia de incremento mes a mes; y estos a su vez, han influenciado directamente sobre los costos de mantenimiento mensual, como se muestra en la figura 5.

**Figura 5**

*Histograma de mantenimientos correctivos vs preventivos – predictivos ejecutados 2024 / Costo de mtto por mes.*



*Nota.* Elaboración propia.

Los mantenimientos correctivos, debido a su aumento progresivo, dominaron consistentemente todos los meses, tanto en número de ocurrencias como en costos por paros

no programados, lo que brinda una oportunidad para fortalecer estrategias preventivas y predictivas. Esto permitiría reducir averías inesperadas, optimizar la operación, mejorar la disponibilidad y fiabilidad de los equipos productivos y reducir los costos por paros de procesos.

Posterior a ello, se verificó nuevamente el Anexo 1, y se realizó un análisis más detallado de todos y cada uno de los procesos, para poder determinar su nivel de impacto e influencia sobre los indicadores y costos generados a causa de las fallas correctivas presentes (Tabla 2 y figura 6).

**Tabla 2**

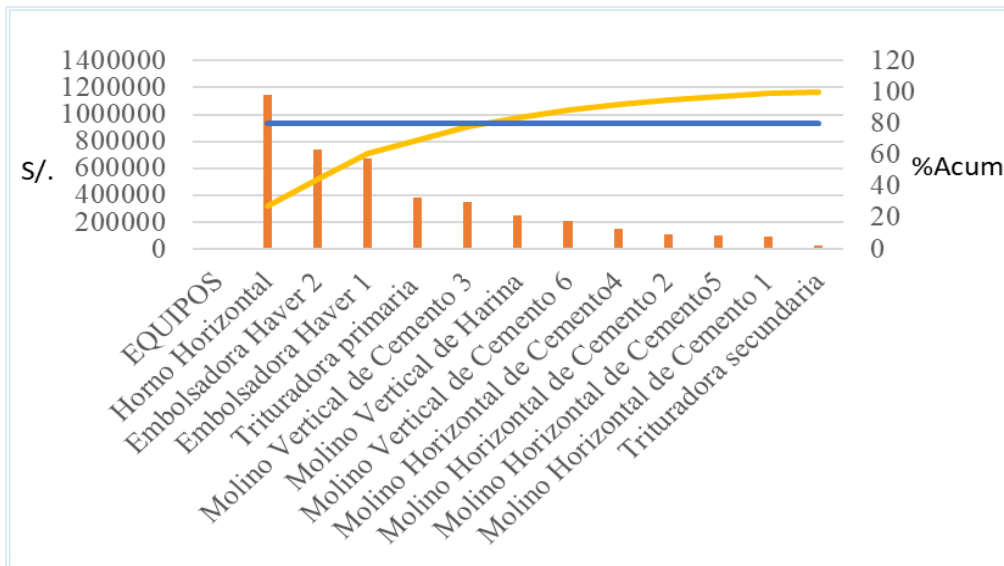
*Número de fallas y su impacto económico por cada uno de los procesos durante el 2024*

<b>EQUIPOS</b>	<b># FALLAS</b>	<b>COSTO TOTAL S/.</b>
Trituradora primaria	11	386,100.0
Trituradora secundaria	1	21,600.0
Molino Vertical de Harina	13	250,750.0
Horno Rotatorio de Clinkerización	46	1,143,000.0
Molino Horizontal de Cemento 1	13	94,830.0
Molino Horizontal de Cemento 2	8	105,420.0
Molino Vertical de Cemento 3	16	348,150.0
Molino Horizontal de Cemento4	9	147,840.0
Molino Horizontal de Cemento5	8	99,680.0
Molino Vertical de Cemento 6	11	210,000.0
Embolsadora Haver 1	43	672,700.0
Embolsadora Haver 2	34	737,800.0
<b>TOTAL</b>	<b>213</b>	<b>4,217,870.0</b>

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 6**

*Diagrama de Pareto de costo / %Acum / Cantidad de falla por proceso 2024*

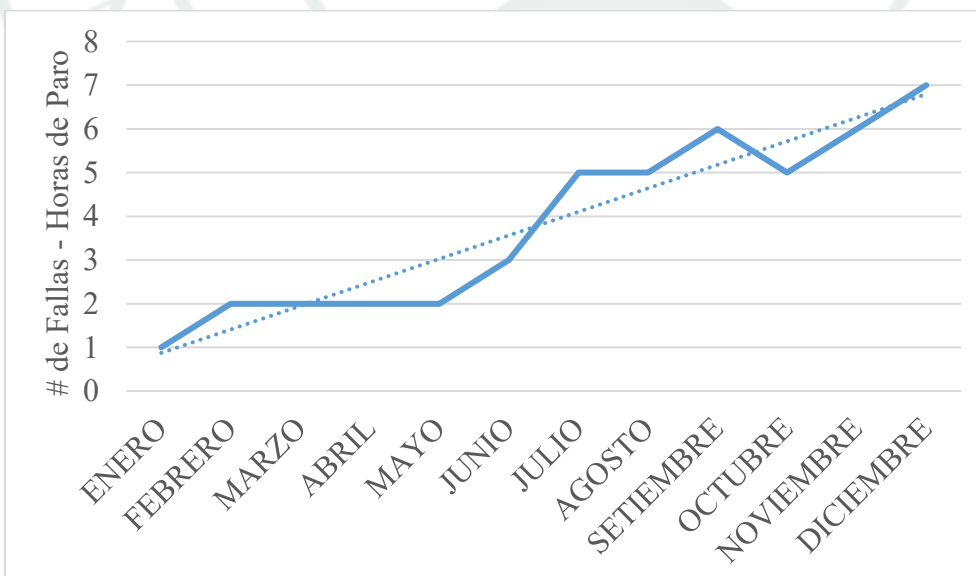


*Nota.* Elaboración propia.

La Tabla 2 y el Pareto de la figura 6, representan el tiempo de paro de cada una de las anomalías ocurridas, así como el impacto económico generado en cada uno de los procesos. Dentro de todos ellos, los que lograron resaltar son: el del horno rotatorio de clinkerización, las máquinas embolsadoras, la trituradora primaria y el molino vertical de cemento 3.

**Figura 7**

*Análisis de las fallas y tiempos de paro en el horno rotatorio de clinkerización - 2024*



*Nota.* Elaboración propia.

Teniendo en consideración los resultados adquiridos con anterioridad y siendo más minuciosos en el análisis, como se logra apreciar en la figura 7, se verifica la tendencia de valores en incremento en el horno rotatorio de clinkerización referente a la ocurrencia de fallas y sus horas de paro.

Con todo ello, se logró concluir que este equipo, afecta considerablemente el proceso normal de elaboración de cemento, si se ataca este proceso y el origen de las paradas, se podrá mitigar el impacto en ocurrencia de fallas y disminuir esta tendencia, incrementando su disponibilidad, confiabilidad, entre otros.

Tomar en cuenta que, durante las fallas mencionadas o indicadas en el recuadro, referente al horno de rotatorio de clinkerización, el equipo, nunca deja de producir, lo que generalmente ocurre, es que el operador de sala, disminuye en gran parte la carga de materia prima introducida, parando el proceso, pero no el equipo, lo cual genera variaciones en su operación y tiene un tiempo de normalización de aproximadamente 4 horas para su retorno a capacidad nominal. Este tiempo de pérdida en producto producido es valorizado en lo que vendría a ser un paro de 1 hora nominal del proceso total. (4 horas de normalización = 1 hora de paro).

#### **1.4. Justificación de la investigación**

La presente tesis tiene como uno de sus propósitos más importantes el utilizar correctamente las herramientas de confiabilidad buscando mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y la rentabilidad del proceso de clinkerización en la empresa cementera del Perú, asegurando la continuidad de su producción. Una vez desarrollada la tesis, se pretende estandarizar esta metodología en los distintos sistemas del proceso, para incrementar su disponibilidad y su producción, con costos reducidos. Se considera necesaria la aplicación de esta metodología para que se pueda brindar soluciones estudiadas en función al cumplimiento de los objetivos corporativos planteados.

##### **1.4.1. Teórica**

Tras revisar la literatura existente sobre el tema, diversos autores respaldan la idea de que el RCM, es una metodología que garantiza que el equipo o proceso continúe cumpliendo las funciones para las cuales fue diseñado en el contexto operativo existente. Es por ello, que podemos decir que este desarrollo del RCM, se sustenta en un sólido marco teórico que abarca la gestión de activos, la confiabilidad de los equipos, la gestión de riesgos y la mejora continua. Esta tesis busca validar empíricamente cómo estos principios teóricos se traducen en una mejora accesible en la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia del proceso, lo que se podría resumir en una mayor competitividad y sostenibilidad para la empresa.

#### **1.4.2. Práctica**

El presente trabajo demostrará que la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), no solo es una herramienta teórica, sino una respuesta eficiente y eficaz para el proceso del horno de clinkerización, que actualmente se viene desarrollando mediante respuestas correctivas. En la actualidad, como ya se ha mencionado, se tienen autores como Moubray, quién respalda y ha puesto en evidencia que, gracias a esta metodología, se logran beneficios como:

- Reducción notable de fallas y sus costos
- Aumento notable en disponibilidad y confiabilidad del horno de clinkerización.
- Optimización de los recursos del área de mantenimiento
- Implantación de una nueva cultura de estrategias modernas de mantenimiento.
- Vida útil más larga del activo, etc.

Una vez completado el proyecto, se tiene la intención de estandarizar esta metodología en los diversos sistemas del proceso de producción. Se considera esencial aplicar esta metodología para ofrecer soluciones respaldadas por estudios, que estén alineadas con los objetivos establecidos. (Moubray, 1997)

#### **1.4.3. Relevancia social - ambiental**

La aplicación de un correcto mantenimiento con un enfoque basado en la confiabilidad, ayuda notablemente a mejorarlo, evitando paradas no planificadas y por lo tanto contribuyendo a la producción continua de cemento, brindando mayores horas de trabajo sin fallas, incrementando la satisfacción laboral y evitando fugas y despilfarro energético, lo que disminuye la huella ambiental y mejora su consumo energético. De igual forma, se reduce considerablemente la producción de residuos que contaminan el medio ambiente (emisiones), todo ello con una perspectiva alineada con normas como la ISO 50001, promoviendo tareas orientadas a la mejora continua en lo referente a la gestión energética

Adicionalmente, con el desarrollo del RCM, nos encargaremos en formar entornos de trabajo mucho más seguros con trabajadores más conscientes y capacitados; influenciando directamente en el estilo de vida de los operadores y su familia.

Finalmente, al priorizar la confiabilidad del horno de clinkerización, incrementamos su reputación ante la comunidad, aportando a su licencia social.

Todo ello, no solo es por un ahorro económico, contribuimos valor social, importancia hacia el medio ambiente y bienestar humano.

#### **1.4.4. Utilidad metodológica**

La tesis que se viene desarrollando referente a la implementación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), presenta una contribución metodológica bastante significativa por el detalle de la aplicación de este tipo de mantenimiento. La tesis ofrecerá un sistema práctico y detallado de cada uno de los pasos para la aplicación de la metodología basada en el RCM, que su uso puede ser ampliado a los demás procesos de elaboración del cemento; dentro de ellos tenemos la identificación y aplicación de estrategias correctas de mantenimiento, un análisis de criticidad detallado de los componentes, equipos y fallas más críticas, así como el uso adecuado de las herramientas y técnicas de atención para eliminar la ocurrencia de fallas, garantizando la eficacia y eficiencia del proceso. Al personal de implementación, permitirá calcular el retorno de su inversión y la justificación de su aplicación en la empresa. El estudio servirá como punto de referencia para investigaciones adicionales, especialmente en el ámbito de mantenimiento y su relación con la confiabilidad de equipos. Para ello, se emplearán instrumentos y métodos que sean válidos y confiables, los cuales serán evaluados mediante los resultados obtenidos.

### **1.5. Hipótesis**

#### **1.5.1. Hipótesis general**

La implementación de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para la atención de fallas en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú incrementará notablemente su disponibilidad, confiabilidad, eficiencia operativa y a la vez logrará disminuir los costos de mantenimiento y operación.

#### **1.5.2. Hipótesis específicas**

H1: La identificación y definición de las funciones y fallas funcionales del horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú, logrará determinar un entendimiento del comportamiento operativo del equipo.

H2: La identificación de los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú, encaminará las tareas de mantenimiento hacia los sistemas de mayor riesgo.

H3: La selección de las estrategias de mantenimiento más apropiado logrará eliminar o disminuir los modos de falla críticos.

H4: El elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el horno rotatorio de clinkerización de una cementera del Perú, logrará una correcta planificación y distribución de recursos, así como el cálculo de tiempos de cumplimiento de tareas.

H5: El plantear un procedimiento de implementación y evaluación continua del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad en un horno rotatorio de clinkerización de una cementera del Perú generará una mejora en la disponibilidad, la confiabilidad y una reducción de los costos de mantenimiento, propiciando la mejora continua en su operación y prácticas de mantenimiento.

## **1.6. Objetivos del estudio**

### **1.6.1. Objetivo general**

Desarrollar e implementar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para la atención de falla en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú, así poder optimizar su disponibilidad, confiabilidad, eficiencia operativa y poder reducir los costos generados por los mantenimientos correctivos realizados.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

O1: Identificar y definir las funciones y fallas funcionales del horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú.

O2: Identificar los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú.

O3: Seleccionar las estrategias de mantenimiento más apropiado para eliminar o disminuir los modos de falla críticos.

O4: Elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el horno rotatorio de clinkerización de una cementera del Perú.

O5: Plantear un procedimiento de implementación y evaluación continua del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad en un horno rotatorio de clinkerización de una cementera del Perú en lo referente a disponibilidad, confiabilidad y costos de mantenimiento.

## **1.7. Formulación del problema**

### **1.7.1. Problema general**

¿Cómo desarrollar e implementar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para la atención de fallas en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú, y así poder optimizar su disponibilidad, confiabilidad, eficiencia operativa y lograr reducir los costos de mantenimientos, midiéndolos comparativamente con los actuales?

### **1.7.2. Problemas específicos**

- ¿Cómo identificar y definir las funciones y fallas funcionales del horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú?
- ¿De qué forma se identifican los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú?
- ¿Cómo se realiza la selección de estrategias de mantenimiento más apropiado para eliminar o disminuir los modos de falla críticos?
- ¿De qué forma se puede elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el horno rotatorio de clinkerización de una cementera del Perú?
- ¿Cómo puedo plantear un procedimiento de implementación y evaluación continua del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad en un horno rotatorio de clinkerización de una cementera del Perú en lo referente a la disponibilidad, confiabilidad y costos de mantenimiento?

## **1.8. Variables**

- Variable dependiente: Valores obtenidos de los indicadores operativos del horno rotatorio de clinkerización, posterior a la implementación del RCM.
- Variable independiente: Desarrollo un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

### 1.8.1. Operacionalización de variables

**Tabla 3**

*Matriz de operacionalización de variables*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Escala de Medición
Valores obtenidos de los indicadores operativos del horno rotatorio de Clinkerización, posterior a la implementación del RCM	Medida cuantitativa del comportamiento, confiabilidad, eficiencia y rendimiento del horno, después de aplicar prácticas de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM	Medición mediante un conjunto de indicadores claves de desempeño (KPIs), como resultado del sistema de registro de mantenimiento y operación. Cada uno de ellos, se calcula utilizando datos históricos en un tiempo determinado, mediante fórmulas establecidas.	Indicadores	Disponibilidad Operativa	Formato de registro de fallas de los equipos / bitácoras operativas	Razón (ratio)
				MTBF (Tiempo Medio entre Fallas)		
				MTTR (Tiempo Medio para la Reparación)		
				Costo de Mtto Correctivo		
				PRI (Rendimiento)		
NAI (Nivel de Aprovechamiento Interno)	Tableros de Control o Indicadores					
				OEE (Eficiencia General)		

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Escala de Medición
Desarrollo un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	"Es un proceso que se usa para determinar los requerimientos del mantenimiento de los activos físicos en su contexto operacional." (Moubray, 1997) Es una estrategia sistemática de gestión de mantenimiento que tiene como objetivo maximizar la confiabilidad operativa de los equipos mediante la identificación y el tratamiento de las fallas.	Su objetivo es maximizar la disponibilidad, seguridad y eficiencia, minimizando el tiempo de inactividad y los costos operativos. Los pasos clave de RCM incluyen: 1. Análisis de funciones y fallos. 2. Estrategias de mantenimiento. 3. Implementación y seguimiento. 4. Evaluación continua.	Planificación	Cantidad de planes de mantenimiento integrado implementados	Ficha de revisión documentaria  Ficha de observación	Razón (ratio)
			Frecuencia de Mantenimiento	Cantidad de mantenimientos programados por mes. Cantidad de mantenimientos ejecutados por mes. Porcentaje de mantenimientos efectuados a tiempo.		
			Tiempo de respuesta	Tiempo promedio de identificación de falla. Tiempo promedio de atención de falla.		
			Tasa de fallas	Cantidad de fallas registradas al mes. Frecuencia de fallas registradas		
			Tasa de averías	Cantidad de averías registradas al mes Frecuencia de averías registradas		
			Efectividad de soluciones de confiabilidad (RCM)	Porcentaje de reducción de atención de averías. Porcentaje de reducción de atención de fallas. Nivel de eficacia de estrategias de mantenimiento actualizadas.		

## 2. Marco teórico

### 2.1. Análisis de antecedentes investigativos

Los estudios relacionados a los hornos de clinkerización enfocados a la confiabilidad son escasos.

#### 2.1.1. *Internacional*

De acuerdo a Castillo et al (2022), en su artículo realiza las investigaciones sobre estrategias de control en hornos cementeros rotatorios, fundamentales en la producción de clínker para cemento, desde los años ochenta hasta la actualidad. Se analizan metodologías como sistemas expertos, control predictivo basado en modelos, redes neuronales artificiales y lógica difusa, destacando los beneficios en eficiencia y calidad del proceso. Se concluye que la integración de tecnologías de inteligencia artificial y de la industria 4.0, como la computación en la nube y el aprendizaje automático, permitirá un control avanzado que satisfaga las necesidades actuales de producción y mejore significativamente la estabilidad y calidad del material.

De acuerdo a Rincón, Anggie (2016), en su informe denominado “Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para horno rotatorio Allis Chalmers en la planta de cemento Cúcuta, CEMEX Colombia S.A”, tiene como objetivo Proponer una estrategia de Mantenimiento basada en la aplicación de la filosofía RCM -Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, detallar las funciones de los activos y los fallos relacionados con cada función para cada subsistema, considerando el entorno operativo específico, establecer la importancia de los subsistemas que integran el horno al identificar sus posibles modos de falla y el efecto que tienen en su funcionamiento operativo y establecer las acciones o estrategias de mantenimiento preventivo que deben llevarse a cabo según el análisis de cada posible falla funcional y así poder mejorar la disponibilidad y confiabilidad del equipo.

### **2.1.2. Nacional**

Específicamente, en el ámbito nacional, la información referente a un horno de clinkerización, es escasa. Cueva, Cristhian, en su tesis se basa en mejorar la productividad de Cementos Selva S.A, mediante la implementación de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad. Se recopilaron datos de producción y paradas del período de enero de 2016 a agosto de 2018, estableciendo indicadores clave como MTBF, MTTR, disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad. Tras evaluar la criticidad de los activos, se identificó que el equipo más crítico era el Molino de Cemento 3, al cual se le realizó un Análisis del Modo y Efecto de Falla (AMEF) para desarrollar planes de mantenimiento preventivo. Se propuso un modelo integral de gestión de mantenimiento, alineado con la norma SAE JA1011, y se demostró que las acciones implementadas se ajustaban al modelo propuesto. Finalmente, se estimó que la reducción de horas de parada impactaría positivamente en la productividad de la empresa. (Cueva, 2019)

Según Aguilar, Aarón; Briones, Willinton (2015), en su tesis que lleva el título de “Diseño de un sistema de supervisión y control para el proceso de obtención de clinker en el horno vertical”, se centró en el análisis y estudio de la problemática generada en el horno vertical a causa de las constantes fallas en la producción, buscando para ello, proponer una solución de Ingeniería electrónica para poder mejorar la eficiencia y disponibilidad. El procedimiento utilizado por los autores, tuvieron mucha relación con los que se requieren para la aplicación del RCM, donde se hizo un estudio de los antecedentes, se analizó el proceso y sus características y siguiendo con la selección de los materiales, métodos y materiales a utilizar, pero con la directiva de la búsqueda de una respuesta automatizada.

### **2.1.3. Local**

De acuerdo a Santos, John (2022), en su tesis denominada “Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad aplicado en el área de Chancado de planta concentradora en la minera Bateas S.A.C. en Arequipa, tiene como objetivo proponer y demostrar que la aplicación de la metodología RCM es una estrategia efectiva para incrementar la disponibilidad mecánica y optimizar el rendimiento de los equipos críticos en el área de chancado de la planta concentradora. En ella, se logra mejorar la disponibilidad de los equipos de chancado en un 10% mayor a años anteriores, remarcando la importancia de mantener las condiciones operativas en el área de chancado en una relación adecuada de trabajo y rendimiento.

Según Mamani, Julio (2023), en su investigación denominada “La implementación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en el área de mantenimiento de la sección de equipos pesados de la Constructora Recife SAC”, se busca realizar un análisis exhaustivo del mantenimiento de estos equipos. La evaluación abarca sistemas y equipos, así como un análisis de costos de mantenimiento, teniendo en cuenta las condiciones laborales a una altitud de 4500 m.s.n.m. Para llevar a cabo la implementación del RCM, se seleccionó el rodillo compactador de la marca Caterpillar, ya que este equipo se encontraba en la situación más crítica en términos de mantenimiento.

## **2.2. Bases teóricas legales**

Básicamente se fundamenta en las normativas de seguridad y salud en el trabajo que son el marco legal que requieren las empresas para brindar un ambiente de trabajo completamente seguro.

Gracias a la aplicación del RCM, promovemos una cultura de prevención de riesgos en el personal; así como también, disminuimos la generación de condiciones inseguras, que podrían culminar en accidentes o lesiones del personal que labora; no solo se pretende buscar la confiabilidad operativa, sino que también se realiza el análisis y determinación de tareas específicas de mantenimiento, para poder reducir la probabilidad de fallas inesperadas que constituyen un riesgo significativo. Recordemos que “un equipo confiable, es un equipo más seguro”.

El Reglamento de la Ley N.º 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, establecido en el Decreto Supremo N.º 005-2012-TR, en su Título de Disposiciones Generales, contempla artículos relevantes que contribuyen al sustento normativo del presente estudio. Dicha ley tiene como finalidad principal promover una cultura de prevención de riesgos laborales a nivel nacional, enfatizando la responsabilidad preventiva de los empleadores, la función de supervisión y fiscalización del Estado, así como la participación activa de los trabajadores y sus organizaciones sindicales. En ese sentido, el artículo 1 de la Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo establece como objetivo fundamental la promoción de la prevención de riesgos laborales en el país, mediante el cumplimiento del deber de prevención por parte de los empleadores, el rol de control ejercido por el Estado y la intervención de los trabajadores y sus organizaciones sindicales, quienes, a través del diálogo social, contribuyen a la difusión, promoción y cumplimiento de la normativa vigente en esta materia. (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, 2011)

Norma DIN 1164-10, Se establece que el cemento tiene la capacidad de endurecerse al entrar en contacto con el aire y el agua, y una vez que ha endurecido, la mezcla adquiere resistencia al mezclarse con el agua debido a la presencia de óxido de calcio, sílice, alúmina y óxido de hierro en su composición. (Wischers, 1972)

“El Decreto Supremo N° 003-2002 del Ministerio de la Producción establece los límites máximos permitidos y los valores de referencia para la producción de cemento” (Ministerio de Producción, 2022).

### 2.3. Bases teóricas científicas

#### 2.3.1. El mantenimiento

En ingeniería, tal como indica Torres, Leandro (2015), en su libro “Gestión Integral de Activos Físicos y Mantenimiento” la gestión de activos físicos se centra en dos aspectos claves: el mantenimiento y la modificación. Mantener implica preservar el funcionamiento y el estado actual de un activo, mientras que modificar significa introducir cambios con el fin de optimizar el valor del activo para la empresa durante su ciclo de vida.

