



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

INNOVACIÓN, MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DE HORNOS

CONVERTIDOR PEIRCE SMITH Y DE AFINO, Y MECANISMOS

DE PROCESAMIENTO DE COBRE

PRESENTADO POR

BACHILLER WILBERTH ISAIAS FLORES CUAYLA

ASESOR:

DR. ARTURO JESÚS COSI BLANCAS

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

MOQUEGUA – PERÚ

2023

ÍNDICE

	Pág.
PÁGINA DE JURADO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN	ix

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES DEL TEMA

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Descripción de cómo es y qué tipo de servicio otorga la organización.....	2
1.2.1 Nombre de la Empresa.	2
1.2.2 Ubicación de la Empresa.	2
1.2.3 Descripción y Organización de La Empresa.	2
1.3 Contexto económico, descripción del área de la institución, recurso.....	3
1.3.1 Costos de mano de obra:.....	3
1.3.2 Reparabilidad.	3
1.4 Descripción de la experiencia.....	3
1.5 Explicación de cargo, funciones ejecutadas	4
1.5.1 Cargo.....	4
1.5.2 Funciones.	4

1.6	Propósito del puesto.....	4
1.7	Producto o proceso que será objeto del informe.....	4
1.8	Resultados concretos que ha alcanzado en este periodo de tiempo.....	5
1.8.1	Mejora en la Disponibilidad.....	5
1.8.2	Mejora en la Disponibilidad.....	5
1.8.3	Reducción de Costos.....	5

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN

2.1	Explicación del papel que jugaron la teoría y la práctica en el desempeño laboral en la situación objeto del informe, como se integraron ambas para resolver problemas.....	6
2.2.1	Teoría.....	6
2.1.1.1	<i>Fundamentos Técnicos</i>	6
2.1.1.2	<i>Metodologías de Mantenimiento</i>	7
2.1.1.3	<i>Innovación y Mejora Continua</i>	7
2.2.1	Practica.....	7
2.1.2.1	<i>Implementación de Soluciones</i>	7
2.1.2.2	<i>Seguimiento y Evaluación</i>	7
2.1.2.3	<i>Evaluación de Resultados</i>	7
2.2	Descripción de las acciones, metodología y procedimiento a los que se recurrió para resolver la situación profesional objeto del informe	8

2.2.1	Mantenimiento.....	8
2.2.2	Los Costos del Mantenimiento.....	8
2.2.3	Terminología del Mantenimiento.....	9
2.2.4	Mantenimiento Correctivo Frente al Preventivo.....	12
2.2.5	Gestión del Mantenimiento.....	13
2.2.6	Clases o Tipos de Mantenimientos.....	14
	2.2.6.1 <i>Mantenimiento Preventivo (MP)</i>	14
	2.2.6.2 <i>Mantenimiento Correctivo</i>	21
	2.2.6.3 <i>Mantenimiento Predictivo</i>	26
2.3	Proceso de Obtención del Cobre.....	73
2.4	Características del Convertidor Pierce Smith.....	74
2.5	Conversión de Eje y Metal Blanco para Producir Cobre Blíster.....	78
2.6	Descripción de Los Equipos que Componen El Proceso.....	79
2.6.1	El Reactor.....	80
2.6.2	Máquina para El Punzado de Las Toberas.....	81
2.6.3	Alimentación de Fundente.....	83
2.6.4	Dotación de Oxígeno Técnico y Aire Comprimido.....	83
2.6.5	Sistema de Mando Motriz.....	85

CAPÍTULO III

APORTES Y DESARROLLO DE EXPERIENCIAS

3.1	Aportes utilizando los conocimientos o bases teóricas adquiridos durante la
-----	---

carrera	87
3.1.1	Comprender los Principios de Operación..... 87
3.1.2	Diseño de la Boca Bridada 87
3.2	Desarrollo de experiencias 88
3.2.1	Descripción de Los Trabajos Realizados..... 88
3.2.1.1	Fabricación de Boca Bridada..... 88
3.2.1.2	Proceso de Fabricación de Boca Bridada. 88
3.2.3	Materiales y Equipos Utilizados..... 90
3.2.3.1	<i>Equipos, Máquinas y Herramientas</i> 91
3.2.3.2	<i>La Mano de Obra</i> 92
3.3.4	Reparaciones del Horno Pierce Smith..... 93
3.3.4.1	<i>Reparaciones</i> 93
3.3.4.2	<i>Mantenimiento de mecanismos del horno Peirce Smith</i> . .. 97
3.4	Presentación de Los Resultados..... 104
3.4.1	Resultados de Las Intervenciones en El Horno CPS..... 104
3.4.2	Personal. 105
3.4.3	Prevención de Accidente y Equipos de Protección Personal. 106
CONCLUSIONES109	
RECOMENDACIONES111	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....112	

ANEXOS	115
--------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Equipo y procesos que suelen controlarse el análisis de vibración.....	31
Tabla 2 Características Geométrica Peirce Smith Fundición Chuquicamata.....	80
Tabla 3 Implementos de Protección Personal	106