Esta distinción es crucial, ya que, al no mantener un activo, debemos preguntarnos qué funciones queremos que continúe realizando y qué estado queremos conservar. Cada activo se utiliza para cumplir funciones específicas, y el mantenimiento asegura que siga desempeñando las tareas requeridas por los usuarios. En resumen, el mantenimiento es el proceso que garantiza que los activos físicos continúen sosteniendo el rendimiento óptimo de las funciones por las cuales fueron adquiridos, evitando su degradación, preservando su funcionalidad, confiabilidad, disponibilidad y seguridad operativa, reduciendo los costos de operación y extendiendo su vida útil. (Mowbray et al, 2006)

**Figura 8**

*Valor para el dueño*



*Nota.* (Norambuena, 2020).

### 2.3.2. La evolución de la gestión del mantenimiento en el tiempo

La gestión del mantenimiento ha evolucionado en 4 generaciones bien caracterizadas, donde se basaba en reparaciones reactivas o netamente en el mantenimiento correctivo, prosiguió con el mantenimiento preventivo programado (relación entre probabilidad de fallo y la edad de los equipos), continuo con el mantenimiento preventivo condicional – TPM (Análisis Causa Efecto) y finalmente, se ha asentado hacia procesos que integran diversas técnicas de mantenimiento, en apoyo a sistemas sofisticados e integrados (tecnología), donde la previsión y la optimización es su principal elemento, tratando de mantener la efectividad técnica y económica de un equipo o proceso según sea el caso. (Cueva, 2019)

**Figura 9**

*Evolución histórica de la gestión del mantenimiento a nivel mundial*



Nota. (Nava, 2012; Zambrano, 2018).

**Tabla 4***Enfoques recientes: Mantenimiento y producción*

		<b>Producción - Manufactura</b>		<b>Mantenimiento e Ingeniería de Fábricas</b>	
Etapa	Sucede aproximadamente	Orientación hacia ...	Necesidad específica	Orientación hacia ...	Objetivo que pretende
I	antes de 1950	el producto	generar el producto	hacer acciones correctivas	reparar fallos imprevistos
II	entre 1950 y 1959	la producción	estructurar un sistema productivo	aplicar acciones planeadas	prevenir, predecir y reparar fallos
III	entre 1960 y 1980	la productividad	optimizar la producción	establecer tácticas de mantenimiento	gestar y operar bajo un sistema organizado
IV	entre 1981 y 1995	la competitividad	mejorar índices mundiales	implementar una estrategia	medir costos, CMD, compararse, predecir índices, etc.
V	entre 1996 y 2003	la innovación tecnológica	hacer la producción ajustada a la demanda	desarrollar habilidades y competencias	aplicar ciencia y tecnología de punta
VI	desde 2004	Gestión y operación integral de activos en forma coordinada entre ambas dependencias			
		Anticiparse a las necesidades de los equipos y de los clientes de mantenimiento - Predicciones – Pronósticos			
		Gestión de activos			

*Nota.* (Mora, 2009).

### **2.3.3. Gestión de mantenimiento**

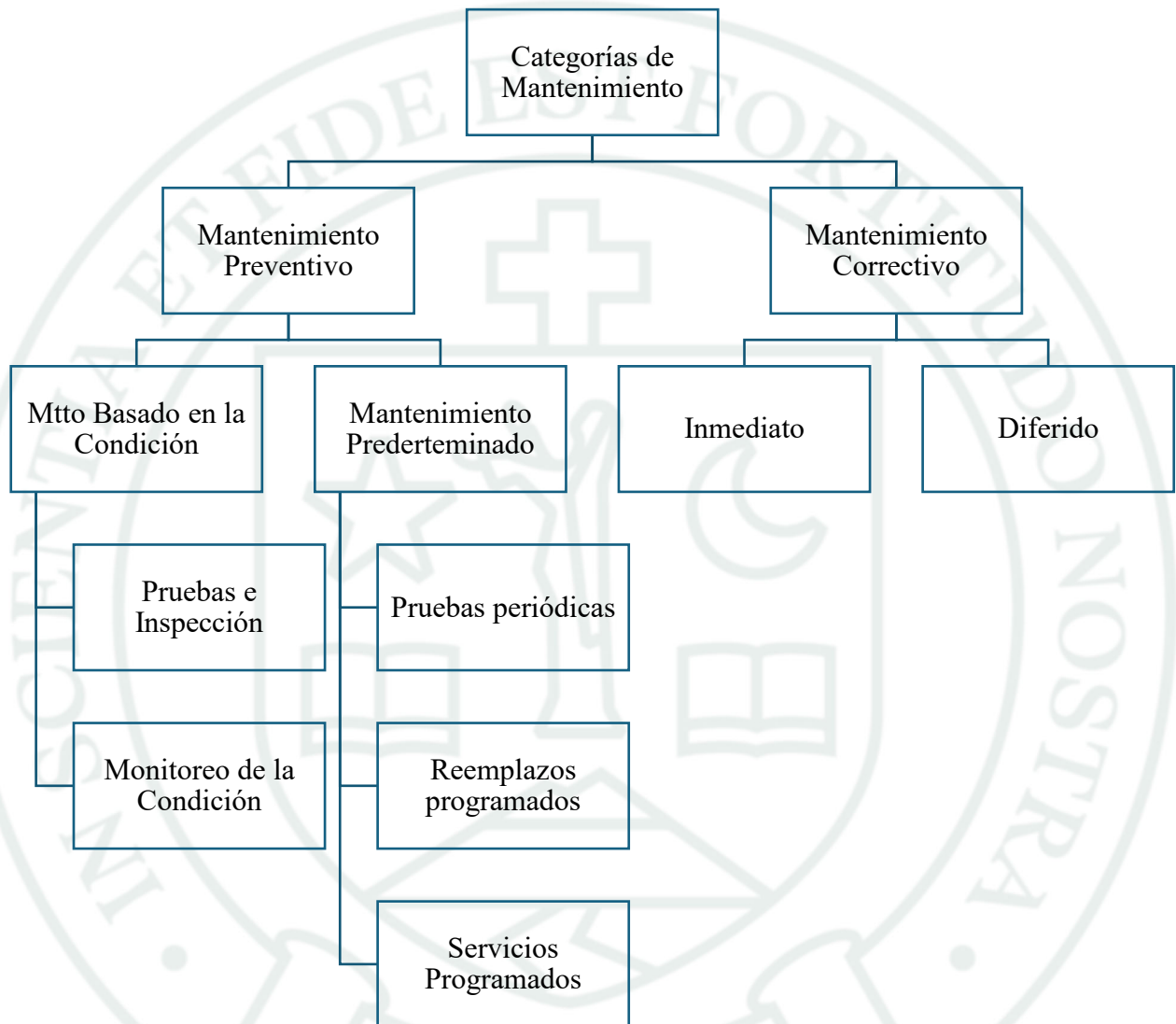
La gestión del mantenimiento es un proceso de suma importancia, ya que requiere ser planificado, sistemático y, sobre todo, innovador, y debe involucrar a todos los niveles de gestión, desde las operaciones hasta la alta dirección. En ocasiones, se observa una brecha entre las áreas operativas y administrativas, lo que conlleva a una planificación deficiente y fallos en la ejecución de los procesos. Esto resulta en una reducción de la disponibilidad y, lo que es más crítico, de la confiabilidad, generando costos elevados de mantenimiento y acortando la vida útil de los componentes. (Espinosa et al, 2012)

### 2.3.4. Tipos de mantenimiento

De acuerdo a la ISO 14224, los mantenimientos se clasifican en:

**Figura 10**

*Categorías de mantenimiento*



Nota. (Cueva, 2019).

### 2.3.5. Impulso de RCM

Entre 1960 y 1980, el mantenimiento preventivo (PM) fue una técnica muy utilizada por las organizaciones. Este enfoque se basa en la idea de que se pueden prever estadísticamente las fallas de máquinas y componentes, permitiendo reemplazos o ajustes para prevenir fallos. Por ejemplo, era común sustituir rodamientos tras un cierto número de horas de operación, asumiendo que su tasa de falla aumentaba con el tiempo. Sin embargo, se

demonstró que esto era ineficaz, ya que en muchos casos los rodamientos superaban su vida útil estimada. SKF propuso una nueva metodología para evaluar la vida de los rodamientos, que considera que estos pueden tener una duración prolongada bajo condiciones adecuadas de lubricación y protección. Este enfoque, conocido como Exploración de vida, fue utilizado por las fuerzas armadas de EE. UU. en la década de 1970 para reemplazar tareas de mantenimiento basadas en tiempo por otras basadas en la condición del equipo. A partir de los años 90, surgió un mayor énfasis en el monitoreo de condiciones, conocido como Mantenimiento Predictivo. Se debe de tomar en cuenta que en los años de 1960 y 1970, se desarrolló una metodología como respuesta a la necesidad de incrementar la fiabilidad y seguridad de los sistemas en la industria aeroespacial, donde las fallas no podían tener consecuencias graves. A esta metodología se le denominó “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad – RCM”, la cual ofrece un marco para desarrollar la estrategia de mantenimiento más efectiva para cada caso y la cual será desarrollada a continuación. (Córdova, 2005)

#### **2.3.6. Definición de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)**

Es esencial que los usuarios comprendan la aplicación y el uso de los activos físicos que poseen para asegurar su confiabilidad. Según Moubray, en su libro "RCM II", el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se describe como un proceso destinado a identificar las acciones necesarias para que los activos sigan cumpliendo las funciones que sus usuarios esperan en su contexto operativo actual. La norma SAE JA1011, publicada en agosto de 1999, establece que esta filosofía de gestión de mantenimiento se lleva a cabo por un equipo multidisciplinario que busca optimizar la confiabilidad operativa de un sistema productivo bajo condiciones de operación específicas. Esto se logra estableciendo las actividades más adecuadas según la criticidad de los activos y considerando los posibles efectos de las fallas en la seguridad, el medio ambiente y las funciones operativas. La norma SAE JA1011 proporciona criterios para evaluar y proponer tareas de mantenimiento que minimicen las fallas en equipos críticos, mejorando su confiabilidad, disponibilidad y reduciendo costos de mantenimiento. (Moubray, 1997)

#### **2.3.7. Planificación y programación de mantenimiento**

La planificación y programación del mantenimiento son cruciales para optimizar la disponibilidad de los equipos. Esto incluye crear planes específicos y distribuir recursos estratégicamente para reducir el impacto en la producción durante las actividades de mantenimiento. (Cueva, 2019)

### **2.3.8. *Análisis de confiabilidad de maquinarias y equipos***

Sobre este punto, la norma SAE JA1011 y JA1012, detalla lo siguiente:

El análisis basado en la confiabilidad es una metodología que se aplica teniendo en cuenta ciertos factores fundamentales, los cuales son:

- Vida útil del equipo
- Contexto Operacional
- Medio Ambiente
- Carga de trabajo
- Apariencia física
- Mediciones. (Conscious Reliability, 2020)

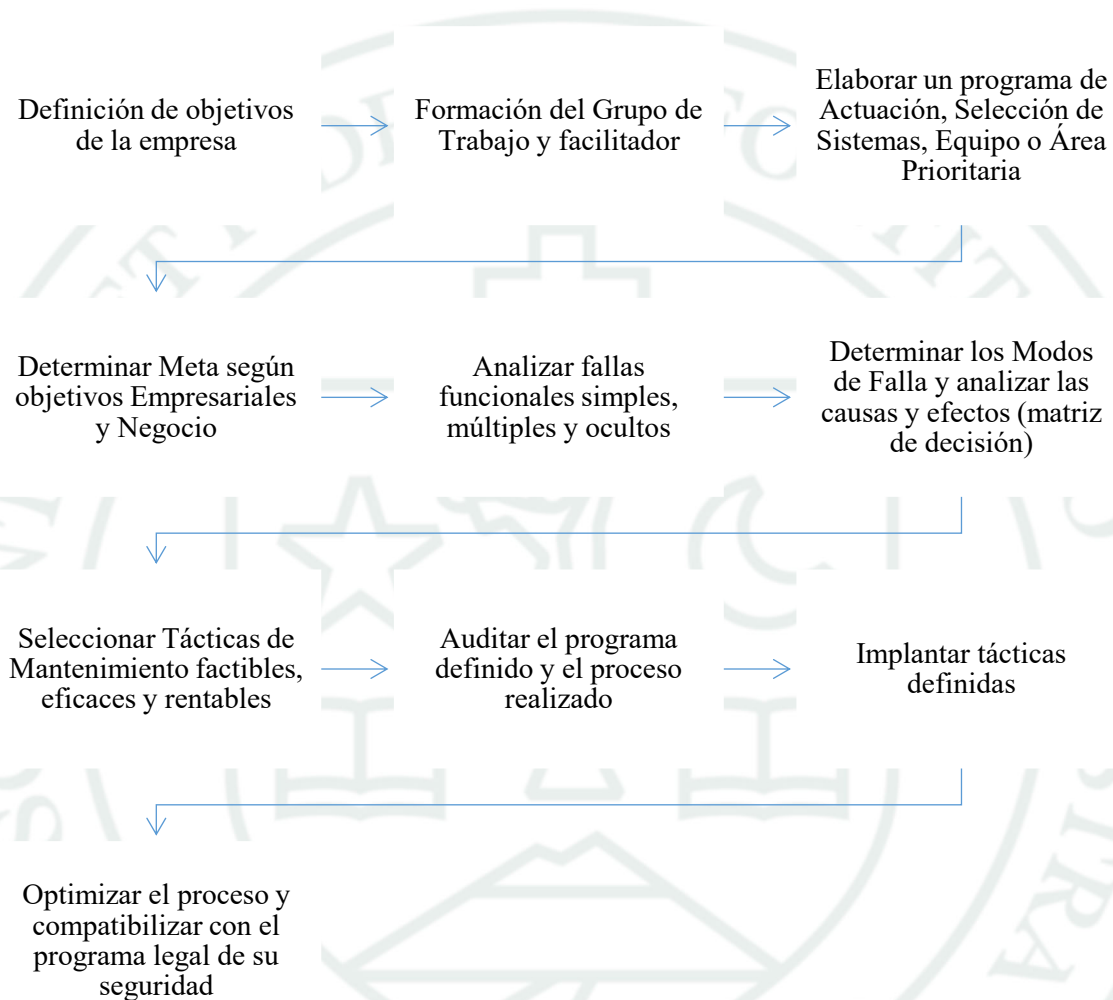
El enfoque del análisis RCM se centra en varios aspectos de la confiabilidad, especialmente en la planificación y preparación del equipo. Su objetivo es identificar las diversas funciones de los sistemas, subsistemas y equipos propensos a fallas, lo que permite establecer prioridades y estrategias de mantenimiento considerando aspectos económicos, de seguridad y ambientales. La importancia del RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) radica en utilizar de manera sistemática la información sobre la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, junto con la experiencia operativa del personal, para desarrollar y optimizar planes de mantenimiento. (Moubray, 1997)

### 2.3.9. Etapas de la implementación RCM

El diagrama en la Figura 11 presenta las etapas para la implementación RCM:

**Figura 11**

*Etapas para la implementación RCM*



*Nota.* (Mamani, 2023).

### 2.3.10. Análisis de criticidad

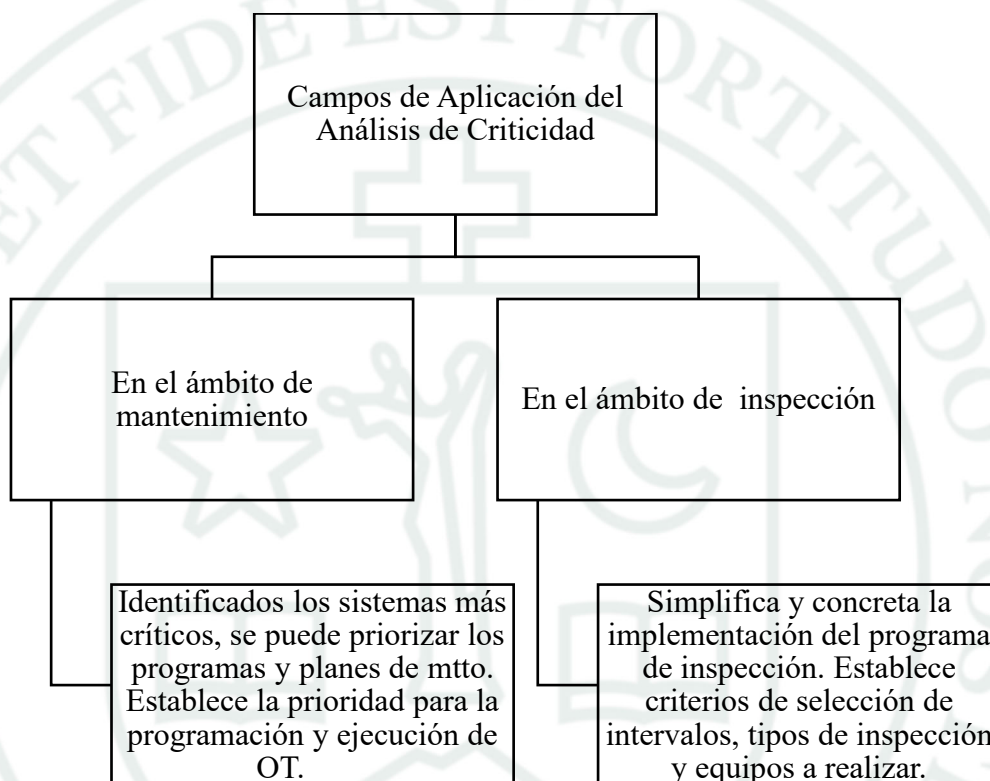
El análisis de criticidad es una metodología que establece una jerarquía o prioridad para procesos, sistemas y equipos. Su objetivo es facilitar la toma de decisiones efectivas, orientando esfuerzos y recursos hacia áreas donde sea crucial mejorar la confiabilidad operativa, teniendo en cuenta la situación actual. (Rincón, 2016)

A continuación, se presenta el objetivo principal del Análisis de Criticidad:

Proporcionar un método que funcione como herramienta para identificar la jerarquía de procesos, sistemas y equipos en una planta compleja, permitiendo dividir los elementos en secciones que se puedan gestionar de forma controlada y auditada.

**Figura 12**

*Campos de aplicación de análisis de criticidad*



*Nota.* (Mamani, 2023).

### **2.3.11. Definición de términos**

**2.3.11.1. Análisis de criticidad.** Se empleará una metodología cualitativa para el análisis de criticidad, la cual tomará en cuenta la frecuencia de fallas, el impacto operacional, el impacto en seguridad, el tiempo de falla y su costo. Esto permitirá identificar el grado de impacto en áreas como costos, seguridad y medio ambiente. (Mamani, 2023)

**2.3.11.2. Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).** Como indica Moubray, Jhon, en su libro RCM2, esta metodología permite identificar las consecuencias de las fallas, aplicar las tareas de mantenimiento adecuadas y, finalmente, seleccionar las estrategias más apropiadas para cada uno de estos sistemas críticos. (Moubray, 1997)

**2.3.11.3. Modos de falla.** Los modos de falla son las causas subyacentes de las fallas funcionales, es decir, lo que provoca que la planta, sistema o activo no cumpla con su función deseada. Cada falla funcional puede ser provocada por múltiples modos de falla, y cada modo de falla conlleva ciertos efectos, que son esencialmente las consecuencias de que esa falla ocurra. (Moubray, 1997)

**2.3.11.4. Indicadores de mantenimiento.** Es un dato cuantificado que evalúa la eficacia y/o eficiencia de todo o parte de un proceso o sistema (real o simulado), en relación con una norma, un plan o un objetivo específico, definido o aceptado en el marco estratégico de la empresa. Dentro de estos tenemos: MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas), MTTR (Tiempo Medio de Reparación), % Cumplimiento de Mantenimiento Preventivo, % Disponibilidad y Confiabilidad, etc; los cuales se desarrollarán más adelante en la parte de Resultados. (Moubray, 1997)

**2.3.11.5. Confiabilidad.** La confiabilidad se refiere a la probabilidad estadística de que un equipo específico funcione sin fallas bajo condiciones normales, lo que permite un funcionamiento eficiente sin interrupciones asociadas. Este indicador debe ser evaluado a lo largo de la vida útil del equipo y durante un período de tiempo determinado de operación. (Tavares & Rondón, 2015)

$$\text{Confiabilidad (R)} = e^{(-\lambda t)}$$

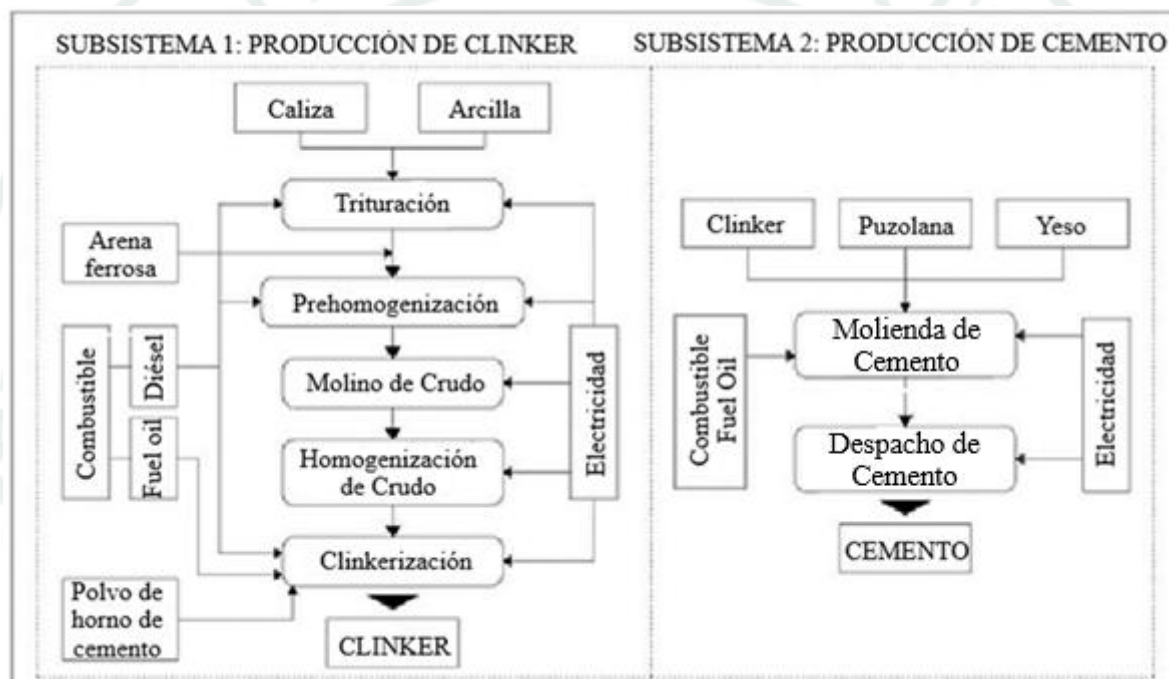
- R: Es la confiabilidad del sistema.
- $\lambda$  (lambda): Es la tasa de fallas del sistema, normalmente expresada como fallas por unidad de tiempo.
- t: Es el periodo de tiempo para el que se calcula la confiabilidad.
- e: Es la base del logaritmo natural (aproximadamente 2,718).

### 2.3.12. Propósito del sistema

El cemento es uno de los materiales más usados en el mundo de la construcción. Su proceso productivo se compone por diferentes etapas de transformación de su materia prima. En la Figura 13 que se muestra a continuación se puede visualizar el proceso y posterior a ello, se dará una breve explicación de cada uno de los pasos que se ejecutan en el mismo. (Rios, 2022)

**Figura 13**

*Diagrama de producción del cemento*



*Nota.* (León & Guillén, 2020).

- Extracción y Trituración Primaria. – Se extrae la materia prima de la cantera (caliza, arcilla) y es triturada en una chancadora de barras.
- Pre Homogenización. - El material triturado es almacenado en pilas donde se mezcla en forma homogénea.
- Trituración Secundaria. - El material ya homogenizado, pasa a una segunda trituración con la finalidad de reducir más aún la caliza para su posterior molienda.

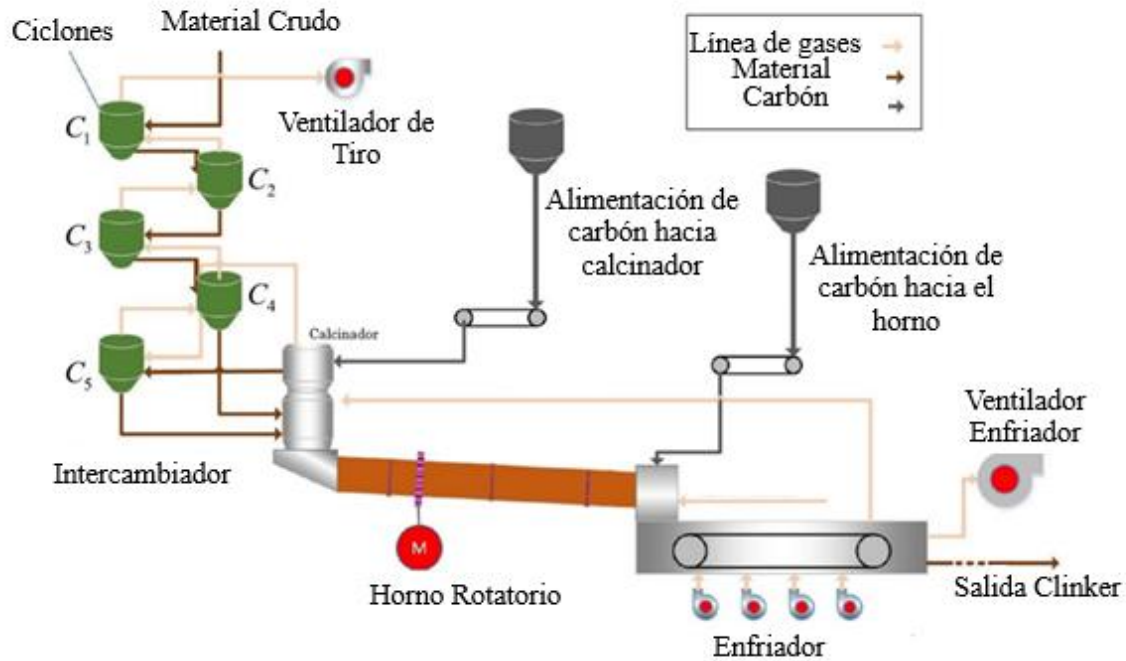
- Molienda de Harina. - La caliza, conjuntamente con el fierro y la pizarra es molida en un Molino Vertical para la obtención de harina, la cual es almacenada en un silo para proceder a la 2da homogenización del material.
- Clinkerización. - La harina es expuesta a altas temperaturas, debido a su pase por el intercambiador de calor (130mts de altura) y por el horno tubular (60 mts de longitud). La flama del quemador genera que la harina se quemee a unos 1400°C, e inmediatamente es enfriado y triturado, originando el producto conocido como Clinker.
- Molienda de Cemento. - El Clinker conjuntamente con la puzolana y el yeso, es mezclado en diferentes proporciones, según el tipo de cemento a producir, donde todo ello es molino para poder obtener cemento, el cuál es transportado a silos para su almacenamiento
- Embolsado y despacho. - El cemento es llevado a máquinas rotativas, las cuales lo embolsan y lo colocan en pallets para poder ser colocados en los camiones para su venta. (León & Guillén, 2020).

### ***2.3.13. Horno de clinkerización***

El cemento se compone principalmente de tres materiales: clínker, adiciones (como caliza, puzolana o escoria) y un regulador de fraguado (yeso). El clínker se forma a partir de silicatos de calcio, que se obtienen al mezclar de manera homogénea materiales que contienen óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y que son procesados térmicamente en un horno. El proceso de clinkerización, se lleva a cabo en un horno rotatorio, como se puede ver en el esquema que presentamos a continuación en las figuras 14 y 15.

**Figura 14**

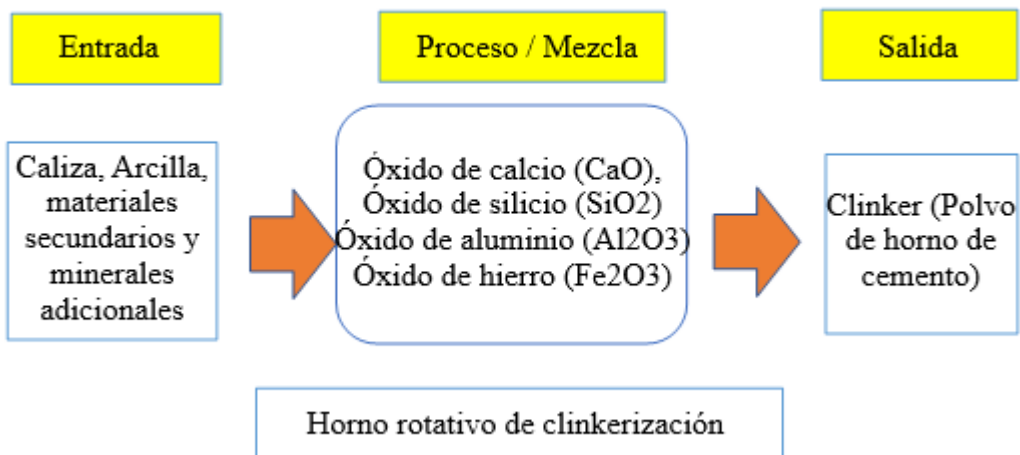
*Gráfica de EPS de procesos del horno de clinkerización*



*Nota.* (Castillo et al, 2022).

**Figura 15**

*Diagrama de proceso de clinkerización del cemento*

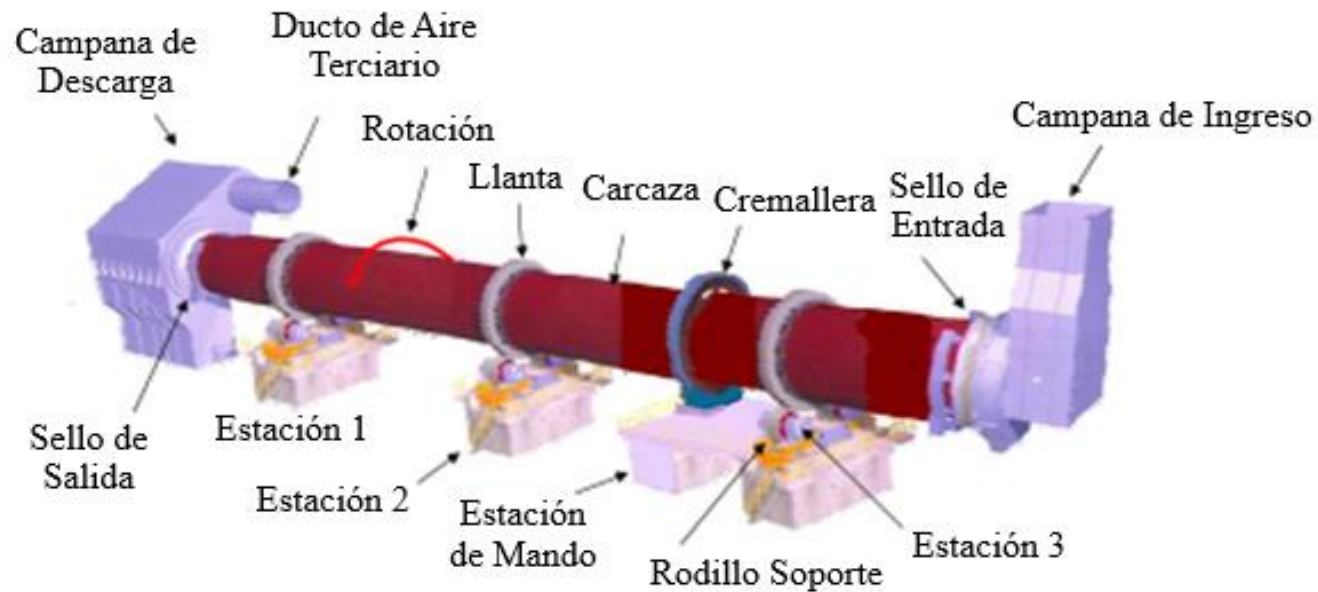


*Nota.* (Castillo et al, 2022).

“El horno de clinkerización es un equipo clave utilizado en la producción del cemento, donde se calcina materias primas para la obtención de Clinker de cemento” (Tongli Heavy Machinery, 1958).

**Figura 16**

*Diseño de horno seco de 3 estaciones*

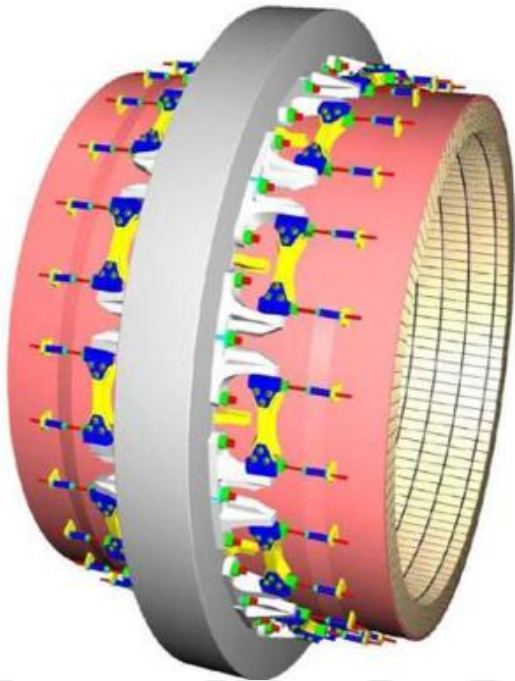


*Nota.* (Edwards, 2014).

Como se logra ver en el gráfico 16, se trata de un gran cilindro metálico giratorio, con cierto grado de inclinación (3.5%), donde gracias a un quemador, ubicado a la salida del equipo, la harina homogenizada gana temperatura hasta que llega a quemarse a unos 1400°C aproximadamente. Este horno es hecho de acero revestido interiormente con ladrillos refractarios resistentes a las elevadas temperaturas que se generan en su interior (Figura 17); gira sobre 2 o 3 estaciones, según sea su diseño, a una velocidad de 3 a 4 rpm. Este equipo opera de forma continua, supervisada por operadores de campo y de sala de control, para garantizar correctamente su funcionamiento. (Holcim Group Support, 2006).

**Figura 17**

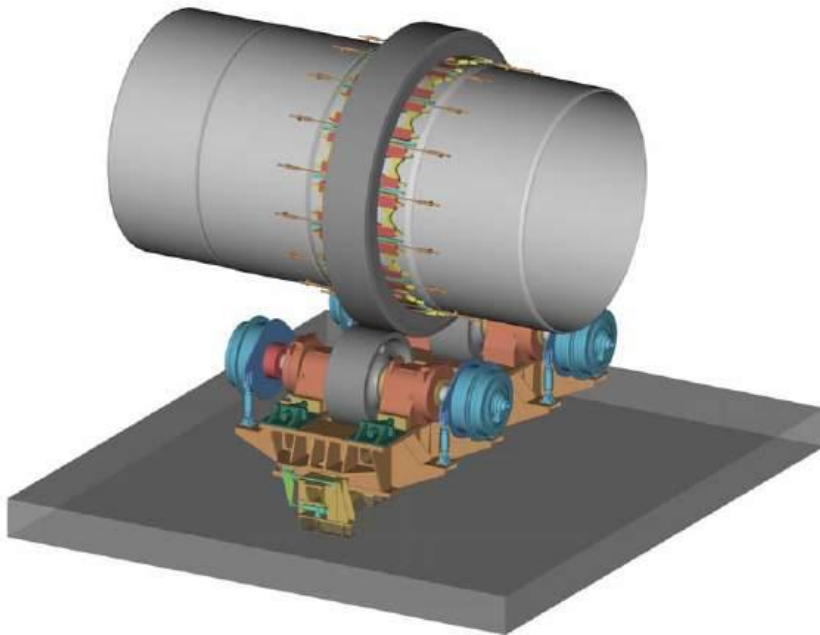
*Llanta revestida con ladrillo refractario*



*Nota.* (Holcim Group Support, 2006).

## Figura 18

*Rodillos de apoyo de llantas – estación de giro*



*Nota.* (Felauto, 2016).

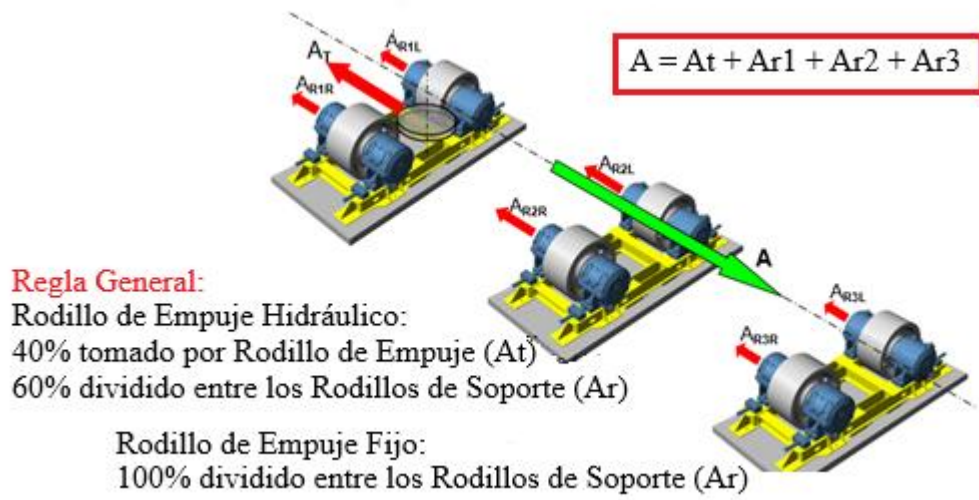
En el gráfico 18, se aprecia los rodillos, sobre los cuales gira la llanta soporte de la virola del horno de clinkerización, a estos componentes unidos, se le denomina también estación de giro.

La inclinación que presenta (3.5%) respecto a la horizontal, es lo que permite que el material avance por el interior del tubo sin inconvenientes, durante su giro. Se tiene que tomar en cuenta que el horno tiene que tener un equilibrio con todos sus componentes (rodillos, llantas, rodillo de retención, etc), esto para poder garantizar la preservación de los mismos.

El horno debido a dicha inclinación también ejerce una fuerza axial que lo empuja constantemente hacia la descarga, es por ello, que debe de existir un balance de fuerzas que también lo impulsen hacia la carga para evitar que el tubo termine impactando con el enfriador. Esta fuerza contraria es generada con una pequeña desviación de los rodillos soporte y el contacto continuo con el rodillo de retención o de empuje axial; es por esta razón, que tenemos que velar por presentar siempre un patrón de contacto casi perfecto entre los rodillos y llantas y una alineación correcta del eje del horno, que originen que el equipo trabaje en un movimiento constante de  $\pm 5$  mm, que ocasione un desgaste uniforme en sus componentes, como se muestra en la figura 19.

## Figura 19

*Distribución de fuerzas axiales del horno*



*Nota.* (Holcim Group Support, 2006).



## **CAPÍTULO II**

## **1. Metodología**

### **1.1. Método de investigación**

El método de investigación es mixto, cualitativo y cuantitativo ya que serán ejecutadas para análisis de información. Según Hernández, R; Mendoza, C, se define como un conjunto de procedimientos para recolectar, analizar y vincular datos cualitativos y cuantitativos en un estudio, para responder a un problema. (Hernández & Mendoza, 2018).

### **1.2. Tipo de investigación**

Tipo de investigación es aplicada. Este es un enfoque científico cuyo propósito es solucionar problemas prácticos o mejorar situaciones reales a través de la aplicación de conocimientos teóricos y métodos de investigación. Es una de las ramas más significativas de la investigación, ya que se centra en producir soluciones concretas y aplicables en diferentes contextos. (Hernández R. C., 2020)

### **1.3. Datos de los investigadores**

Tesista:

- Ingeniero Guido Raúl Zevallos Grossmann

Asesor/a:

- Phd. Mg. Ing. Alfredo Bustamante Nicholson

Duración del Proyecto:

- 12 meses.

Localización donde se ejecutará el proyecto:

- Planta de cemento del Perú.

### **1.4. Campo de verificación**

#### ***1.4.1. Ubicación espacial***

Planta cementera del Perú.

#### ***1.4.2. Ubicación temporal***

Periodo anual - 2024.

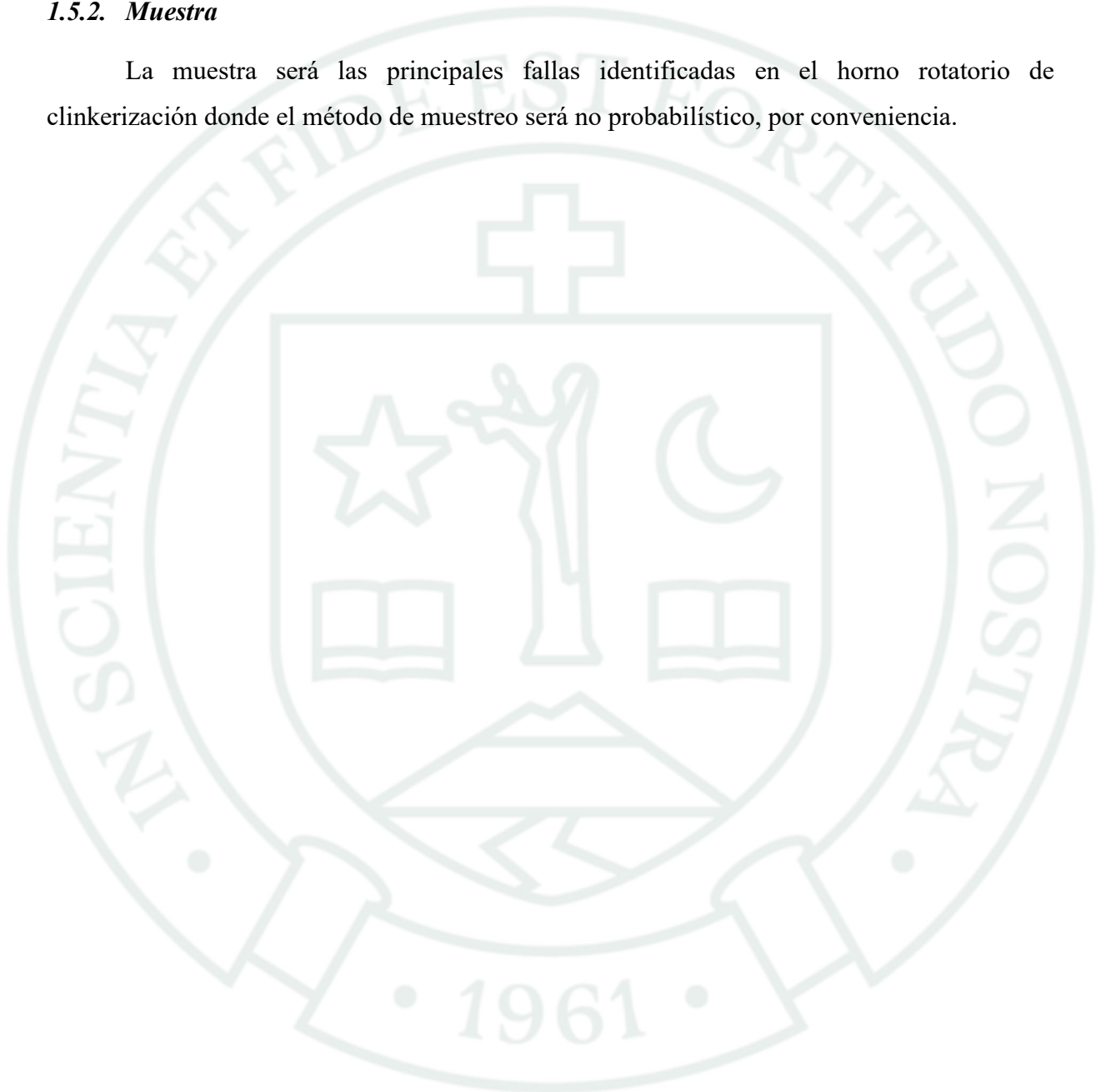
## **1.5. Población y muestra**

### ***1.5.1. Población***

La población será la cantidad de fallas en el horno rotatorio de clinkerización durante el año 2024 (46 fallas).

### ***1.5.2. Muestra***

La muestra será las principales fallas identificadas en el horno rotatorio de clinkerización donde el método de muestreo será no probabilístico, por conveniencia.



## 1.6. Matriz de consistencia

**Tabla 5**

*Matriz de consistencia*

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>¿Cómo desarrollar e implementar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú, y así poder optimizar su disponibilidad, confiabilidad, eficiencia operativa y reducir los costos generados por los mantenimientos realizados?</li> </ul>	<p><b>Objetivo general</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollar e implementar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el horno de clinkerización en una cementera del Perú, así poder optimizar su disponibilidad, confiabilidad, eficiencia operativa y poder reducir los costos generados por los mantenimientos realizados</li> </ul> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>O1: Identificar y definir las funciones y</li> </ul>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La implementación de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú incrementará notablemente su disponibilidad, confiabilidad, eficiencia operativa y a la vez logrará disminuir los costos de mantenimiento</li> </ul> <p><b>Hipótesis específicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>H1: La identificación y definición de las funciones y fallas funcionales del horno de clinkerización en una Cementera del Perú,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable Dependiente: Valores obtenidos de los indicadores operativos del horno rotatorio de clinkerización, posterior a la implementación del RCM.</li> <li>Variable Independiente: Desarrollo un modelo de gestión de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disponibilidad Operativa.</li> <li>MTTR (Tiempo Medio para la Reparación)</li> <li>Costo de Mantenimiento Correctivo</li> <li>MTBF (Tiempo Medio entre Fallas)</li> <li>PRI (Rendimiento)</li> <li>NAI (Nivel de Aprovechamiento Interno)</li> <li>OEE (Eficiencia General)</li> <li>Análisis de criticidad ABC</li> </ul>	<p><b>Método de Investigación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mixto</li> </ul> <p><b>Tipo de Investigación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicada</li> </ul> <p><b>Población</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2024 = 46 fallas</li> </ul> <p><b>Muestra</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Técnica de muestreo no probabilístico, por conveniencia</li> </ul> <p><b>Técnicas de investigación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Observación</li> <li>Revisión documentaria</li> </ul> <p><b>Instrumentos de recopilación de datos</b></p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo identificar y definir las funciones y fallas funcionales del Horno de clinkerización en una cementera del Perú?</li> <li>• ¿De qué forma se identifican los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú?</li> <li>• ¿Cómo se realiza la selección de estrategias de mantenimiento más apropiado para eliminar o disminuir los modos de falla críticos?</li> <li>• ¿De qué forma se puede elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el Horno de clinkerización</li> </ul>	<p>fallas funcionales del Horno de clinkerización en una cementera del Perú.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O2: Identificar los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú.</li> <li>• O3: Seleccionar las estrategias de mantenimiento más apropiado para eliminar o disminuir los modos de falla críticos.</li> <li>• O4: Elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el Horno de clinkerización de una cementera del Perú.</li> <li>• O5: Plantear un procedimiento de</li> </ul>	<p>logrará determinar un entendimiento del comportamiento operativo del equipo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• H2: La identificación de los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú, encaminará las tareas de mantenimiento hacia los sistemas de mayor riesgo.</li> <li>• H3: La selección de las estrategias de mantenimiento más apropiado logrará eliminar o disminuir los modos de falla críticos.</li> <li>• H4: El elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el Horno de clinkerización de una cementera del Perú, logrará una correcta</li> </ul>	<p>mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenimiento predictivo</li> <li>• Modelamiento</li> <li>• Reingeniería</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato de registro de fallas de los equipos</li> <li>• Ficha de observación de horno rotativo de clinkerización</li> </ul>
---	---	---	---	--

---

<p>de una cementera del Perú?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo puedo plantear un procedimiento de implementación y evaluación continua del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad en un horno de clinkerización de una cementera del Perú en lo referente a la disponibilidad, confiabilidad y costos de mantenimiento?</li> </ul>	<p>implementación y evaluación continua del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad en un Horno de clinkerización de una cementera del Perú en lo referente a disponibilidad, confiabilidad y costos de mantenimiento.</p>	<p>distribución de recursos y cálculo de tiempos de cumplimiento de tareas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• H5: El plantear un procedimiento de implementación y evaluación continúa del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad en un Horno de clinkerización de una cementera del Perú generará una mejora en el porcentaje de disponibilidad, de confiabilidad y una reducción de los costos de mantenimiento.</li> </ul>
---	--	---

---

Nota. Elaboración propia.