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Organigrama de la Empresa Southern Perú.....	3
Figura 2 Costes de PM y Mc Frente a Esfuerzos de PM	13
Figura 3 Clasificación de Mantenimiento Basado en la Condición.....	14
Figura 4 Concepto de Matenimiento Basado en la Condición.....	18
Figura 5 Impacto de la Acción MP en la Tasa de Fallos de Sistema	21
Figura 6 Acciones de matenimiento de la tasa de Fallos del Sistema.....	26
Figura 7 Movimiento Periódico	32
Figura 8 Pequeñas oscilaciones de un pendulo simple, función armónica	33
Figura 9 Perfil de vibración para una pienza maquiñaría	34
Figura 10 Curvas Discretas y Totales en el Domino del Tiempo	35
Figura 11 Firma Tipica de Vibración en el Domino de la Frecuencia.....	37
Figura 12 Emisiones de Energía	42
Figura 13 Emisiones de cuerpo negro.....	43
Figura 14 Emisiones de cuerpo grises.....	43
Figura 15 Proceso de Fundición de Cobre	74
Figura 16 Convertidor Peirce-Smith con sus Flujos y partes Principales	75
Figura 17 Convertidor Peirce Smith	75
Figura 18 Diagrama de Flujo de la Nueva Fundición de Ilo.....	76
Figura 19 Diagrama de Entrada/Salida Proceso Conversion Preice Smith.....	78
Figura 20 Convertidor Peirce-Smith-vista desde Líena de Toberas	81
Figura 21 Convertidor Peirce-Smith-vista desde Boca de Carguío	81
Figura 22 Máquina para Punzado	83
Figura 23 Sistema de Dotación de Oxigeno de Aire Comprimido	84
Figura 24 Sistema de Mando de Motriz.....	86

Figura 25 Convertidor Peirce Smith	90
Figura 26 Vista de la Estructura de la Boza Bridada, Lado Superior	93
Figura 27 Vista de la Estructura de la Boca Bridada, Lado Lateral.....	93
Figura 28 Muestra de Ladrillo Desgastados Parte Boca de CPS	95
Figura 29 Vista de Interior del Horno	96
Figura 30 Boca de Convertidor Peirce Smith	96
Figura 31 Superficie del Ladrillo Nuevo	97
Figura 32 Sistema de Punzado de Toberas	98
Figura 33 Motores Eléctricos del Horno Convertidor.....	99
Figura 34 Sistema de Frenos Magnéticos	100
Figura 35 Caja de Reducción	102
Figura 36 Eje de Cardán	102
Figura 37 Tornillo sin Fin	104

RESUMEN

El presente trabajo de suficiencia profesional tiene como propósito general describir la metodología en el mantenimiento de los hornos convertidores Peirce Smith y equipos auxiliares en la Fundición Ilo de la empresa Southern Perú Cooper Corporation para incrementar los indicadores de confiabilidad y disponibilidad. Se dio inicio con el diseño de una nueva Boca Bridada del horno, en reemplazo de las bocas soldadas anteriores, luego se realizó el seguimiento a la planificación de mantenimiento basándonos en las herramientas de la metodología, posteriormente se procedió a efectuar la reparación general de refractarios y componentes. Pasados 17 días se constató que los trabajos efectuados brindan la satisfacción de poder sentirnos dentro de la carrera constante de la mejora continua. La información descrita en el informe se refiere a la experiencia vivida en la INNOVACION, MANTENIMIENTO Y REPARACION DE HORNOS CONVERTIDOR PEIRCE SMITH Y DE AFINO, Y MECANISMOS DE PROCESAMIENTO DE COBRE.

Palabras clave: Convertidor Peirce Smith, innovación, mantenimiento, seguridad.

ABSTRACT

The present work of professional sufficiency has as a general objective to describe the methodology in the maintenance of the Peirce Smith converter furnaces and auxiliary equipment in the Ilo Smelter of the company Southern Peru Copper Corporation to increase the reliability and availability indicators. It began with the design of a new Flanged Mouth of the oven, replacing the previous welded mouths, later. Maintenance planning was followed up based on the methodology tools, later the general repair of refractories and components was carried out. After 17 days, it was verified that the work carried out provides the satisfaction of being able to feel within the constant race of continuous improvement. The information described in the report refers to the experience lived in the INNOVATION, MAINTENANCE AND REPAIR OF PEIRCE SMITH CONVERTER AND REFINING FURNACES, AND COPPER PROCESSING MECHANISMS.

Keywords: Peirce Smith converter, innovation, maintenance, safety.

INTRODUCCIÓN

El informe de trabajo que estoy presentando se refiere a mis actividades cotidianas que desarrollé, durante mi jornada laboral, que como trabajador estable de la empresa Southern Perú Cooper Corporation, en la Fundición de Ilo, para formar parte del equipo de “Innovación, Mantenimiento Y Reparación De Hornos Convertidor Peirce Smith Y De Afino, Y Mecanismos De Procesamiento De Cobre”, el cual realizamos con éxito cumpliendo las actividades planificadas y programadas en el plazo previsto.