## **1.7. Técnica de procesamiento y análisis de datos**

Para el procesamiento y análisis de los datos, se validarán los instrumentos para ambas variables mediante la evaluación de los expertos. Después de esta validación, se llevará un registro de fallas, tiempos e indicadores de mantenimiento. Los datos recolectados serán tabulados utilizando herramientas tecnológicas como Excel 2016. Esta medición está validada por la metodología RCM. Posteriormente, se realizará un análisis para presentar los resultados en tablas y gráficos de barra.

## **1.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **1.8.1. Técnica**

La técnica de recolección de datos, serán de acuerdo al proyecto:

- Revisión documentaria (Estudio de base de datos histórica de fallas del equipo, recaudada por un especialista en manejo del sistema de seguimiento).
- Observación

### **1.8.2. Instrumentos**

Dentro de los instrumentos de recolección de datos tenemos:

- Formato de registro de fallas de los equipos
- Ficha de observación de horno rotativo de clinkerización

**Tabla 6***Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad*

<b>Datos</b>	<b>Técnica de recolección de datos</b>	<b>Instrumento de recolección de datos</b>	<b>Validación</b>
Indicadores de mantenimiento	Estudio del histórico de fallas del equipo.	Formato de registro de fallas de equipos	Expertos
Análisis de criticidad de equipos y sistemas	Estudio de fallas en los equipos	Formato de registro de fallas de equipos Análisis de criticidad (Probabilidad, Pareto, otros)	Expertos
Análisis de modo de falla y equipos críticos	Revisión histórica de fallas	Formato AMEF y de decisión	Expertos

*Nota.* Elaboración propia.



### **CAPÍTULO III**

## 1. Resultados

### 1.1. Desarrollar e implementar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el horno rotatorio de clinkerización

Se realizará una breve teoría donde indicamos la forma de conformación del equipo de trabajo para la aplicación de la metodología RCM. Posterior a ello, se brindará una breve descripción de algunas características técnicas propias del horno rotatorio de clinkerización, que se adicionará a la realizada en el marco teórico del presente documento, adicionalmente, se analizará la condición actual en la que se viene dando su desarrollo y comportamiento y se examinará a detalle, cada uno de los sistemas que lo conforman en relación a las fallas presentes, para poder determinar a cuál de estos, se le debe de poner mayor atención dada su criticidad.

#### 1.1.1. Implementación de un modelo de Gestión de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

La empresa cementera del Perú busca implementar estrategias de mantenimiento para abordar las fallas del horno rotativo de clinkerización, motivada por el impacto que estas fallas tienen en el tiempo y los costos de producción. La adopción de la metodología RCM (Reliability-Centered Maintenance) trabaja el proyecto de mejora en el horno de clinkerización, buscando centrar la aplicación de prácticas de mantenimiento basada en la criticidad de los equipos, mediante la evaluación de los modos de falla para evitar que la anomalía se produzca, interviniendo el equipo con anticipación.

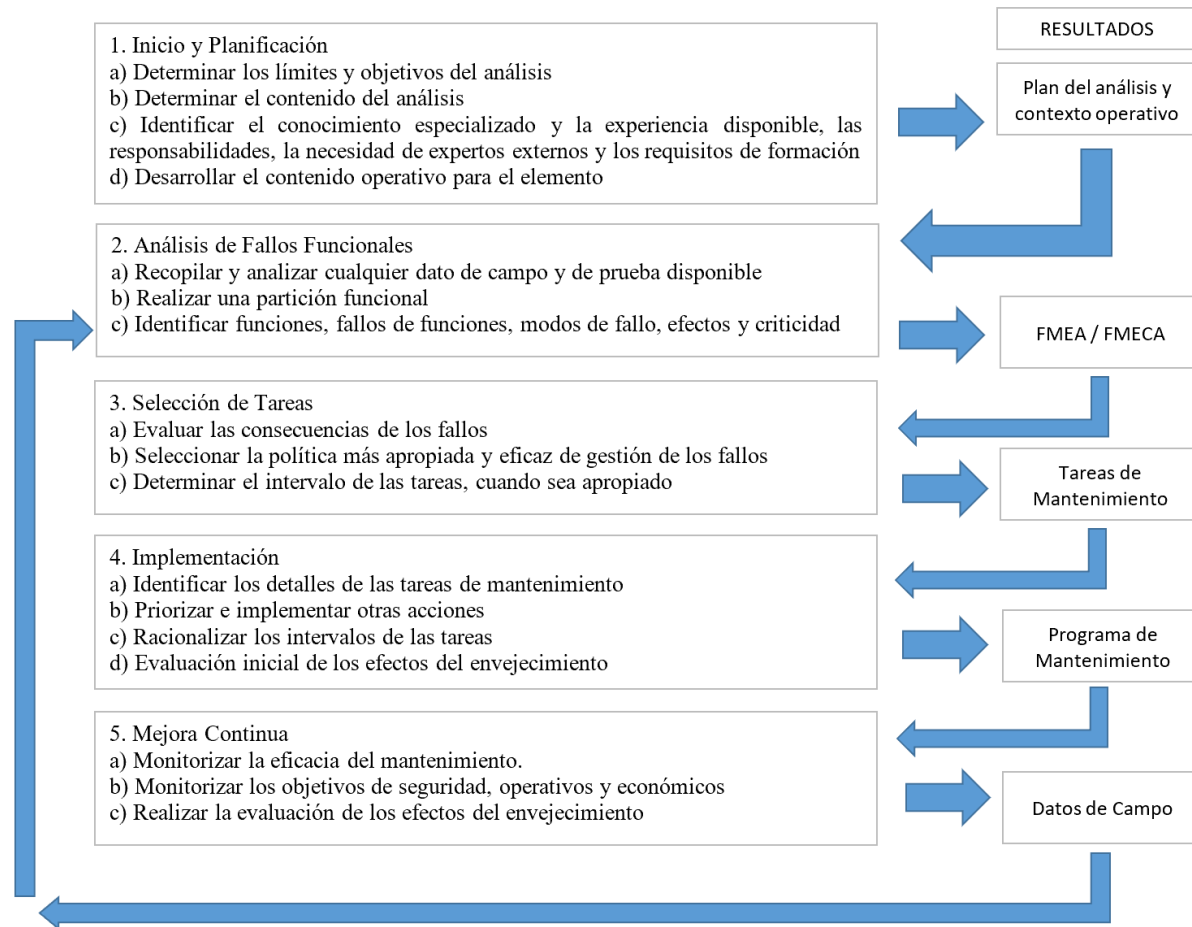
#### 1.1.2. Para la implementación del RCM

Se requieren implementar las siguientes etapas:

- Determinación del equipo responsable de mantenimiento
- Selección del equipo
- Definición de las funciones
- Definición de las fallas funcionales
- Identificación de los modos de falla
- Identificación de efectos de falla
- Identificación de consecuencias de falla
- Determinación de tareas de mantenimiento
- Generar el plan de mantenimiento

**Figura 20**

*Etapas de implementación del RCM*



*Nota.* (Terotecnic, 2013).

Durante esta fase inicial, se constituyó un equipo de trabajo multidisciplinario, cuya función principal fue definir y clasificar los objetivos y el alcance del análisis. Además, establecieron los criterios de aceptación en relación con la criticidad de los activos que requieren mantenimiento. También se aseguraron de que las políticas de seguridad y medio ambiente de la empresa, fueran considerados en la implementación del plan de mantenimiento basado en confiabilidad.

Este equipo, caracterizado por su enfoque proactivo, incluyó profesionales de los departamentos de mantenimiento, operaciones y, cuando fue necesario, especialistas en áreas específicas.

El equipo responsable está conformado de la siguiente manera:

- Líder de equipo
- Técnico mecánico – Especialista de Mtto Mecánico (2)
- Técnico eléctrico – Especialista de Mtto Eléctrico (2)
- Operador de Campo (2)
- Especialista de Operaciones (2)
- Planificador

Primero: Se estableció la definición del equipo natural de trabajo utilizando el análisis FODA. Las reuniones correspondientes se llevaron a cabo en la sala de conferencias del edificio de mantenimiento. En estas sesiones participaron la Gerencia de Operaciones y la Gerencia de Mantenimiento.

Segundo: Se llevó a cabo la selección del sistema piloto y la elaboración del plan de trabajo, enfocados en la evaluación de la criticidad desde el enfoque del riesgo. Las reuniones se desarrollaron en la sala de conferencias del edificio de mantenimiento, entre las 4 y 6 p.m.

Tercero: Se realizó la definición del contexto operacional del sistema piloto, donde se presentó un resumen operativo que incluyó el propósito del sistema, la descripción de los equipos involucrados, el detalle del proceso, y los dispositivos de seguridad asociados.

**1.1.3. Plan de actividades - estrategias de mantenimiento basadas en la confiabilidad (RCM) para el horno rotatorio de clinkerización**

En la Tabla 7 se da a conocer el desarrollo de la Planificación de actividades de la implementación RCM.

**Tabla 7**

*Plan de actividades - estrategias de mantenimiento RCM para el horno rotatorio de clinkerización*

<b>Planificación de actividades de la implementación RCM</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Metodología</b>	<b>Ubicación de la ejecución</b>	<b>Responsable</b>
Designación del equipo de trabajo	FODA al grupo de trabajo	Instalaciones de la empresa	Gerencia de operaciones y de mantenimiento
Definición de objetivos para la implementación	Definir metas e indicadores	Instalaciones de la empresa	Equipo de trabajo y personal de mantenimiento
Análisis de modos y efectos de fallas	Análisis de modos y efectos de falla para determinar funciones	horno rotativo de clinkerización	Equipo de trabajo y personal de mantenimiento
Aplicación de decisiones en actividades de mantenimiento	Árbol de decisiones de la metodología RCM, en el proceso de clinkerización.	Instalaciones de la empresa	Equipo de trabajo y personal de mantenimiento.
Monitoreo del plan de implementación RCM	Comparación del diagnóstico inicial con los resultados.	Instalaciones de la empresa	Equipo de trabajo y personal de mantenimiento

*Nota.* (Hidalgo, 2020).

#### 1.1.4. Descripción técnica del horno rotativo de clinkerización

Se presenta la tabla de datos específicos del horno de clinkerización y adicionalmente a ello, indicar que la capacidad de producción que presenta, es de aproximadamente 200 TPH y de 4800 TPD, de producción de Clinker.

**Tabla 8**

Tabla de datos del horno de clinkerización

<b>Datos del horno</b>	
Fabricante / Modelo de horno	FLSMIDTH
Tamaño del horno (Diámetro x Longitud)	5 mts X 65 mts
Número de estaciones	2
Dispositivo guía	Rodillo en estación 2
Inclinación	3.50%
Puesta en marcha del horno	2013
Rotación del horno	3.7 RPM
Dirección de rotación *	Horario

*Nota.* (Condezo, 2017).

La dirección de rotación se determina a partir de la salida del horno hacia la entrada, es decir, contra la dirección del flujo del material.

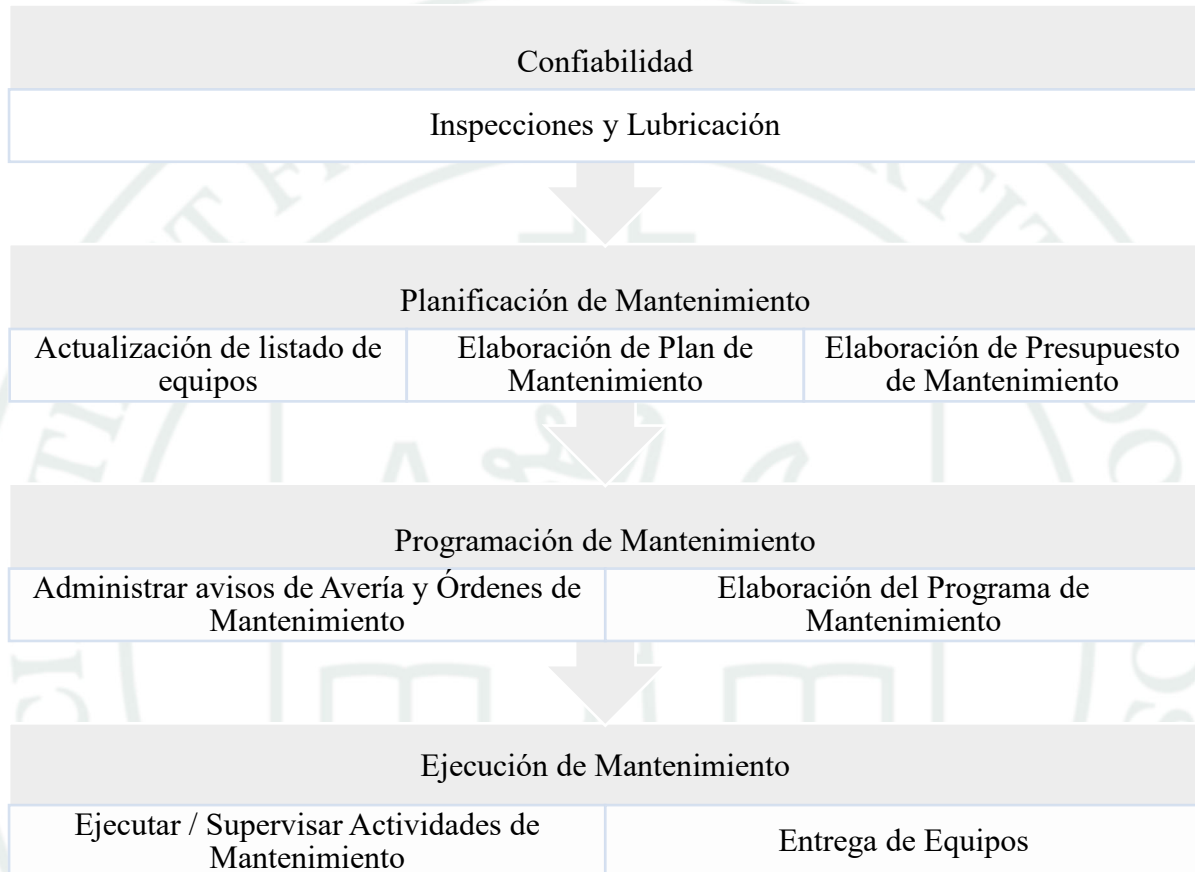
#### 1.1.5. Ejecución del mantenimiento actual del horno rotativo de clinkerización

La ejecución del mantenimiento consiste en realizar tareas predictivas, preventivas y correctivas en los equipos clave, registrando todas las acciones llevadas a cabo. Esto facilita el seguimiento y evaluación de la efectividad del mantenimiento, lo que contribuye a la mejora continua de los procesos. Actualmente, el proceso de mantenimiento se realiza de la siguiente manera: El operador de campo del área de horno, realiza inspecciones diarias de verificación de trabajo de este equipo, si presenta alguna observación que requiera por motivo de una avería, ruido extraño o falta de limpieza, genera un “aviso de avería”. Es aquí donde inicia el proceso dentro del área de mantenimiento, este aviso es recepcionado por el personal de confiabilidad, quienes son los encargados de validar dichos avisos y darles una prioridad según sea el caso; posterior a ello, “programación” genera el plan de mantenimiento, con todos los recursos requeridos y para que sea atendido por personal de “ejecución”, quien, culminado el trabajo, procede a realizar el cierre de los “avisos”. Ya que el horno rotatorio de clinkerización trabaja

en un régimen de 24 horas x 7 días a la semana, los programas de mantenimiento, generalmente se realizan con el equipo en trabajo, por lo que dan énfasis en tareas de limpieza, revisión, y reparaciones de poca criticidad.

**Figura 21**

*Descripción del mantenimiento actual del horno rotativo de clinkerización*



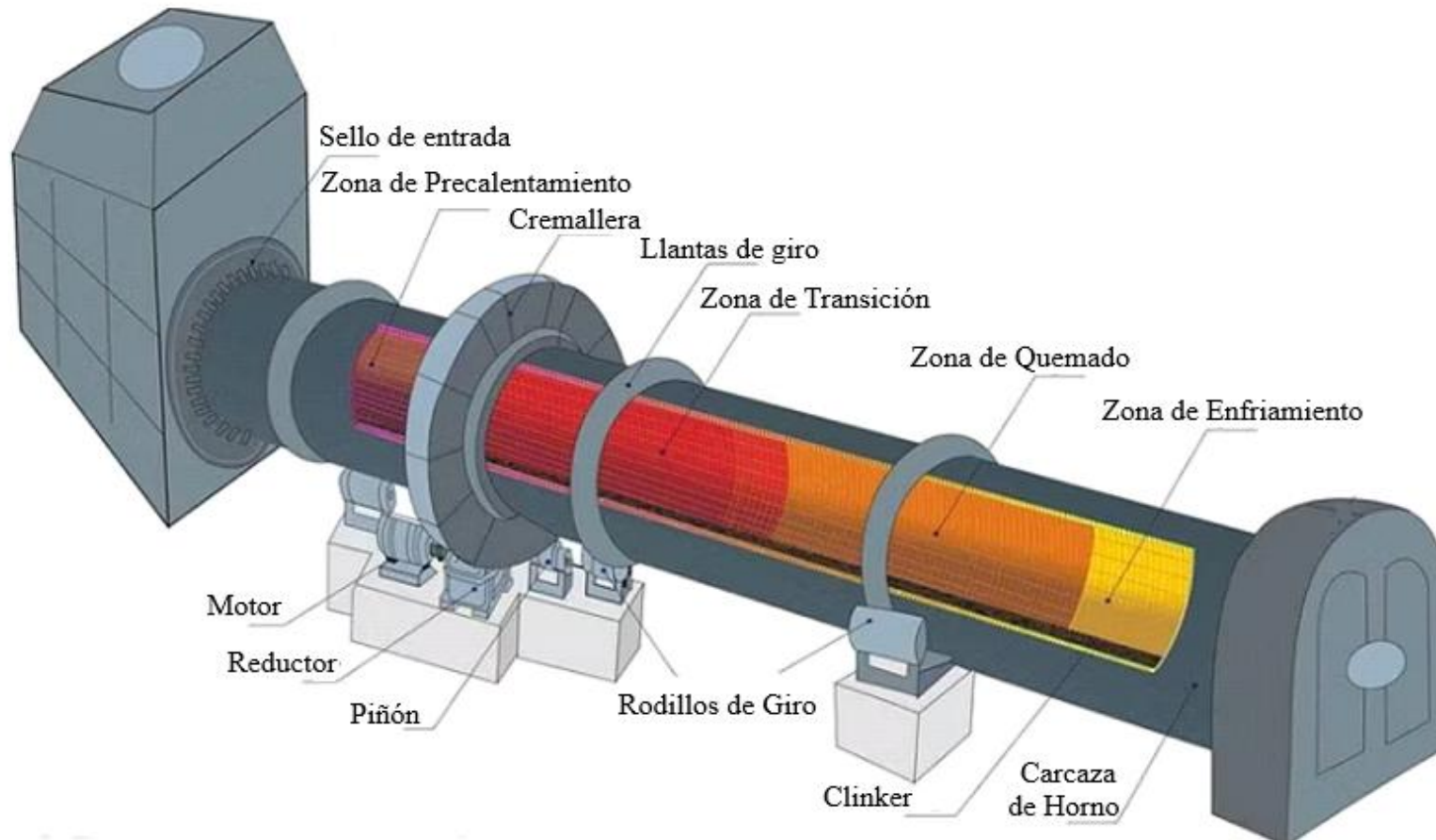
*Nota.* Elaboración propia.

**1.1.6. Determinación de sistemas y componentes del horno de clinkerización**

En este punto, dada la complejidad de este equipo, se sabe que involucra múltiples sistemas. Es por ello que se va a detallar la segmentación del horno rotatorio de clinkerización en cada uno de ellos y los componentes de los cuales están conformados, se entenderá que el horno es una entidad, compuesta por partes interdependientes que involucran netamente el Horno como activo físico.

**Figura 22**

*Identificación física de un horno rotatorio de clinkerización*



*Nota.* (Holcim Group Support, 2006).

**Tabla 9***Tabla de sistemas y componentes del horno de clinkerización*

EQUIPO	SISTEMAS	COMPONENTES
HORNO DE CLINKERIZACIÓN	DE TRANSMISIÓN	Motor
		Reductor
		Acople Motor- Reductor
		Árbol de Transmisión
		Piñón
		Corona
		Acople de Árbol
	DE CONTROL	Sensores de Vibración
		Indicadores de Posición
	DE EMPUJE AXIAL	Motor
		Bomba
		Tanque Hidráulico
		Válvulas de Apertura y Cierre
		Acumulador
		Pistón
	DE LUBRICACIÓN DE CREMALLERA	Rodillo de Retención
		Motor
		Bomba
		Válvulas
		Inyectores – Toberas
	DE INYECCIÓN DE CARBÓN	Quemador
		Ventilador Primario
DE SOPORTE Y GIRO (SUJECCIÓN TANGENCIAL)	Válvulas	
	Rodillos Soporte	
	Llantas	
	Chumaceras	
	Cuñas	
	Resortes	
DE SELLO DE ENTRADA	Babits	
	Laminillas	
DE SELLO DE SALIDA	Cable de Seguridad	
	Laminillas	
		Cable de Seguridad

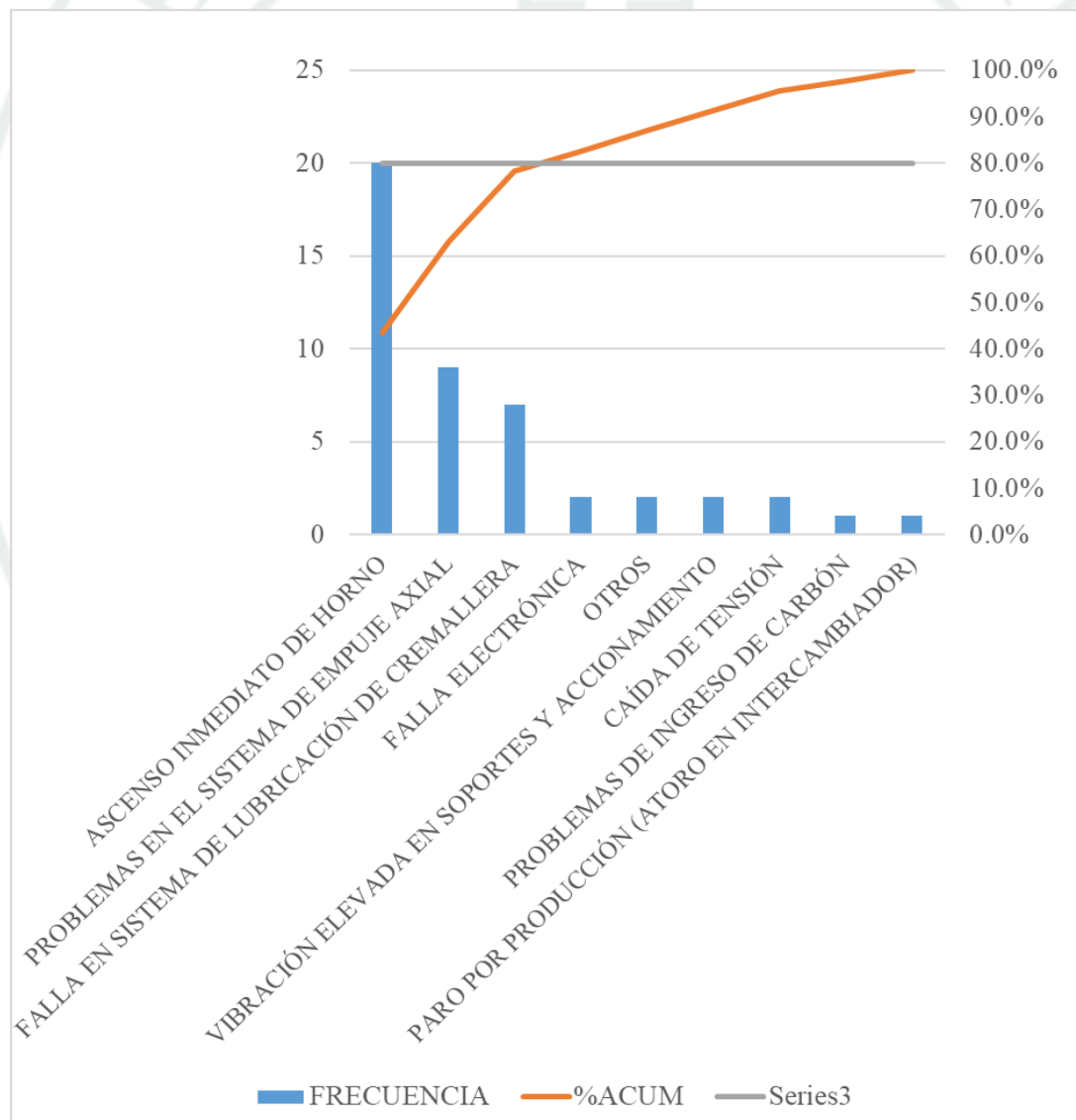
*Nota.* Elaboración propia.

### 1.1.7. Determinación de criticidad de los sistemas y componentes del proceso de clinkerización.

Ya identificados los sistemas y componentes del horno rotatorio, se prosigue a determinar su criticidad, ya que no todos los elementos del equipo, poseen el mismo impacto en su operación, la seguridad, medio ambiente y/o costos en caso de avería. Es por ello que se realizó un análisis más detallado de las fallas que se vienen dando en el horno y así poder determinar dicha criticidad según su condición actual de trabajo, tal y como se puede apreciar en la figura 23.

**Figura 23**

Porcentaje de fallas del horno de clinkerización



Nota. Elaboración propia.

Según el diagrama de Pareto de la figura 23, se logra analizar la condición de las fallas que han afectado al proceso de clinkerización de la empresa cementera durante el 2024. Se logró determinar que los principales motivos de paro del proceso y por ende las razones por las cuales se ha generado un mayor impacto sobre la disponibilidad, confiabilidad y costos generados en el equipo, son: el Ascenso Inmediato del horno, problemas en el sistema de empuje axial y las fallas en el sistema de lubricación.

Es por esta razón que, dadas estas condiciones, el equipo evaluador brindará mayores calificaciones a los componentes que comprometen la ocurrencia de dichas fallas.

Para ello, se hace imprescindible el uso de las tablas de severidad y una matriz de criticidad adaptada para nuestra tesis referente al horno rotativo de Clinkerización.

Para poder realizar la calificación de la criticidad, se tomará en consideración los valores otorgados en las siguientes variables:

- Probabilidad de falla
- Impacto operacional
- Impacto en seguridad
- Tiempo de la falla operacional
- Costo de falla

Posterior a la evaluación realizada por el equipo de trabajo, se determinará cuáles de ellas, poseen una mayor calificación, lo que nos permitirá determinar según su criticidad, a cuál de ellas priorizar su desarrollo y respectivo análisis.

Considerar que, para el desarrollo de esta sección, se aplicará una combinación de teorías, como son las de Gestión de riesgos, probabilidad de falla y severidad de sus consecuencias en los distintos ámbitos, teoría de confiabilidad y adicionalmente, es necesario indicar que las valoraciones brindadas a cada una de las variables han sido dadas según criterio del grupo de trabajo y posteriormente comparadas con la Matriz de determinación de riesgo. Tabla 10 y Figura 24.

Para que el equipo pueda realizar una correcta calificación a cada uno de los componentes, se realizó un análisis exhaustivo de la situación actual del horno rotativo de Clinkerización.

Con base en la metodología RCM, se han desarrollado tablas de severidad y criticidad, que permiten calcular un índice para cada modo de falla identificado. Luego, mediante una matriz de criticidad de 5 x 5, se clasificaron en categorías de riesgo, de forma que se prioricen las atenciones.

**Tabla 10**

*Tabla de severidad y criticidad*

Probabilidad de Falla	Impacto Operacional	Impacto en Seguridad	Tiempo de Falla	Costo de Falla
0	< 1 Falla al año	No origina ningún impacto	0 < 0.5 horas	0 0
1	1 o 2 fallas al año	Se reduce la capacidad del proceso	1 < 1 hora	1 < 42 000
3	< 5 fallas al año	Parada del sistema con repercusión	3 < 3 horas	> 42 000 3 < 1 000 0000
4	< 10 fallas al año	Parada inmediata de la línea	4 < 8 horas	4
5	> 10 fallas al año	Parada inmediata de la planta	5 > 8 horas	5 > 1 000 000

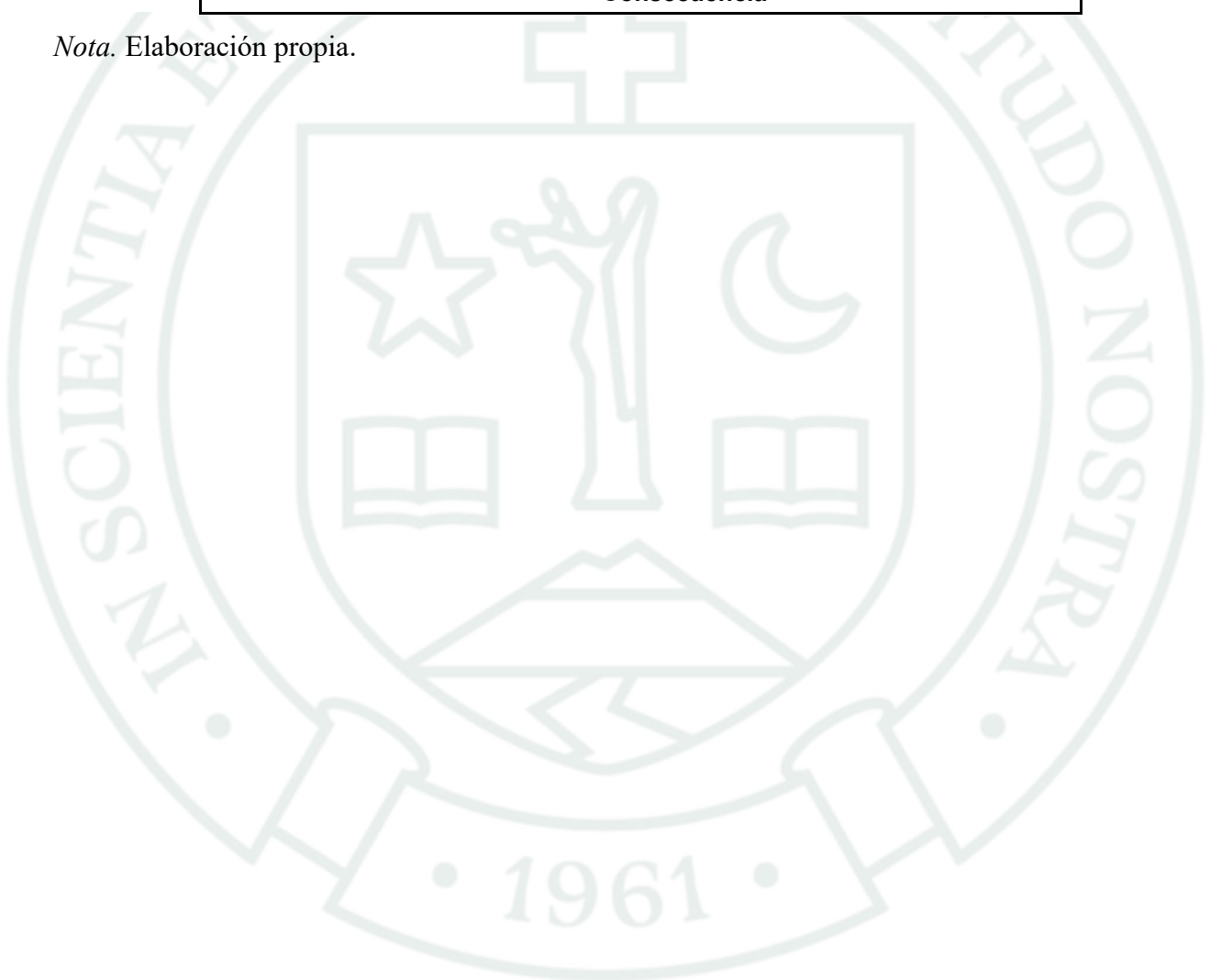
*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 24**

*Matriz de determinación de riesgo*

<b>Frecuencia</b>	<b>5</b>	B	B	A	A	A
	<b>4</b>	B	B	A	A	A
	<b>3</b>	C	B	B	A	A
	<b>2</b>	C	C	B	B	A
	<b>1</b>	C	C	C	B	B
	<b>0</b>	C	C	C	C	C
		<b>1</b> 0 a 3	<b>2</b> 04 a 06	<b>3</b> 07 a 08	<b>4</b> 09 a 10	<b>5</b> 11 a 12
<b>Consecuencia</b>						

*Nota.* Elaboración propia.



### 1.1.8. Cuadro de equipos críticos

**Tabla 11**

Resultado de criticidad de sistemas y componentes

PROCESOS	CÓDIGO	COMPONENTES	Probabilidad de Falla (P)	25%	25%	25%	25%	Consecuencia (C)	Jerarquía (S) (PxC)	Criticidad
				Impacto Operacional	Impacto en Seguridad y Medio Ambiente	Tiempo de Falla	Costo de Pérdidas			
DE TRANSMISIÓN	.3-3630-1A	MOTOR	1	4	0	5	2	11	11	B
	L3-3630-1B	REDUCTOR	1	4	0	5	2	11	11	B
	L3-3630-1C	ACOPLE MOTOR – REDUCTOR	0	4	0	5	1	10	0	C
	L3-3630-1D	ÁRBOL DE TRANSMISIÓN	0	4	0	5	1	10	0	C
	L3-3630-1E	PIÑÓN	0	4	0	5	2	11	0	C
	L3-3630-1F	CORONA	0	4	0	5	2	11	0	C
	L3-3630-1G	ACOPLE DE ÁRBOL	0	4	0	5	1	10	0	C
	L3-3630-1H	CHUMACERAS	1	3	0	5	2	10	10	B
DE CONTROL	X	SENSORES DE VIBRACIÓN	3	1	0	0	0	1	3	C
	X	INDICADORES DE POSICIÓN	5	4	0	0	0	4	20	B
DE EMPUJE AXIAL	L3-3633-1	MOTOR	5	4	0	3	1	8	40	A
	L3-3633-2	BOMBA	5	4	0	3	1	8	40	A
	X	TANQUE HIDRÁULICO	0	1	1	5	1	8	0	C
	X	VÁLVULAS DE APERTURA Y CIERRE	5	3	1	3	1	8	40	A
	X	ACUMULADOR	0	0	1	1	0	2	0	C
	X	PISTÓN	5	3	1	5	2	11	55	A
	X	RODILLO DE RETENCIÓN	5	3	1	5	2	11	55	A
	L3-3632-1	MOTOR	5	3	0	3	1	7	35	A

	L3-3632-2	BOMBA	5	3	0	3	1	7	35	A
	X	VÁLVULAS	5	3	1	3	1	8	40	A
	X	INYECTORES – TOBERAS	5	3	1	3	1	8	40	A
DE INYECCIÓN DE CARBÓN	L3-3640	QUEMADOR	1	4	0	5	2	11	11	B
	L3-3642	VENTILADOR PRIMARIO	1	4	0	5	2	11	11	B
	X	VÁLVULAS	1	3	1	3	0	7	7	C
DE SOPORTE Y GIRO (SUJECIÓN TANGENCIAL)	L3-3631-A-D	RODILLOS SOPORTE	5	4	0	5	2	11	55	A
	L3-3631-E-F	LLANTA	0	4	0	5	2	11	0	C
	L3-3631-3631- G-N	CHUMACERAS	5	3	0	5	2	10	50	A
	X	CUÑAS	0	0	0	5	0	5	0	C
	X	RESORTES	0	0	0	0	0	0	0	C
	X	BABITS	0	0	0	0	2	2	0	C
DE SELLO DE ENTRA DA	L3-3636	LAMINILLAS	0	0	0	0	1	1	0	C
	X	CABLE DE SEGURIDAD	0	0	0	0	0	0	0	C
DE SELLO DE SALIDA	L3-3637	LAMINILLAS	0	0	0	0	1	1	0	C
	X	CABLE DE SEGURIDAD	0	0	0	0	0	0	0	C

*Nota.* Elaboración propia.

Habiendo obtenido las valoraciones de cada uno de los componentes que integran cada sistema, se ha logrado identificar los que presentan mayor criticidad, teniendo como base la información previamente presentada sobre la situación actual del horno de clinkerización. Es así que, en el desarrollo de este documento, se centrará en ellos la investigación para poder cumplir con los objetivos establecidos.

**1.2. O1: Identificar y definir las funciones y fallas funcionales del horno rotatorio de clinkerización.**

**Tabla 12**

*Funciones primarias de los componentes críticos*

PROCESOS	CÓDIGO	COMPONENTES	COD. FUNC.	FUNCIÓN
DE EMPUJE AXIAL	L3-3633-1	MOTOR ELÉCTRICO	1	Brindar energía mecánica rotativa a la bomba de pistones axiales
	L3-3633-2	BOMBA HIDRÁULICA	2	Entregar al Sistema Hidráulico alta presión aproximada de 57 BAR
	X	VÁLVULAS DE APERTURA Y CIERRE	4	Regular y controlar el paso de aceite en el sistema (40 BAR)
	X	PISTÓN	6	Entregar presión de 40 BAR al rodillo de retención
	X	RODILLO DE RETENCIÓN	7	En contacto con la llanta, Impulsar al horno hacia la zona de carga desde la posición de -5mm a 5 mm
DE LUBRICACIÓN DE CREMALLERA			8	Acompañamiento al horno en su movimiento hacia la descarga (-5mm) en un lapso de 12 horas aproximadamente
	L3-3632-1	MOTOR	9	Brindar energía mecánica rotativa a la bomba de pistones radiales
	L3-3632-2	BOMBA	10	Entregar grasa al Sistema de Inyección a alta presión - 25 BAR
	X	VÁLVULAS	11	Regular el paso de grasa en el sistema
DE SOPORTE Y GIRO (SUJECIÓN TANGENCIAL)	X	INYECTORES	12	Permitir el paso de grasa con presión para lubricar el piñón / cremallera.
	L3-3631-A-D	RODILLOS SOPORTE	13	Servir de soporte y transmitir movimiento rotativo ascendente al horno
	L3-3631-G-N	CHUMACERAS	15	Soportar el peso del horno y su carga, permitiendo un ligero empuje hacia la zona de carga, según su posición.

*Nota.* Elaboración propia.

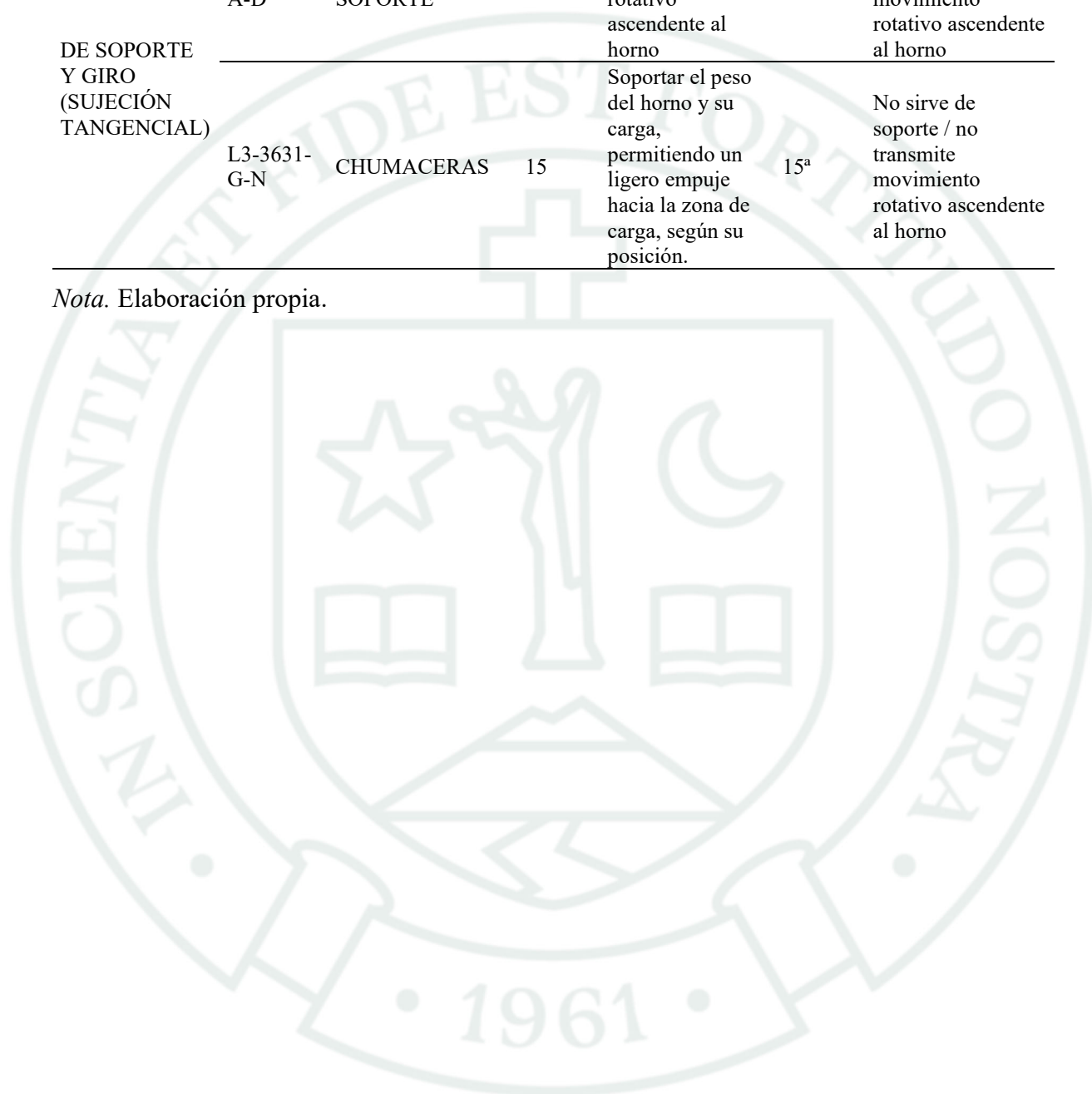
**Tabla 13**

*Fallas funcionales de los componentes críticos*

PROCESOS	CÓDIGO	COMPONENTES	COD. FUNC.	FUNCIÓN	COD. FALLA	FALLA FUNCIONAL TOTAL / PARCIAL
DE EMPUJE AXIAL	L3-3633-1	MOTOR ELÉCTRICO	1	Brindar energía mecánica rotativa a la bomba de pistones axiales	1 <sup>a</sup>	No brinda total o parcialmente energía mecánica a la bomba
	L3-3633-2	BOMBA HIDRÁULICA	2	Entregar al Sistema Hidráulico alta presión aproximada de 57 BAR	2 <sup>a</sup>	No entrega presión o entrega una presión menor a 57 BARES
	X	VÁLVULAS DE APERTURA Y CIERRE	4	Regular y controlar el paso de aceite en el sistema (40 BAR)	4 <sup>a</sup>	No regula ni controla el paso de aceite en el sistema
	X	PISTÓN	6	Entregar presión de 40 BAR al rodillo de retención	6 <sup>a</sup>	No entrega presión de 40 BAR al rodillo de retención
	X	RODILLO DE RETENCIÓN	7	En contacto con la llanta,	7 <sup>a</sup>	No tiene contacto con la llanta del Horno
				Impulsar al horno hacia la zona de carga desde la posición de -5mm a 5 mm	7B	No impulsa al horno en su movimiento hacia la zona de carga desde la posición de -5mm a 5 mm
	X	RODILLO DE RETENCIÓN	8	Acompañamiento al horno en su movimiento hacia la descarga (-5mm) en un lapso de 12 horas aproximadamente	8 <sup>a</sup>	No acompaña al horno en su movimiento hacia la zona de descarga
					8B	Acompaña al horno en su movimiento hacia la zona de descarga pero en menor tiempo
DE LUBRICACIÓN DE CREMALLERA	L3-3632-1	MOTOR	9	Brindar energía mecánica rotativa a la bomba de pistones radiales	9 <sup>a</sup>	No brinda energía mecánica rotativa a la bomba de pistones radiales
	L3-3632-2	BOMBA	10	Entregar grasa al Sistema de Inyección a alta presión - 25 BAR	10 <sup>a</sup>	No entrega grasa al Sistema de Inyección
	X	VÁLVULAS	11	Regular el paso de grasa en el sistema	11 <sup>a</sup>	No regula el paso de grasa en el sistema

	X	INYECTORES	12	Permitir el paso de grasa con presión para lubricar el piñón / cremallera.	12 <sup>a</sup>	No permite el paso de grasa pulverizada para una correcta lubricación
DE SOPORTE Y GIRO (SUJECIÓN TANGENCIAL)	L3-3631-A-D	RODILLOS SOPORTE	13	Servir de soporte y transmitir movimiento rotativo ascendente al horno	13 <sup>a</sup>	No sirve de soporte / no transmite movimiento rotativo ascendente al horno
	L3-3631-G-N	CHUMACERAS	15	Soportar el peso del horno y su carga, permitiendo un ligero empuje hacia la zona de carga, según su posición.	15 <sup>a</sup>	No sirve de soporte / no transmite movimiento rotativo ascendente al horno

*Nota.* Elaboración propia.



### 1.3. O2: Identificar los principales modos y mecanismos de falla en el horno rotatorio de clinkerización.

Hablar de los modos y mecanismos de falla, es referirse al método de falla de un componente, como las causas que pueden provocar las fallas funcionales anteriormente identificadas. Es necesario que este paso se realice de una forma correcta y detallada, ya que es con ello que se podrán implementar acciones adecuadas para su tratamiento. Será de vital importancia, la experiencia y conocimiento técnico del personal que participa en la realización del RCM, los registros históricos de falla y los manuales del fabricante. Se va a tratar de llegar al fondo de cada uno de los modos y efectos de falla.

**Tabla 14**

*Modos y efectos de falla de los componentes críticos*

PROCESOS	CÓDIGO	COMPONENTES	COD. FUNC.	COD. FALLA	MODOS DE FALLA	EFFECTO DE FALLA
DE EMPUJE AXIAL	L3-3633-1	MOTOR ELÉCTRICO	1	1 <sup>a</sup>	1 Errada conexión eléctrica (bobina quemada) 2 Falla en una de las fases (menos potencia y giro / se quema) 3 Recalentamiento de terminales (Falso Contacto) 4 Falla en rodamientos	Paro del motor eléctrico, no transmite movimiento
	L3-3633-2	BOMBA HIDRÁULICA	2	2 <sup>a</sup>	1 Dirección incorrecta del giro de rotación 2 Falla en el acoplamiento con motor 3 Falla en la válvula de alivio (calibración) 4 Válvulas de paso completamente cerradas 5 Filtro de succión completamente saturado 6 Nivel de aceite es demasiado bajo 7 Pérdida de eficiencia de la bomba 8 Pérdidas o degradación de aceite en el sistema	La bomba no genera presión de trabajo

					1 Pérdida de eficiencia de la válvula	Debido a la contaminación del aceite o del sistema, generó un desgaste en la zona de cierre, por donde el aceite pasa sin necesidad de ser regulado.
X		VÁLVULAS DE APERTURA Y CIERRE	4	4 <sup>a</sup>	2 Se encuentra trabada con algún elemento ajeno	Debido a la contaminación del aceite o del sistema, generó que un elemento extraño trabe la zona de cierre, por donde el aceite pasa sin necesidad de ser regulado.
X		PISTÓN	6	6 <sup>a</sup>	1 Fuga de aceite por conectores 2 Falta de eficiencia de válvulas (hermeticidad) 3 Falta de hermeticidad entre cámaras del pistón – sellos	El pistón no logra extraer su vástago o lo hace sin ejercer la presión necesaria.
				7 <sup>a</sup>	1 El horno siempre se mantiene arriba (carga) debido a la errada posición de los rodillos 2 El horno presenta problemas con parámetros de operación	Se activa el límite máximo de posición del Horno y manda a parar el proceso
X		RODILLO DE RETENCIÓN		7		
				7B	1 El horno se mantiene en una sola posición de giro y no llega al límite inferior	No llega a activar el límite inferior para que se active la bomba para impulsar el pistón. Al trabajar en una sola posición genera un desgaste localizado en los rodillos y en el piñón.
				8 <sup>a</sup>	1 El horno siempre se mantiene arriba (carga) debido a la errada posición de los rodillos 2 El horno presenta problemas con parámetros de operación	Se activa el límite máximo de posición del horno y manda a parar el proceso
				8		
				8B	1 El horno siempre baja muy rápido (descarga) debido a la errada posición de los rodillos 2 Fuga de aceite por conectores, pistón o eficiencia de los mismos	Se activa constantemente el límite inferior y su ciclo se realiza en un tiempo mucho menor al recomendable.
DE LUBRICACIÓN DE CREMALLERA	L3-3632-1	MOTOR	9	9 <sup>a</sup>	1 Errada conexión eléctrica (bobina quemada) 2 Falta en una de las fases (menos potencia y giro / se quema) 3 Recalentamiento de terminales (Falso Contacto) 4 Falta en rodamientos	Paro del motor eléctrico, no transmite movimiento
		BOMBA	10	10 <sup>a</sup>	1 Dirección incorrecta del giro de rotación	La bomba no genera presión de trabajo

				2 Falla en el acoplamiento con motor	
				3 Falla en la válvula de alivio (calibración)	
				4 Válvulas de paso completamente cerradas	
				5 Filtro de succión completamente saturado	
				6 Nivel de grasa es demasiado bajo	
				7 Pérdida de eficiencia de la bomba	
				8 Pérdidas o degradación de grasa en el sistema	
					Debido a la contaminación del aceite o del sistema, generó un desgaste en la zona de cierre, por donde el aceite pasa sin necesidad de ser regulado.
X	VÁLVULAS	11	11 <sup>a</sup>	1 Pérdida de eficiencia de la válvula	
				2 Se encuentra trabada con algún elemento ajeno	Debido a la contaminación del aceite o del sistema, generó que un elemento extraño trabe la zona de cierre, por donde el aceite pasa sin necesidad de ser regulado.
X	INYECTORES	12	12 <sup>a</sup>	1 No ingresa suficiente presión de aire	No permite el ingreso de grasa pulverizada sobre el piñón y cremallera
				2 Boquillas tapadas por material ajeno	No se obtiene la cantidad de grasa necesaria para realizar la lubricación de la cremallera y piñón.
				1 Los rodillos ejercen excesiva presión a la carga	No llega a activar el límite inferior para que se active la bomba para impulsar el pistón. Al trabajar en una sola posición genera un desgaste localizado en los rodillos y en el piñón.
L3-3631-A-D	RODILLOS SOPORTE	13	13 <sup>a</sup>		
				2 Los rodillos ejercen presión hacia la descarga	Se activa constantemente el límite inferior y su ciclo se realiza en un tiempo mucho menor al recomendable.
				1 Las chumaceras ejercen excesiva presión a la carga	No llega a activar el límite inferior para que se active la bomba para impulsar el pistón. Al trabajar en una sola posición genera un desgaste localizado en los rodillos y en el piñón.
L3-3631-G-N	CHUMACERAS	15	15 <sup>a</sup>		
				2 Las chumaceras ejercen presión hacia la descarga	Se activa constantemente el límite inferior y su ciclo se realiza en un tiempo mucho menor al recomendable.

Nota. Elaboración propia.

#### 1.4. O3: Seleccionar las estrategias de mantenimiento más apropiado para eliminar o disminuir los modos de falla críticos.

La metodología RCM dirige la selección de la estrategia más adecuada para cada modo de falla identificado, dentro de las cuales se pueden destacar el mantenimiento basado en la condición (predictivo), mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, rediseño u cambio de operación. Esta selección se realiza respetando frecuencias lógicas y optimizando los recursos. Árbol lógico de decisión – Anexo 4

**Tabla 15**

*Acciones requeridas para la atención de los modos de falla*

PROCESOS	CÓDIGO	COMPONENTES	COD. FUNC.	COD. FALLA	MODOS DE FALLA	ACCIÓN REQUERIDA
DE EMPUJE AXIAL	L3-3633-1	MOTOR ELÉCTRICO	1	1 <sup>a</sup>	1 Errada conexión eléctrica (bobina quemada)	Requiere cambio del motor eléctrico por motor en espera. El cambio del motor le lleva 2 horas a 2 eléctricos. La reparación del bobinado toma 3 días con un contratista especializado.
					2 Falla en una de las fases (menos potencia y giro / se quema)	Requiere cambio del motor eléctrico por motor en espera. El cambio del motor le lleva 2 horas a 2 eléctricos. La reparación del bobinado toma 3 días con un contratista especializado.
					3 Recalentamiento de terminales (Falso Contacto)	Requiere revisión y limpieza de contactos y terminales. La tarea la realiza 2 eléctricos en 2 horas
					4 Falla en rodamientos	Requiere cambio del motor eléctrico por motor en espera. El cambio del motor le lleva 2 horas a 2 eléctricos. La reparación del motor toma 6 horas con un contratista especializado.
	L3-3633-2	BOMBA HIDRÁULICA	2	2 <sup>a</sup>	1 Dirección incorrecta del giro de rotación	Se realiza una inspección general por parte del mecánico en la bomba y en el motor (sentido de rotación). Se requiere 1 mecánico y 1 eléctrico para la tarea y el tiempo utilizado es de 20 min.

2	Falla en el acoplamiento con motor	Se necesita hacer una inspección del acople, motor y en hacer una revisión de posibles fallas en el mismo. Posible cambio del motor dependiendo de lo analizado y encontrado. Se requiere a 2 eléctricos y el tiempo utilizado es de 2 horas.
3	Falla en la válvula de alivio (calibración)	Se requiere primero realización de pruebas con la válvula y en caso de presentar falla interna se realizará el cambio de válvula por una en stand by, mientras que la que presenta falla entra en reparación si es posible realizarlo, en caso contrario la válvula se desecha. Se Necesita 1 personal mecánico, y para el cambio se utiliza 30 minutos y para la reparación de la misma, 1 hora.
4	Válvulas de paso completamente cerradas	El mecánico tendrá que realizar una inspección de paso de flujo por las válvulas que puedan cerrar la continuidad de flujo. Se requiere de 1 personal mecánico y el tiempo requerido es de 15 minutos.
5	Filtro de succión completamente saturado	Se necesita lavar el filtro y si esta operación ya se realizó con continuidad anterior, se prefiere realizar el cambio directo de filtro. Se requiere 1 personal mecánico, para la tarea de lavado se necesita 1.25 horas y para el caso de cambio de filtro 45 minutos.
6	Nivel de aceite es demasiado bajo	El lubricador dentro de su ruta de inspección diaria, tiene que revisar el nivel de aceite existente en la centralita. En caso de ser bajo, se rellena con aceite. Se requiere de 2 personas de lubricación y el tiempo requerido es de 40 min. Dependiendo de la cantidad faltante de aceite.
7	Pérdida de eficiencia de la bomba	Se requiere el cambio directo de la bomba, para que esta entre en posible reparación. Se requiere de 1 personal mecánico para la tarea y el tiempo de cambio es de 2 horas, fuera del tiempo de reparación en taller de la dañada.

			8 Pérdidas de aceite en el sistema	El mecánico debe realizar una inspección de toda la ruta de fluido del aceite, determinar las fugas, hermetizar dichas conexiones, cambio de retenes de la bomba misma. Para ello se requiere de 1 personal mecánico y el tiempo de trabajo es de 1.25 horas.	
X	VÁLVULAS DE APERTURA Y CIERRE	4	4 <sup>a</sup>	<p>1 Pérdida de eficiencia de la válvula</p> <hr/> <p>2 Se encuentra trabada con algún elemento ajeno</p>	<p>Se realiza el cambio total de la válvula por una nueva, posteriormente se regula conforme a la necesidad requerida; la válvula cambiada ya no se puede reparar. Se requiere de 1 mecánico y el tiempo requerido para la tarea es de 30 min.</p> <hr/> <p>Se requiere realizar el cambio de la válvula por una nueva, posteriormente se regula conforme a la necesidad requerida. La válvula cambiada entra a reparación o limpieza. Se requiere de 2 mecánicos para el cambio en un tiempo de 30 min y para el mantenimiento y limpieza se requiere un tiempo de 3 horas</p>
X	PISTÓN	6	6 <sup>a</sup>	<p>1 Fuga de aceite por conectores</p> <hr/> <p>2 Falta de eficiencia de válvulas (hermeticidad)</p>	<p>El mecánico debe realizar una inspección de toda la ruta de fluido del aceite, determinar las fugas, hermetizar dichas conexiones, cambio de retenes de la bomba misma. Para ello se requiere de 1 personal mecánico y el tiempo de trabajo es de 1.25 horas.</p> <hr/> <p>Se requiere primero realización de pruebas con la válvula y en caso de presentar falla interna se realizará el cambio de válvula por una en stand by, mientras que la que presenta falla entra en reparación si es posible realizarlo, en caso contrario la válvula se desecha. Se Necesita 1 personal mecánico, y para el cambio se utiliza 30 minutos y para la reparación de la misma, 3 horas.</p>

		3	Falla de hermeticidad entre cámaras del pistón	Se requiere realizar primero pruebas de cierre y hermetizado de las cámaras del pistón, en caso se requiere su cambio se debe de programar. Se necesita 2 personas en un tiempo de 12 horas aproximadamente para las pruebas y 4 personas y 8 horas para realizar su cambio.
		1	El horno siempre se mantiene arriba (carga) debido a la errada posición de los rodillos	Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta excesiva presión de empuje. Este trabajo se debe programar con asesoramiento de un técnico especialista. Se debe realizar movimientos y análisis durante 7 días aproximadamente.
	7	2	El horno presenta problemas con parámetros de operación	Se requiere realizar una revisión de los parámetros y sus tendencias para ser comparadas desde el momento en que se inició la anomalía. Se requiere realizar análisis por parte de los operadores de sala de control.
X	RODILLO DE RETENCIÓN	7B	1 El horno se mantiene en una sola posición de giro y no llega al límite inferior	Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta excesiva presión de empuje. Se requiere realizar una revisión de los parámetros y sus tendencias para ser comparadas desde el momento en que se inició la anomalía.
		1	El horno siempre se mantiene arriba (carga) debido a la errada posición de los rodillos	Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta excesiva presión de empuje. Este trabajo se debe programar con asesoramiento de un técnico especialista. Se debe realizar movimientos y análisis durante 7 días aproximadamente.
	8	2	El horno presenta problemas con parámetros de operación	Se requiere realizar una revisión de los parámetros y sus tendencias para ser comparadas desde el momento en que se inició la anomalía. Se requiere realizar análisis por parte de los operadores de sala de control.

					8B	<p>El horno siempre baja muy rápido</p> <p>1 (descarga) debido a la errada posición de los rodillos</p>	<p>Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta presión de empuje hacia la descarga. Este trabajo se debe programar con asesoramiento de un técnico especialista. Se debe realizar movimientos y análisis durante 7 días aproximadamente.</p>
						<p>2 Fuga de aceite por conectores, pistón o eficiencia de los mismos</p>	<p>Se requiere realizar primero pruebas de cierre y hermetizado de las cámaras del pistón, en caso se requiere su cambio se debe de programar. Se necesita 2 personas en un tiempo de 12 horas aproximadamente para las pruebas y 4 personas y 8 horas para realizar su cambio.</p>
						<p>1 Errada conexión eléctrica (bobina quemada)</p>	<p>Requiere cambio del motor eléctrico por motor en espera. El cambio del motor le lleva 2 horas a 2 eléctricos. La reparación del bobinado toma 3 días con un contratista especializado.</p>
						<p>2 Falla en una de las fases (menos potencia y giro / se quema)</p>	<p>Requiere cambio del motor eléctrico por motor en espera. El cambio del motor le lleva 2 horas a 2 eléctricos. La reparación del bobinado toma 3 días con un contratista especializado.</p>
DE LUBRICACIÓN DE CREMALLERA	L3-3632- 1	MOTOR	9	9 <sup>a</sup>		<p>3 Recalentamiento de terminales (Falso Contacto)</p>	<p>Requiere revisión y limpieza de contactos y terminales. La tarea la realiza 2 eléctricos en 2 horas</p>
						<p>4 Falla en rodamientos</p>	<p>Requiere cambio del motor eléctrico por motor en espera. El cambio del motor le lleva 2 horas a 2 eléctricos. La reparación del motor toma 6 horas con un contratista especializado.</p>
	L3-3632- 2	BOMBA	10	10 <sup>a</sup>		<p>1 Dirección incorrecta del giro de rotación</p>	<p>Se realiza una inspección general por parte del mecánico en la bomba y en el motor (sentido de rotación). Se requiere 1 mecánico y 1 eléctrico para la tarea y el tiempo utilizado es de 20 min.</p>

2	Falla en el acoplamiento con motor	Se necesita hacer una inspección del acople, motor y en hacer una revisión de posibles fallas en el mismo. Posible cambio del motor dependiendo de lo analizado y encontrado. Se requiere a 2 eléctricos y el tiempo utilizado es de 2 horas
3	Falla en la válvula de alivio (calibración)	Se requiere primero realización de pruebas con la válvula y en caso de presentar falla interna se realizará el cambio de válvula por una en stand by, mientras que la que presenta falla entra en reparación si es posible realizarlo, en caso contrario la válvula se desecha. Se Necesita 1 personal mecánico, y para el cambio se utiliza 30 minutos y para la reparación de la misma, 1 hora.
4	Válvulas de paso completamente cerradas	El mecánico tendrá que realizar una inspección de paso de flujo por las válvulas que puedan cerrar la continuidad de flujo. Se requiere de 1 personal mecánico y el tiempo requerido es de 15 minutos.
5	Filtro de succión completamente saturado	Se necesita lavar el filtro y si esta operación ya se realizó con continuidad anterior, se prefiere realizar el cambio directo de filtro. Se requiere 1 personal mecánico, para la tarea de lavado se necesita 1.25 horas y para el caso de cambio de filtro 45 minutos.
6	Nivel de grasa es demasiado bajo	El lubricador dentro de su ruta de inspección diaria, tiene que revisar el nivel de grasa existente en el cilindro. En caso de ser bajo, se realiza cambio de cilindro. Se requiere de 2 personas de lubricación y el tiempo requerido es de 20 min.
7	Pérdida de eficiencia de la bomba	Se requiere el cambio directo de la bomba, para que esta entre en posible reparación. Se requiere de 1 personal mecánico para la tarea y el tiempo de cambio es de 2 horas, fuera del tiempo de reparación en taller de la dañada.

				8 Pérdidas de grasa en el sistema	El mecánico debe realizar una inspección de toda la ruta del sistema de inyección de grasa, determinar las fugas, hermetizar dichas conexiones, cambio de bomba. Para ello se requiere de 2 personas mecánicas y el tiempo de trabajo es de 3 horas.	
				1 Pérdida de eficiencia de la válvula	Se realiza el cambio total de la válvula por una nueva, posteriormente se regula conforme a la necesidad requerida; la válvula cambiada ya no se puede reparar. Se requiere de 1 mecánico y el tiempo requerido para la tarea es de 30 min.	
X	VÁLVULAS	11	11 <sup>a</sup>	2 Se encuentra trabada con algún elemento ajeno	Se requiere realizar el cambio de la válvula por una nueva, posteriormente se regula conforme a la necesidad requerida. La válvula cambiada entra a reparación o limpieza. Se requiere de 2 mecánicos para el cambio en un tiempo de 30 min y para el mantenimiento y limpieza se requiere un tiempo de 3 horas	
				1 No ingresa suficiente presión de aire	Se requiere que se inspeccione el sistema de inyección de aire. La tarea será realizada por 2 mecánicos en un tiempo de 30 minutos.	
X	INYECTORES	12	12 <sup>a</sup>	2 Boquillas tapadas por material ajeno	Se requiere que se realice la limpieza y/o cambio de toberas, posterior a ello una pesada física de la grasa obtenida. La tarea será realizada por 2 mecánicos en un tiempo de 2 horas.	
DE SOPORTE Y GIRO (SUJECIÓN TANGENCIAL)	L3-3631-A-D	RODILLOS SOPORTE	13	13 <sup>a</sup>	1 Los rodillos ejercen excesiva presión a la carga	Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta excesiva presión de empuje. Este trabajo se debe programar con asesoramiento de un técnico especialista. Se debe realizar movimientos y análisis durante 7 días aproximadamente.

				2	Los rodillos ejercen presión hacia la descarga	Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta presión de empuje hacia la descarga. Este trabajo se debe programar con asesoramiento de un técnico especialista. Se debe realizar movimientos y análisis durante 7 días aproximadamente.
L3-3631-G-N	CHUMACERAS	15	15 <sup>a</sup>	1	Las chumaceras ejercen excesiva presión a la carga	Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta excesiva presión de empuje. Este trabajo se debe programar con asesoramiento de un técnico especialista. Se debe realizar movimientos y análisis durante 7 días aproximadamente.
				2	Las chumaceras ejercen presión hacia la descarga	Se requiere realizar ajuste de posiciones de los rodillos, debido a que presenta presión de empuje hacia la descarga. Este trabajo se debe programar con asesoramiento de un técnico especialista. Se debe realizar movimientos y análisis durante 7 días aproximadamente.

*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 16**

*Consecuencias y estrategias*

PROCESOS	CÓDIGO	COMPONENTES	COD. FUNC.	COD. FALLA	MODO DE FALLA	CONSECUENCIAS				ESTRATEGIAS			VIABILIDAD			
						EVIDENTE	SEGURIDAD	MAMBIENTE	PRODUCCION	TIPO DE MTO	TAREA	REQUIERE PARO DE EQUIPO	FRECUENCIA	TÉCNICA	ECONÓMICA	
																V - Visible
DE EMPUJE AXIAL	L3-3633-1	MOTOR ELÉCTRICO	1	1ª	Errada conexión eléctrica (bobina quemada)	V	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Inspección periódica de ajuste de terminales y borneras	SI / MANEJO DE SEÑALES	3 MESES	SI	SI
					Falla en una de las fases (menos potencia y giro / se quema)	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Inspección periódica de ajuste de terminales y borneras	SI / MANEJO DE SEÑALES	3 MESES	SI	SI
					Recalentamiento de terminales (Falso Contacto)	O	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Termografía a tablero y terminales	NO	1.5 MESES	SI	SI
					Falla en rodamientos	V	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Análisis vibraciones y toma de temperatura	NO	1.5 MESES	SI	SI
	L3-3633-2	BOMBA HIDRÁULICA	2	2ª	Dirección incorrecta del giro de rotación	V	NO	NO	SI	SI	Inspección	Inspección del sentido de giro ante cualquier intervención realizada	NO	-	SI	SI

2	Falla en el acoplamiento con motor	V	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Inspección de componentes que conforman el acople	SI / MANEJO DE SEÑALES	6 MESES	SI	SI
3	Falla en la válvula de alivio (calibración)	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Inspección y pruebas de funcionamiento de la válvula de alivio	SI / MANEJO DE SEÑALES	4 MESES	SI	SI
4	Válvulas de paso completamente cerradas	V	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Inspección y pruebas de funcionamiento de las válvulas	NO	6 MESES	SI	SI
5	Filtro de succión completamente saturado	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Lavado de filtro de succión y determinación de estado	SI / MANEJO DE SEÑALES	3 MESES	SI	SI
								Cambio de filtro de succión	SI / MANEJO DE SEÑALES	12 MESES		
6	Nivel de aceite es demasiado bajo	V	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Inspección de nivel de aceite	NO	2 SEMANAS	SI	SI

				7	Pérdida de eficiencia de la bomba	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Cambio de bomba por el tiempo de trabajo	SI / MANEJO DE SEÑALES	24 MESES	SI	SI
				8	Pérdidas de aceite en el sistema	V	NO	SI	SI	SI	Preventivo	Inspección de estado de componentes del sistema	NO	3 MESES	SI	SI
				1	Pérdida de eficiencia de la válvula	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Cambio de válvula	SI / MANEJO DE SEÑALES	24 MESES	SI	SI
X	VÁLVULAS DE APERTURA Y CIERRE	4	4ª	2	Se encuentra trabada con algún elemento ajeno	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Limpieza de válvula	SI / MANEJO DE SEÑALES	-	SI	SI
X	PISTÓN	6	6ª	1	Fuga de aceite por conectores	V	NO	SI	NO	SI	Preventivo	Inspección de estado de componentes del pistón.	NO	3 MESES	SI	SI
												Cambio de componentes por desgaste	SI / MANEJO DE SEÑALES	24 MESES	SI	SI



			2	El horno presenta problemas con parámetros de operación	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Verificación de tendencias de parámetros de operación	NO	-	SI	SI
											Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	NO	1 MES	SI	SI
	7B	1		El horno se mantiene en una sola posición de giro y no llega al límite inferior	O	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos con el equipo de medición	NO	3 MESES	SI	SI
											Realización de Estudio de horno Global	NO	12 MESES	SI	SI
8	8ª	1		El horno siempre se mantiene arriba (carga) debido a la errada posición de los rodillos	O	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	NO	1 MES	SI	SI
											Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos	NO	3 MESES	SI	SI

								con el equipo de medición				
								Realización de Estudio de horno Global	NO	12 MESES	SI	SI
2	El horno presenta problemas con parámetros de operación	O	NO	NO	SI	SI	Preventivo	Verificación de tendencias de parámetros de operación	NO	-	SI	SI
1	El horno siempre baja muy rápido (descarga) debido a la errada posición de los rodillos	O	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	NO	1 MES	SI	SI
								Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos con el equipo de medición	NO	3 MESES	SI	SI
8B								Realización de Estudio de horno Global	NO	12 MESES	SI	SI
2	Fuga de aceite por conectores, pistón o eficiencia de los mismos	V	NO	SI	SI	SI	Preventivo	Inspección de estado de componentes del pistón.	NO	3 MESES	SI	SI
								Cambio de componentes por desgaste	SI / MANEJO DE SEÑALES	24 MESES	SI	SI

DE LUBRICACIÓN DE CREMALLERA

L3-3632-1	MOTOR	9	9ª	1	Errada conexión eléctrica (bobina quemada)	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección periódica de ajuste de terminales y borneras	SI / MANEJO DE SEÑALES	3 MESES	SI	SI
				2	Falla en una de las fases (menos potencia y giro / se quema)	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección periódica de ajuste de terminales y borneras	SI / MANEJO DE SEÑALES	3 MESES	SI	SI
				3	Recalentamiento de terminales (Falso Contacto)	O	NO	NO	NO	SI	Predictivo	Termografía a tableros y terminales	NO	1.5 MESES	SI	SI
				4	Falla en rodamientos	O	NO	NO	NO	SI	Predictivo	Análisis vibraciones y toma de temperatura	NO	1.5 MESES	SI	SI
L3-3632-2	BOMBA	10	10ª	1	Dirección incorrecta del giro de rotación	V	NO	NO	NO	SI	Inspección	Inspección del sentido de giro ante cualquier intervención realizada	NO	-	SI	SI
				2	Falla en el acoplamiento con motor	V	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección de componentes que conforman el acople	SI / MANEJO DE SEÑALES	6 MESES	SI	SI
				3	Falla en la válvula de alivio (calibración)	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección y pruebas de funcionamiento de la válvula de alivio	SI / MANEJO DE SEÑALES	4 MESES	SI	SI

					4	Válvulas de paso completamente cerradas	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección y pruebas de funcionamiento de las válvulas	NO	6 MESES	SI	SI	
					5	Filtro de succión completamente saturado	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Lavado de filtro de succión y determinación de estado	SI / MANEJO DE SEÑALES	3 MESES		SI	SI
													Cambio de filtro de succión	SI / MANEJO DE SEÑALES	12 MESES			
					6	Nivel de grasa es demasiado bajo	V	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección de nivel de aceite	NO	2 SEMANAS	SI	SI	
					7	Pérdida de eficiencia de la bomba	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Cambio de bomba por el tiempo de trabajo	SI / MANEJO DE SEÑALES	2 AÑOS	SI	SI	
					8	Pérdidas de grasa en el sistema	V	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección de estado de componentes del sistema	NO	3 MESES	SI	SI	
X	VÁLVULAS	11	11ª	1		Pérdida de eficiencia de la válvula	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Cambio de válvula	SI / MANEJO DE SEÑALES	24 MESES	SI	SI	

				2	Se encuentra trabada con algún elemento ajeno	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Limpieza de válvula	SI / MANEJO DE SEÑALES	-	SI	SI
X	INYECTORES	12	12ª	1	No ingresa suficiente presión de aire	V	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Inspección del sistema de componentes del sistema de aire	NO	1.5 MESES	SI	SI
				2	Boquillas tapadas por material ajeno	O	NO	NO	NO	SI	Preventivo	Limpieza de boquillas y realización de pesada física	SI / MANEJO DE SEÑALES	3 MESES	SI	SI
												Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	NO	1 MES	SI	SI
				1	Los rodillos ejercen excesiva presión a la carga	O	NO	NO	NO	SI	Predictivo	Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos con el equipo de medición	NO	3 MESES	SI	SI
L3-3631-A-D	RODILLOS SOPORTE	13	13ª									Realización de Estudio de horno Global	NO	12 MESES	SI	SI
				2	Los rodillos ejercen presión hacia la descarga	O	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	NO	1 MES	SI	SI
												Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos con el equipo de medición	NO	3 MESES	SI	SI

DE SOPORTE Y GIRO (SUJECCIÓN TANGENCIAL)

									Realización de Estudio de horno Global	NO	12 MESES	SI	SI		
									Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	NO	1 MES	SI	SI		
			1	Las chumaceras ejercen excesiva presión a la carga	O	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos con el equipo de medición	NO	3 MESES	SI	SI
									Realización de Estudio de horno Global	NO	12 MESES	SI	SI		
									Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	NO	1 MES	SI	SI		
			2	Las chumaceras ejercen presión hacia la descarga	O	NO	NO	SI	SI	Predictivo	Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos con el equipo de medición	NO	3 MESES	SI	SI
									Realización de Estudio de horno Global	NO	12 MESES	SI	SI		

L3-3631-G-N CHUMACERAS 15 15ª

Nota. Elaboración propia.

### **1.5. O4: Elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el horno rotatorio de clinkerización**

Con la definición de las estrategias y sus frecuencias en el paso anterior, se agruparon para facilitar su manejo. Con ello, se logrará establecer un plan de mantenimiento donde se pueda mantener por medio de dichas tareas, los componentes que presentan mayor riesgo y probabilidad de falla en nuestro horno rotativo.







Habiendo obtenido el plan de mantenimiento anual del horno de clinkerización, tomando en consideración los componentes que presentan mayor riesgo y probabilidad de falla, se ha logrado establecer:

- 04 tareas de inspección
- 07 tareas predictivas
- 30 tareas preventivas

Las tareas más resaltantes de todo el listado, que han sido generadas por la falla más crítica en el horno de clinkerización, en nuestro caso el ascenso inmediato del horno, son las que se desglosaron de los componentes “Rodillos y Chumaceras soporte”.

Realizando un análisis más profundo de ello, el equipo presentaba múltiples paros por la activación del sensor de límite de posición máxima; ello quería decir, que el horno se encontraba constantemente en dirección ascendente (verificar marco teórico del horno de clinkerización). Esta condición, se daba por el mal posicionamiento de los soportes, que por el tiempo prolongado de trabajo en esta circunstancia originó desgaste variado, que complicó aún más su situación. En el año 2024, debido a este motivo, se ha tenido que realizar 01 servicio no programados de “rectificación de rodillos y llantas” debido al asentamiento presentado y otro de “estudio de condición actual del horno”, que resultaron siendo una fuerte inversión de dinero no planificado.

### **Figura 25**

*Rectificado de llantas y rodillos soportes de horno*



*Nota.* Elaboración propia.

Se dará una breve explicación de la realización de las tareas que evitarán esta anomalía:

### Figura 26

#### *Rodillos de soporte y chumaceras del sistema de soporte y giro*

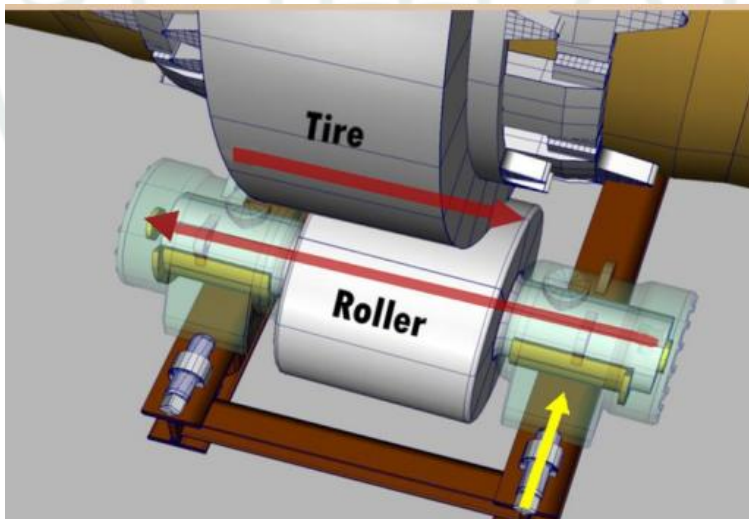
RODILLOS SOPORTE Y CHUMACERAS DE SIST. DE SORPORTE Y GIRO	Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite	Inspección
	Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos con el equipo de medición	Preventivo
	Realización de Estudio de Horno Global	Preventivo

*Nota.* Elaboración propia.

- a) Inspección de la posición de los rodillos según películas de aceite, esta tarea hace referencia a la verificación periódica (mensual), de la posición en la que se encuentran los rodillos soporte con relación a la dirección de empuje axial realizado hacia el Horno. Se realiza directamente en los anillos de retención ubicados dentro de los mismos soportes y que pueden ser verificados por una ventana de inspección. Con esta revisión visual se puede predecir la necesidad de realizar movimientos de posición para que la fuerza axial sea en la dirección correcta (leer marco teórico) Se debe tomar en consideración que un movimiento de 0.1 mm ya puede realizar cambios en el comportamiento del horno.

### Figura 27

#### *Fuerzas axiales que trabajan sobre el horno de clinkerización*



*Nota.* (Phillips Kiln Services, 2021).

**Figura 28**

*Películas de aceite que indican posicionamiento de soporte de horno*

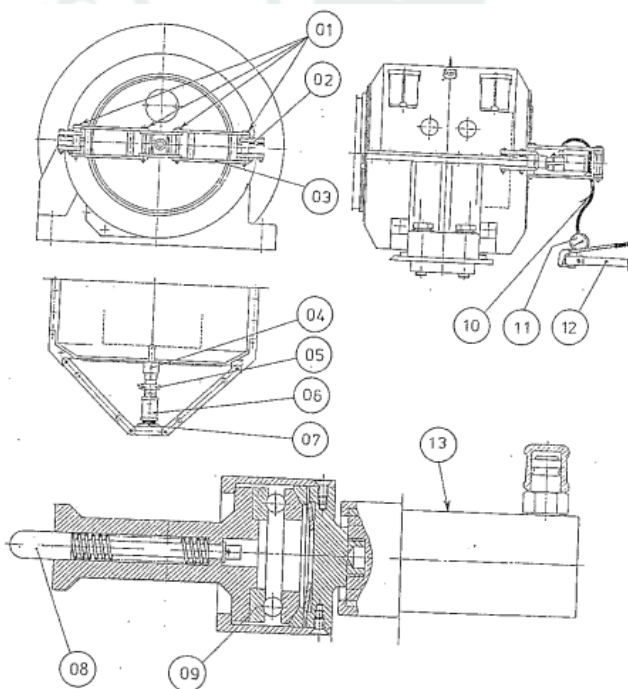


*Nota.* Elaboración propia.

- b) Verificación de presión axial sobre cada uno de los rodillos, con el equipo de medición, esta tarea es muy similar a la anterior, pero inicialmente se ha programado para realizarla trimestralmente. En comparación con la inspección visual, este trabajo tiene una duración mayor y el resultado final es un valor más exacto, el cual es comparado con tablas para poder definir si nos encontramos en la posición correcta o si se requiere realizar alguna modificación.

**Figura 29**

*Equipo de medición de presión axial en los soportes del horno*



*Nota.* (FLSmith, 2005).

- c) Realización de estudio global del horno, este es un servicio que debe ser contratado, ya que para su realización se requiere de equipos tecnológicos de alta precisión, que solo ciertas empresas los poseen. Mediante este análisis, que se recomendó que fuera en forma anual, se realiza una inspección de la geometría y estado de la totalidad de los componentes del horno rotativo de clinkerización, para poder realizar una detección temprana de anomalías.

#### **1.6. O5: Plantear un procedimiento de implementación y evaluación continua del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad y mantenimiento de un horno rotatorio de clinkerización**

Como primera observación, se puede indicar que el plan de mantenimiento realizado en el paso 4.5.1, debe estar en constantes evaluaciones y revisiones para ajustar los tiempos indicados u otras variaciones a lo ya programado, todo ello, comparándolo con el desempeño real obtenido.

Se espera que se tenga mejoras notables en confiabilidad, disponibilidad y reducción de costos de operaciones, que son indicadores de seguimiento para analizar los resultados de la metodología recientemente aplicada.

##### **1.6.1. Indicadores de mantenimiento**

En lo referente al Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), la evaluación del comportamiento y la eficacia de las estrategias o actividades de mantenimiento implementadas, necesita del uso de indicadores específicos, claros y que puedan ser medidos y alineados con los objetivos operaciones de nuestra empresa.

Los indicadores que se van a desarrollar no solo van a evaluar la eficiencia de los equipos y de los procesos de operación, sino también podrán determinar puntos de mejora, así como también dónde es requerido el optimizar los recursos y reducir el número de fallas no programadas.

Con estos elementos, podemos confiar que las decisiones de mantenimiento sean respaldadas por datos correctos, facilitando nuestra metodología basada en confiabilidad. Adicionalmente a ello, analizaremos el comportamiento de los activos, así como su impacto en seguridad, la eficacia, disponibilidad, eficiencia y los costos asociados.

Seleccionaremos y analizaremos los principales indicadores de mantenimiento que nos apoyarán a diagnosticar, evaluar y realizar un correcto seguimiento dentro del proceso de clinkerización de obtención del cemento.

- Nivel de Aprovechamiento Interno del horno 3 (NAI). Es la proporción de tiempo realmente productivo respecto al tiempo de operación.

$$\text{NAI} = [ (\text{tiempo efectivo}) / \text{tiempo de operación} ] * 100$$

- Disponibilidad Operativa del horno 3 (DO). Medida referente al porcentaje de tiempo total de producción que el horno ha estado disponible para usarse a requerimiento de procesos.

$$A = \frac{HL - PP - PR}{HL}$$

A = Disponibilidad operativa

HL = Horas laborables de la empresa (Se excluye domingos y feriados)

PP = Paradas programadas para mantenimiento proactivo o reparaciones programadas

PR = Paradas por mantenimiento reactivo

También puede ser calculada por =  $\text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$

- Rendimiento del horno 3 (PRI). Se refiere a la eficiencia con que el horno produce clinker.

$$\text{PRI} = [ (\text{Producción real (tn)}) / ((\text{tiempo de operación (h)} * \text{BPD (t/h)}) ) ] * 100$$

BDP: (Barrels per day) Cap. De Producción Diaria. (200 tph, 4800 tpd, mejor desempeño demostrado)

- Eficiencia general de equipos del horno 3 (OEE). Mide la eficiencia integral del Proceso de producción de clinkerización, considerando la disponibilidad, el rendimiento y la calidad de los equipos, durante su tiempo de operación.

$$\text{OEE} = D \times R \times C$$

D = Disponibilidad (dividiendo el tiempo productivo / tiempo disponible) (%)

R = Rendimiento (dividiendo la producción real / capacidad productiva) (%)

C = Calidad (dividiendo las piezas buenas / producción total) (%)

También puede ser calculada por  $OEE = (PRI * NAI) / 100$

- Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) del horno 3. Tiempo promedio que el Horno de clinkerización cumple su función sin haber sido interrumpido a causa de una falla funcional.

$$MTBF = TTO / \#F$$

TTO = Tiempo total de operación en el periodo

#F = Número total de fallas

- Tiempo promedio para la reparación del horno 3 (MTTR). Llamada también “severidad de la avería”, es el tiempo medio real utilizado para arreglar una falla y restaurar su función.

$$MTTR = D/N$$

MTTR = Tiempo promedio para la reparación

N = Número de averías durante el intervalo (0, Ttotal)

D = Tiempo improductivo para el periodo (horas)

- Costo de mantenimiento correctivo del horno 3. Se haya sumado los costos directos e indirectos asociados a los mantenimientos correctivos realizados.

Para ello, como medio de apoyo, se contará con formatos de control y recopilación de información, generados por el equipo de trabajo de RCM, los cuales permitirán obtener y ordenar en forma homogénea los datos operativos y de mantenimiento; estos documentos nos facilitarán la continuidad y cumplimiento en forma eficiente de los pasos de aplicación del RCM, así como el seguimiento de mejoras y una comparación continua de resultados entre el antes y el después de la aplicación de la metodología.

- Formato de registro de fallas de los equipos. (Anexo N° 2)
- Ficha de observación del horno rotativo de clinkerización. (Anexo N° 3)

Ya teniendo en cuenta los indicadores de mantenimiento de los cuales se van a tratar en esta metodología (RCM), se procederá a analizarlos y determinar que se encuentren en una etapa de mejora progresiva.

Cuando se observa que los valores están teniendo una tendencia de incremento, se va a establecer como objetivo el poder mantenerlos por encima de los valores de clase mundial.

Valores de Clase Mundial (Benchmarks). Estos son valores de referencia que representan el desempeño o cumplimiento óptimo, cercano al ideal que debe tener un proceso de un determinado sector. Son valores que han sido comparados con los de otras empresas, del mismo proceso e industria y que han logrado mantenerse como líderes en el mercado. Es así como se han establecido los valores metas para poder trabajar sobre ellos.

Los valores actuales detallados en la Tabla 18, han sido obtenidos de los resultados de los meses más críticos.

**Tabla 18**  
*Indicadores de mantenimiento*

<b>Indicador</b>	<b>Meta</b>	<b>Valor Actual</b>	<b>Frecuencia de Medición</b>
Disponibilidad Operativa del horno	> 90%	85%	Mensual
Tiempo Promedio para la Reparación (MTTR)	3 < horas	5 horas	Mensual
Costo de Mantenimiento Correctivo	Reducción del 10 %	1,143,000.0 S/.	Anual
Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)	180 > horas	106 horas	Mensual
Rendimiento (PRI)	> 95 %	90 %	Mensual
Nivel de Aprovechamiento Interno (NAI)	> 90%	86.9 %	Mensual
Eficiencia General (OEE)	> 85 %	> 73.3 %	Mensual

*Nota.* Elaboración propia.

### **1.6.2. Costo del proyecto**

En la Tabla 19, se procede a resumir el estudio de dos metodologías económicas, comparando la gestión de mantenimiento utilizada y la implementación de la nueva con el RCM.

La reciente metodología implementada, incluye la inspección anual por parte de una contratista especializada, donde se verificará la totalidad de características, estados y condiciones de los componentes del horno de clinkerización (POLSCAN). Así mismo, también incluye, el cambio de componentes especificados en el plan de mantenimiento generado, así como el costo de mano de obra resultante de las tareas de inspección periódica de posición de rodillos soporte. Con todo ello, se podrá evitar sucesos como los ocurridos en el año 2024, donde se generó un desembolso considerable de dinero debido a la tarea correctiva de rectificado de rodillos y llantas del horno.

Cabe resaltar que, para poder considerarla como beneficiosa, no existe un “valor universal” referente a cuánto debe mejorar el costo por paros no previstos aplicando la metodología de RCM, ya que este parámetro dependería de muchos factores como son el tipo de industria, la dimensión del activo, el beneficio económico obtenido entre otros, sin embargo, para nuestro caso, se analizaron algunas tesis y documentos que nos brindaron un rango o una estimación del valor a tomar como modelo para el cálculo económico.

Por ejemplo, se analizó una tesis perteneciente al mismo rubro, que tiene por título "Aplicación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en una empresa productora de cementos y concretos para la industria de la construcción", la cual indica que el resultado de la aplicación de dicha metodología logró una reducción del número de paros del Molino de Crudos en un 52% aproximadamente. (Estrada, 2015)

Otra de ellas, también del mismo rubro, denominada “Aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad para reducir los costos de mantenimiento a un sistema de molienda vertical de cemento lm 56 2 + 2”, certifica que los paros no programados son reducidos en su totalidad. (Fernández, 2014)

Tomando en consideración lo anteriormente descrito, para el cálculo de costo por paros no previstos, aplicando la metodología de RCM (Tabla 19), se estimó una mejora mínima real del número de paros no programados del equipo del 50%, que se manifiesta en la reducción radical de los paros no previstos, mediante un mejor seguimiento del equipo, la intervención oportuna de los equipos y elementos críticos del mismo, como se explicó a lo largo del presente trabajo.

**Tabla 19***Comparación de costos de mantenimiento*

TIPO DE MANTENIMIENTO	METODOLOGÍA ACTUAL		METODOLOGÍA CON RCM		
	ACTIVIDAD	TOTAL	TOTAL		
<b>M. Preventivo</b>		<b>S/ 240,000.00</b>	<b>S/ 440,000.00</b>		
Repuestos (Válvulas, filtros y bombas)		S/ 160,000.00	S/ 270,000.00		
Insumos (Aceite, trapo)		S/ 20,000.00	S/ 50,000.00		
Mano de Obra		S/ 60,000.00	S/ 120,000.00		
<b>M. Predictivo</b>		<b>S/ 12,000.00</b>	<b>S/ 36,000.00</b>		
Mano de Obra		S/ 12,000.00	S/ 36,000.00		
Equipo Termográfico y Vibracional		S/ 0.00	S/ 0.00		
<i>Análisis de las Metodologías de Mantenimiento</i>					
		METODOLOGÍA ACTUAL		METODOLOGÍA CON RCM	
	ACTIVIDAD	TOTAL	TOTAL		
	Costos por mantenimiento	S/ 240,000.00	S/ 440,000.00		
	Costo por paros (No previstos) 50%	S/ 1,143,000.00	S/ 571,500.00		
	Costo total de Mantenimiento	S/ 1,383,000.00	S/ 1,011,500.00		
	<b>AHORRO</b>		<b>S/ 371,500.00</b>		
		<b>OTROS COSTOS</b>	<b>S/ 240,000.00</b>		
40 mil dólares		Costo de rectificado de emergencia	S/ 160,000.00		
20 mil dólares		Costo de Análisis de Estado (POLSCAN)	S/ 80,000.00		

*Nota.* Elaboración propia.

Se procede a realizar el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) para poder determinar si el proyecto es económicamente sustentable.

Dichas herramientas financieras, definen diversos parámetros, por ejemplo, el VAN te indica cuánto dinero se va a ganar o perder en un futuro, pero traído al valor actual y el TIR es un porcentaje que te indica cuál será la rentabilidad de tu inversión, pero teniendo un VAN igual a cero.

El valor de la tasa de rentabilidad mínima utilizado para nuestros cálculos, tiene valores específicos para empresas según su rubro, en nuestro caso es el cementero. Basándonos en información y estimaciones del mercado actual, obtuvimos un resultado que puede situarse en un rango de 10 a 13%, es por ello que para nuestro desarrollo se seleccionó una rentabilidad mínima de 12%.

Para poder determinar los valores de cada una de nuestras variables en nuestro flujo de caja, se tomaron en cuenta ciertos criterios.

Se realizó el cálculo general de gastos obtenidos según las reuniones realizadas por el equipo de trabajo para la definición del RCM para nuestro horno rotatorio de clinkerización. Estos gastos serán constantes, ya que este equipo continuará con labores de verificación, medición y evaluación de cada una de las tareas definidas. Adicionalmente a ello, se concluyó como conveniente la constante capacitación y actualización (Certificación) de nuestro equipo de trabajo en lo referente a los estudios de RCM y técnicas de mantenimiento, así como la necesidad de adquisición de un programa que brinde apoyo en el manejo de la data resultante, y que a posterior pueda aprovecharse para la estandarización de esta metodología a los demás equipos del proceso cementero en general. Todo ello, se logra apreciar en la tabla 20.

**Tabla 20***Costos para implementación de la metodología de RCM*

<b>GASTOS EN REALIZACIÓN DEL PROYECTO (REUNIONES)</b>	
<b>ÚTILES DE ESCRITORIO</b>	<b>Soles</b>
Útiles diversos	S/ 1,000.00
Impresiones	S/ 1,000.00
Total	S/ 2,000.00
<b>OTROS GASTOS</b>	<b>Soles</b>
Refrigerios (13 días x 3 meses)	S/ 5,000.00
<b>GASTOS TOTALES</b>	<b>S/ 7,000.00</b>

<b>CANTIDAD DE MIEMBROS DE EQUIPO DE RCM</b>	<b>10 PERSONAS</b>					
<b>CAPACITACIÓN EN RCM</b>	<b>AÑO 0</b>	<b>AÑO 1</b>	<b>AÑO 2</b>	<b>AÑO 3</b>	<b>AÑO 4</b>	<b>AÑO 5</b>
Curso de Capac / Certif "INGENIUM"	S/ 70,000.00	S/ 70,000.00	S/ 70,000.00	S/ 70,000.00	S/ 70,000.00	S/ 70,000.00
Soporte Técnico (2Pers X 3 Meses)	S/ 60,000.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00
<b>TOTAL</b>	<b>S/ 130,000.00</b>	<b>S/ 70,000.00</b>	<b>S/ 70,000.00</b>	<b>S/ 70,000.00</b>	<b>S/ 70,000.00</b>	<b>S/ 70,000.00</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE RCM</b>	<b>S/ 120,000.00</b>	<b>S/ 40,000.00</b>	<b>S/ 40,000.00</b>	<b>S/ 40,000.00</b>	<b>S/ 40,000.00</b>	<b>S/ 40,000.00</b>
Licencia de Software	S/ 40,000.00	S/ 40,000.00	S/ 40,000.00	S/ 40,000.00	S/ 40,000.00	S/ 40,000.00
Capacitación de Personal /Consultoría	S/ 40,000.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00
Desarrollo de Interfases Adicionales	S/ 20,000.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00
Infraestructura Informática (Equipos)	S/ 20,000.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00

*Nota.* Elaboración propia.

Ya con todos los valores determinados, procederemos a obtener nuestro Flujo de Caja, para calcular las variables en la Tabla 21.

**Tabla 21***Flujo de caja*

<b>FLUJO DE CAJA GESTIÓN METODOLOGÍA RCM</b>						
<b>AÑOS</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>INVERSIÓN DE METOD. (CAPACITACIÓN RCM / TÉCNICAS DE MTTO)</b>						
Útiles de Escritorio / Refrigerios	-S/ 7,000.00	-S/ 7,000.00	-S/ 7,000.00	-S/ 7,000.00	-S/ 7,000.00	-S/ 7,000.00
Curso de Capacitación y Certificación - (INGENIUM)	-S/ 70,000.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00
Curso de Capacitación y Certificación - Técnicas de Mtto	S/ 0.00	-S/ 70,000.00	-S/ 70,000.00	-S/ 70,000.00	-S/ 70,000.00	-S/ 70,000.00
Contratación de Personal Especialista de Soporte Técnico (2 Personas X 3 Meses)	-S/ 60,000.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00	S/ 0.00
<b>OTROS COSTOS (IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE)</b>	<b>-S/ 120,000.00</b>	<b>-S/ 40,000.00</b>	<b>-S/ 40,000.00</b>	<b>-S/ 40,000.00</b>	<b>-S/ 40,000.00</b>	<b>-S/ 40,000.00</b>
<b>OTROS COSTOS (POLSCAN - ANÁLISIS DE ESTADO)</b>	<b>-S/ 80,000.00</b>	<b>-S/ 80,000.00</b>	<b>-S/ 80,000.00</b>	<b>-S/ 80,000.00</b>	<b>-S/ 80,000.00</b>	<b>-S/ 80,000.00</b>
<b>AHORRO DE MANTENIMIENTO</b>		S/ 371,500.00	S/ 371,500.00	S/ 371,500.00	S/ 371,500.00	S/ 371,500.00
<b>FLUJO DE CAJA</b>	<b>-S/ 337,000.00</b>	<b>S/ 174,500.00</b>	<b>S/ 174,500.00</b>	<b>S/ 174,500.00</b>	<b>S/ 174,500.00</b>	<b>S/ 174,500.00</b>
VAN (Valor Actual Neto)	S/ 292,033.45					
TIR (Tasa Interna de Retorno)	43.17%					
Tasa de Rentabilidad Mínima (K)	12.00%					

*Nota.* Elaboración propia.

Como resultante, se puede apreciar que los valores de VAN y TIR utilizando la metodología RCM son positivos, esto indica que es un proyecto financieramente viable y ofrece un mayor retorno porcentual.

## CONCLUSIONES

**PRIMERO:** Se logró desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el horno de clinkerización en la cementera del Perú, lo cual permitió optimizar su disponibilidad, confiabilidad y eficiencia operativa del equipo, reduciendo los costos asociados a mantenimientos correctivos no planeados.

**SEGUNDO:** Se identificaron y definieron de manera precisa las funciones y fallas funcionales del horno rotatorio de clinkerización, lo que permitió tener una comprensión clara del rendimiento esperado del equipo y las condiciones bajo las cuales se viene trabajando.

**TERCERO:** Se identificaron los principales modos y mecanismos de falla del horno rotatorio de clinkerización, a través de un correcto desarrollo de la herramienta de análisis de modos y efectos de falla (FMEA), lo que permitió enfocar los esfuerzos de mantenimiento en los componentes críticos.

**CUARTO:** Se seleccionaron estrategias de mantenimiento y frecuencias específicas adecuadas para eliminar o mitigar los modos de falla más críticos, priorizando aquellas que permiten mejorar la confiabilidad sin incurrir en costos innecesarios.

**QUINTO:** Se elaboró un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, adaptado a las condiciones operativas específicas de nuestro horno de clinkerización, integrando actividades programadas, recursos necesarios y métricas de evaluación, optimizando la planificación y disminuyendo la atención de intervenciones no programadas.

**SEXTO:** Se propuso un procedimiento de evaluación continua del plan de mantenimiento RCM, permitiendo monitorear sus indicadores, confirmando una mejora continua en la gestión del equipo.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERO:** Se recomienda la estandarización de la presente metodología aplicada con éxito en el horno de clinkerización, para replicarla y extenderla progresivamente a otros equipos de alto impacto en la producción; asegurando que los beneficios del RCM se maximicen a nivel de la planta, consolidando una nueva cultura de mantenimiento.

**SEGUNDO:** Se sugiere aplicar los formatos y registros actuales y actualizados para la identificación de las fallas en el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú, asimismo, las metodologías para el reconocimiento concreto de las causas históricas y actuales que originan las fallas – averías y así realizar el control semanal y mensual de dichas disconformidades.

**TERCERO:** En el análisis AMEF, es recomendable realizar un análisis riguroso de los modos de falla que afecten la continuidad de la falla funcional del equipo, para que el RCM sea confiable y sea posible anticiparse a estas fallas con la selección de estrategias correctas de mantenimiento utilizando el flujo lógico de decisión.

**CUARTO:** Se recomienda que las estrategias y sus frecuencias de mantenimiento, sean sometidas a un proceso de revisión periódica, lo que debe asegurar la actualización del AMEF ante cambios en las condiciones operativas, el envejecimiento del equipo, etc; lo que permitirá que el sistema se mantenga óptimo y manteniendo la misma eficiencia lograda en la etapa de aplicación inicial.

**QUINTO:** Se recomienda realizar el seguimiento, control, actualización y optimización del Plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para el horno rotatorio de clinkerización en una cementera del Perú; realizando ajustes de periodicidades mediante chequeos continuos y actualización según los hallazgos.

**SEXTO:** Se recomienda implementar un sistema de inspecciones - auditorías para la evaluación mensual y semestral de la gestión de mantenimiento del horno rotativo de clinkerización; lo que permitirá que se establezca con el tiempo nuevos valores ideales de cada uno de los indicadores, para así poder tener metas cuantificables que aporten a la mejora continua del proceso de elaboración del cemento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, A., & Briones, W. (2015). Diseño de un sistema de supervisión y control para el proceso de obtención de clínker en el horno vertical 4 de la planta industrial Cementos Selva. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico].
- Antuñez, J. M. (2021). Diseño del sistema stand-by de alimentación aire-carbón del horno rotativo N°03 - UNACEM Condorcocha. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico]. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9cd35585-7a90-48a0-a607-de60ef8dc00c/content>
- ArquiMexico. (2019). Fabricación de cemento Portland.
- Castillo et al. (2022). Horno cementero rotatorio: una revisión al control mediante sistemas expertos. *Tecnológicas*, 25(55). Obtenido de <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/2391>
- Condezo, Y. (2017). Modelamiento termodinámico del proceso de clinkerización en una planta de producción de cemento a partir de un análisis basado en balances de masa y energía.
- Conscious Reliability. (2020). Norma SAE JA1011 – Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).
- Córdova, C. (2005). Implantación del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM a los hornos convertidores Peirce Smith de la fundición de cobre de Southern Perú Copper Corporation. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico]. Obtenido de <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/744>
- Cruz, R. (2025). ¿Qué Es El Mantenimiento Centrado en La Confiabilidad? Obtenido de <https://es.scribd.com/document/862699930/RCM>
- Cueva, C. (2019). Modelo de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la productividad de la empresa cementos Selva S.A. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico]. Obtenido de [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/37697/cueva\\_ic.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/37697/cueva_ic.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- ECN automation. (2025). Cemento. Obtenido de <https://ecnautomation.com/index.php?mod=cemento>

- Edwards, L. (2014). Rotary kiln schematic and kilns equipped with tertiary air fans.
- Espinosa et al. (2012). Un procedimiento para evaluar el riesgo de la innovación en la gestión del mantenimiento industrial. *Ingeniare*, 20(2), 242-54. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052012000200011&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052012000200011&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- Espinoza, C. (2020). Diagrama de Flujo.
- Estrada. (2015). Aplicación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en una empresa productora de cementos y concretos para la industria de la construcción.
- Felauto. (2016). Rodillos de apoyo de llantas – estación de giro.
- Fernández, F. (2014). Aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad para reducir los costos de mantenimiento a un sistema de molienda vertical de cemento LM 56 2+2. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial].
- FLSmith. (2005). Mechanical Maintenance Manual for Rotary Kilns.
- González, M. (2018). La industria del cemento en el Perú.
- Hernández, R. C. (2020). El proceso de investigación científica (2 edición).
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw Hill. Obtenido de <https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6>
- Hidalgo, R. (2020). Plan de implementación general del RCM.
- Holcim Group Support. (2006). Llanta revestida con ladrillo refractario.
- Jena et al. (2024). Integration of Industry 4.0 with reliability centered maintenance to enhance sustainable manufacturing. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43(2), e14321.
- Julca, L. A. (2021). Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno artesanal de ladrillos de una microempresa del distrito de Florencia de Mora, Provincia de Trujillo – La Libertad. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista] . Obtenido de [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/86530/Rivera\\_GJC-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/86530/Rivera_GJC-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- León, A., & Guillén, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador.
- Mamani, J. (2023). Análisis de la implementación de RCM en área de mantenimiento sección equipo pesado en la constructora RECIFE SAC. [Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería de Mantenimiento]. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/907bba02-7dbd-4881-bcd8-a9499a6059ca/content>
- Ministerio de Producción. (2022). D.S. 003-2022 - PRODUCE. Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel.
- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2011). Ley N.º 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- Mora, A. (2009). Mantenimiento: Planeación, ejecución y control. Alfaomega Grupo Editor, S.A.
- Moubray, J. (1997). RCM II: Reliability Centered Maintenance. Obtenido de <https://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2013/11/Reliability-Centered-Maintenance-II.pdf>
- Mowbray et al. (2006). Campus mental health services: Recommendations for change. *Apa PsycNet*, 76(2), 226–237.
- Nava, J. D. (2012). Teoría de Mantenimiento Fiabilidad.
- Nicomendes, E. (2018). Tipos de investigación.
- Norambuena, J. (2020). Gestión del mantenimiento industrial .
- Phillips Kiln Services. (2021). Conjunto de rodillos de soporte del horno .
- Rincón, A. (2016). Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para el horno rotativo Allis Chamers en la planta de cemento Cucuta Cemex Colombia S.A. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico].
- Rios, J. E. (2022). Infografía producción de cemento.
- Santos, J. (2022). Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado en el Área de Chancado de planta concentradora minera Mateas S. A. C. Arequipa. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico].

Tavares, C., & Rondón, G. (2015). Impacto de la represa de Gallito Ciego en la estabilidad de línea de costa en la desembocadura del río Jequetepeque, Perú. *Espacio y Desarrollo*(27), 79-101.

Terotecnic. (2013). RCM.

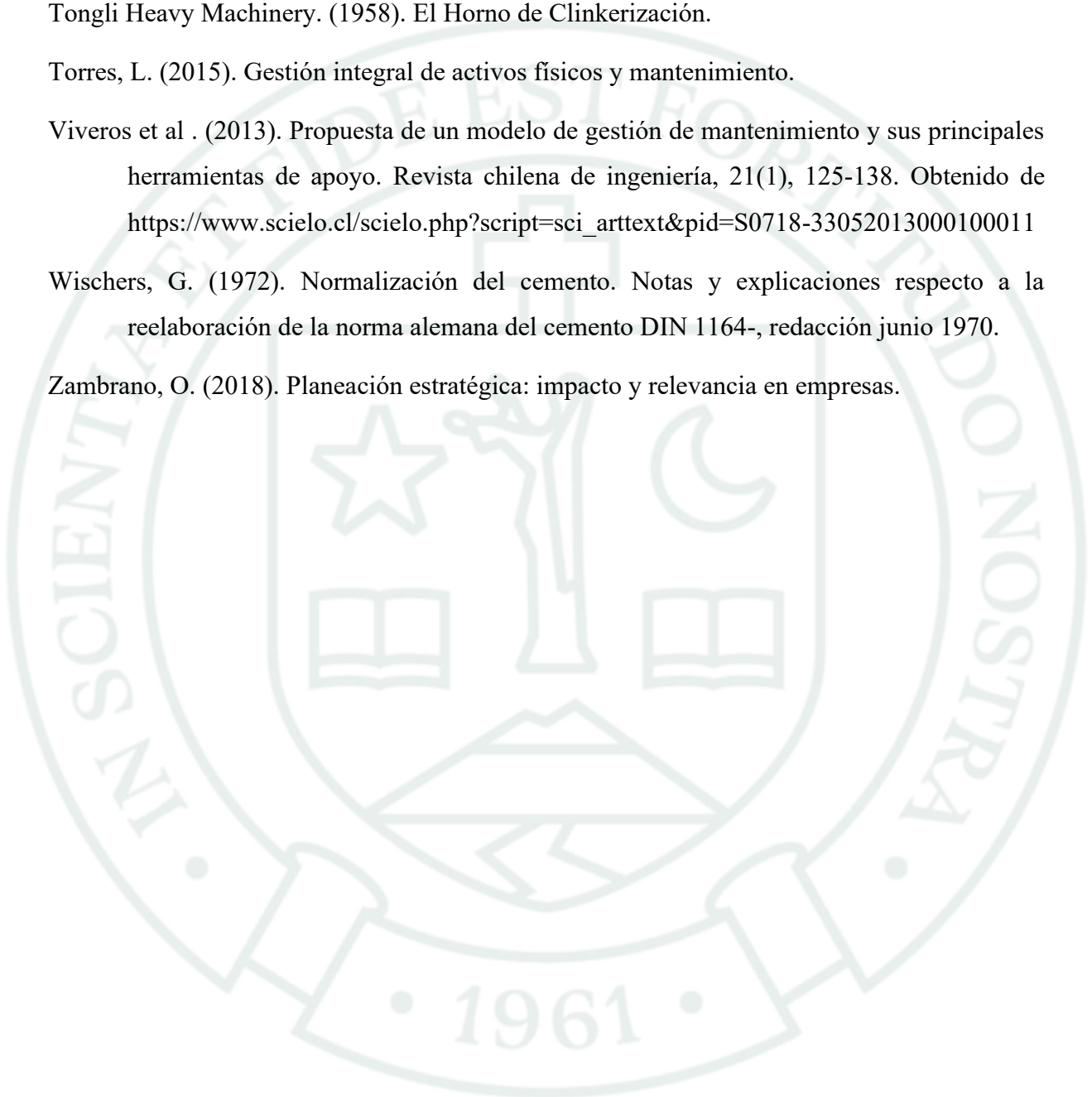
Tongli Heavy Machinery. (1958). El Horno de Clinkerización.

Torres, L. (2015). Gestión integral de activos físicos y mantenimiento.

Viveros et al . (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista chilena de ingeniería*, 21(1), 125-138. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052013000100011](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052013000100011)

Wischers, G. (1972). Normalización del cemento. Notas y explicaciones respecto a la reelaboración de la norma alemana del cemento DIN 1164-, redacción junio 1970.

Zambrano, O. (2018). Planeación estratégica: impacto y relevancia en empresas.





**ANEXOS**

# Anexo 1

Tabla de costos y tiempos de paro de todos los procesos 2024''

EQUIPOS	COSTO POR MTTTO PREVENTIVO	COSTO POR HORA DE PARO	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SETIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE		FALLA	COSTO TOTAL												
			CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS	CANTAS	HORAS														
Trituradora primaria	20,000.00	S/ 17,550.00	0	0	0.0	0	0	0.0	1	4	70,200.0	2	1	17,550.0	1	1	17,550.0	0	0	0.0	1	5	87,750.0	0	0	0.0	0	0	0.0	1	5	87,750.0	1	3	43,875.0	4	4	61,425.0	11	386,100.0
Trituradora secundaria	15,000.00	S/ 5,400.00	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	1	4	21,600.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	1	21,600.0
Molino Vertical de Harina	28,500.00	S/ 14,750.00	1	1	14,750.0	2	1	7,375.0	1	3	44,250.0	1	2	29,500.0	3	3	36,875.0	0	0	0.0	0	0	0.0	1	2	22,125.0	1	1	7,375.0	2	5	73,750.0	1	1	14,750.0	0	0	0.0	13	250,750.0
Horno Horizontal	20,000.00	S/ 25,400.00	1	1	25,400.0	2	2	50,800.0	2	2	50,800.0	2	2	50,800.0	3	3	76,200.0	5	5	127,000.0	5	5	127,000.0	6	6	152,400.0	5	5	127,000.0	6	6	152,400.0	7	7	177,800.0	46	1,143,000.0			
Molino Horizontal de Cemento 1	20,000.00	S/ 6,540.00	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	2	2	13,080.0	1	1	6,540.0	3	3	16,350.0	2	5	32,700.0	4	3	19,620.0	0	0	0.0	1	1	6,540.0	0	0	0.0	0	0	0.0	13	94,830.0
Molino Horizontal de Cemento 2	20,000.00	S/ 7,530.00	0	0	0.0	2	3	18,825.0	0	0	0.0	0	0	0.0	1	5	37,650.0	1	2	15,060.0	0	0	0.0	1	1	3,765.0	2	3	22,590.0	1	1	7,530.0	0	0	0.0	0	0	0.0	8	105,420.0
Molino Vertical de Cemento 3	30,500.00	S/ 21,100.00	1	1	21,100.0	1	4	84,400.0	0	0	0.0	2	1	21,100.0	1	1	21,100.0	2	1	10,550.0	0	0	0.0	2	2	42,200.0	1	1	10,550.0	2	1	10,550.0	1	3	63,300.0	3	3	63,300.0	16	348,150.0
Molino Horizontal de Cemento 4	20,000.00	S/ 10,560.00	0	0	0.0	2	3	26,400.0	0	0	0.0	0	0	0.0	2	5	52,800.0	1	2	21,120.0	0	0	0.0	1	1	5,280.0	2	3	31,680.0	1	1	10,560.0	0	0	0.0	0	0	0.0	9	147,840.0
Molino Horizontal de Cemento 5	20,000.00	S/ 7,120.00	0	0	0.0	2	3	17,800.0	0	0	0.0	0	0	0.0	1	5	35,600.0	1	2	14,240.0	0	0	0.0	1	1	3,560.0	2	3	21,360.0	1	1	7,120.0	0	0	0.0	0	0	0.0	8	99,680.0
Molino Vertical de Cemento 6	30,500.00	S/ 21,000.00	0	0	0.0	1	1	21,000.0	0	0	0.0	1	3	63,000.0	2	1	21,000.0	0	0	0.0	3	1	21,000.0	2	3	52,500.0	0	0	0.0	1	1	10,500.0	0	0	0.0	1	1	21,000.0	11	210,000.0
Embolsadora Haver 1	20,000.00	S/ 21,700.00	3	0.5	10,850.0	3	2	43,400.0	4	4	86,800.0	3	2	43,400.0	4	5	108,500.0	4	3	65,100.0	3	2	43,400.0	3	3	65,100.0	1	2	43,400.0	6	5	97,650.0	4	1	21,700.0	5	2	43,400.0	43	672,700.0
Embolsadora Haver 2	20,000.00	S/ 21,700.00	2	2	43,400.0	1	1	21,700.0	2	4	86,800.0	3	2	43,400.0	2	4	86,800.0	5	3	65,100.0	4	2	43,400.0	3	3	65,100.0	1	3	65,100.0	6	3	65,100.0	2	5	108,500.0	3	2	43,400.0	34	737,800.0
<b>TOTAL</b>	<b>264,500.00</b>		<b>8</b>	<b>5.5</b>	<b>115,500.0</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>291,700.0</b>	<b>10</b>	<b>17</b>	<b>338,850.0</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>256,430.0</b>	<b>20</b>	<b>33</b>	<b>475,215.0</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>283,720.0</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>355,250.0</b>	<b>24</b>	<b>26</b>	<b>427,850.0</b>	<b>16</b>	<b>21</b>	<b>354,455.0</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>504,050.0</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>404,525.0</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>410,325.0</b>	<b>213</b>	<b>4,217,870.0</b>

## Anexo 2

### Ficha de registro de falla de los equipos

FICHA DE REGISTRO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO						
<b>NOMBRE DEL EQUIPO</b>		Horno Rotativo de Clinkerización				
<b>TIPO DE EQUIPO</b>		Equipo de Proceso Cementero				
<b>ÁREA</b>		Planta de Producción				
<b>FECHA DE SOLICITUD DE MANTENIMIENTO</b>		(Por definir según el caso)				
<b>MARCA</b>	FLSmidth	<b>MODELO</b>	RKC 5500			
<b>UBICACIÓN</b>	Planta Cementera del Sur - Arequipa, Perú	<b>SERIE</b>	1234-5678-90			
<b>CÓDIGO INVENTARIO</b>		<b>CÓDIGO PROYECTO</b>				
<b>PERIODO CALIBRACIÓN</b>		<b>OBSERVACIONES</b>				
<b>MOTIVO DE REQUERIMIENTO DE MANTENIMIENTO:</b>						
<b>FECHA INSPECCIONES PROGRAMADAS - PLANIFICADAS</b>		<b>Anual</b>		<b>Semestral</b>		
		<b>Mensual</b>		<b>Diaria</b>		
<b>FECHA REALIZACIÓN (DÍA, MES, AÑO)</b>		<b>DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD</b>	<b>ORDEN DE COMPRA</b>	<b>COSTO</b>		
<b>MANTENIMIENTO PREVENTIVO</b>	<b>MANTENIMIENTO CORRECTIVO</b>					
<b>IDENTIFICACIÓN DE FALLAS</b>						
<b>TIPO DE FALLA</b>	<b>CAUSAS</b>					
OPERATIVA						
ADMINISTRATIVA						

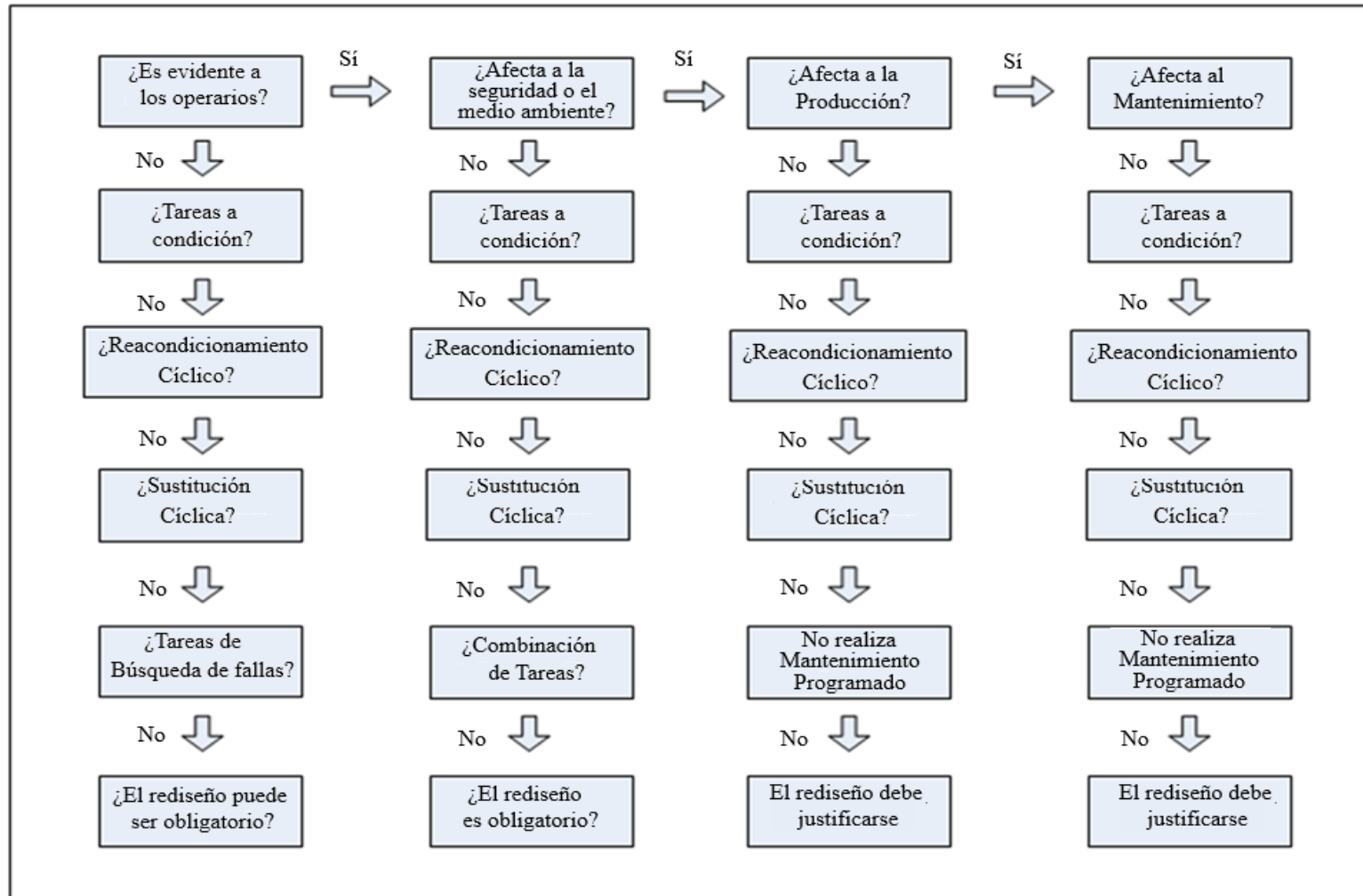
### Anexo 3

#### Ficha de observación de horno rotativo de clinkerización

<b>FICHA DE OBSERVACIÓN DE HORNO ROTATIVO DE CLINKERIZACIÓN</b>			
<b>CONTROL DE CALIDAD DE PRODUCTOS FABRICADOS</b>			
Elaborado por:		Ejecutado por:	
Ítem/s inspeccionado/s:		Fecha:	
Objetivo: Identificar la documentación. Registros y formatos de gestión de mantenimiento aplicado para el horno rotativo de clinkerización de la empresa cementera del Sur del país.			
	SI	NO	N/A
<b>1. Componentes Revisados</b>			
¿Los componentes críticos inspeccionados cumplen con los estándares definidos?			
¿Existen registros de inspección de los componentes clave?			
<b>2. Actividades realizadas</b>			
¿Se llevaron a cabo las tareas de mantenimiento de acuerdo con el cronograma establecido?			
¿Se usaron herramientas calibradas y adecuadas durante las intervenciones?			
¿Se documentaron las actividades con los registros correspondientes?			
<b>3. Incidencias y No Conformidades</b>			
¿Se detectaron fallas o incidentes relevantes durante la inspección?			
¿Las incidencias han sido reportadas y gestionadas conforme al procedimiento?			
Código incidencias relacionadas:			
<b>4. Tiempos de producción</b>			
¿Se respetaron los tiempos estipulados en el programa de mantenimiento?			
¿Hubo interrupciones no planificadas durante la operación?			
<b>5. Condiciones Finales</b>			
¿El horno rotativo quedó operando según los parámetros especificados?			
¿El equipo fue entregado limpio y en condiciones seguras?			

#### Anexo 4

#### Árbol lógico de decisión



## Anexo 5

*Imágenes del rectificado de llanta y rodillos del horno de clinkerización*



**Anexo 6**

*Planta de cemento*