Dicho informe está elaborado con cuatro capítulos. Donde detallamos datos exactos de la empresa, de las actividades desarrolladas, según coordinaciones con las jefaturas de SPCC. En el primer capítulo, apreciamos aspectos generales del tema, razón social de la empresa. Ubicación de la empresa, descripción de la empresa, organización y lugares donde se realizó el trabajo. En el capítulo dos, precisamos el fundamento teórico, memoria del proyecto, alcances del proyecto, descripción integral del proyecto. En el capítulo tres, reconocemos el paso del desarrollo de las actividades realizadas. Capítulo cuatro, entramos a las conclusiones. En el capítulo cinco, observamos los anexos y fotos de trabajos ejecutados. (Inquilla, 2022)

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES DEL TEMA

1.1 Antecedentes

La Fundición de Ilo se ubica aproximadamente a 17 Km al Norte del Puerto de Ilo en la región de Moquegua; forma parte del complejo minero-metalúrgico de Southern Perú Copper Corporation (SPCC), que es una de las entidades mineras más extensas en el Perú y una de las diez compañías más grandes del mundo que produce cobre. El complejo minero-metalúrgico de SPCC está constituido por las minas y concentradoras de Toquepala y Cuajone, Extracción por Solventes, una Planta de Lixiviación, Electrodeposición, Una Fundición de concentrados y una Refinería de Cobre.

Inicialmente, la Fundición de Ilo estaba compuesta por dos hornos Reverbero, siete Convertidores Peirce-Smith (CPS), un Convertidor Modificado Teniente (CMT), una Planta de Ácido Sulfúrico, una Planta de Oxígeno, dos Plantas de Moldeo y diversas instalaciones auxiliares. En febrero de 2007, como parte de su compromiso con el Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA), la fundición inició la operación de un nuevo horno de fusión llamado Horno Isasmelt. Este nuevo horno reemplazó dos Hornos de Reverbero y un Convertidor Teniente, este último instalado en 1995. La capacidad de fusión de la fundición actual se

diseñó para mantener una producción anual constante de 1,200,000 toneladas de concentrados de cobre.

El Horno Isasmelt se encuentra conectado a un caldero de recuperación de calor y un precipitador electrostático. Además, la fundición cuenta con cuatro convertidores Pierce Smith, dos en funcionamiento, uno en reserva y otro en mantenimiento. También se dispone de tres precipitadores electrostáticos, dos plantas de ácido, dos plantas de oxígeno, dos plantas de tratamiento de efluentes, una planta de moldeo de ánodos, dos hornos para el procesamiento de escoria y diversas instalaciones auxiliares de servicios. (Mory et al., 2018).

1.2 Descripción de cómo es y qué tipo de servicio otorga la organización

1.2.1 Nombre de la Empresa.

SPCC – Empresa Southern Perú Copper Corporation

1.2.2 Ubicación de la Empresa.

GJ3Q+2W4, Moquegua 18610

1.2.3 Descripción y Organización de La Empresa.

La Fundición de Ilo de SPCC inicia sus operaciones en el año 1960, buscando que la región sur del Perú se convierta en un polo de desarrollo de la actividad económica y social, además de ser líder en su rama, logrando alcanzar altos niveles de competitividad de la filosofía y la calidad de sus productos.

Figura 1

Organigrama de la Empresa Southern Perú.



1.3 Contexto económico, descripción del área de la institución, recurso

1.3.1 Costos de mano de obra:

La soldadura a menudo requiere habilidades especializadas y tiempo adicional para preparar y realizar las uniones. Utilizar bridas o sistemas de embridado puede ser más rápido y, por lo tanto, menos costoso en términos de mano de obra.

1.3.2 Reparabilidad.

En un contexto de mantenimiento, la facilidad de acceso y reparación puede influir en la elección entre soldar y embridar. Si algo necesita repararse con frecuencia, la facilidad de desmontaje y reemplazo de componentes favorece el uso de bridas.

1.4 Descripción de la experiencia

En mi centro de trabajo pude observar y experimentar, que soldar interiormente el Horno Convertidor peirce Smith es peligroso tanto para mí como el

personal encargado. La ineficiencia que tiene este horno de su procedimiento del soldeo por dentro y por fuera es más demoroso y riesgoso con una duración de 17 días.

1.5 Explicación de cargo, funciones ejecutadas

1.5.1 Cargo

Es responsabilidad que te da la empresa para ejecutar ese proyecto y estar a cargo.

1.5.2 Funciones.

Dirigir al personal que se tiene que ejecutar el trabajo con bastante comunicación.

1.6 Propósito del puesto

Aplicar conocimientos y destreza adquiridos en las aulas universitarias y accionarlas a la práctica a través de la ejecución de trabajos o proyectos relacionados con el campo de la ingeniería mecánica eléctrica, participando directamente en la actividad programada por la Empresa Southern Perú Cooper Corporation denominada “Innovación Mantenimiento Y Reparación De Hornos Convertidor Peirce Smith Y De Afino, Y Mecanismos De Procesamiento De Cobre”.

1.7 Producto o proceso que será objeto del informe

El producto o proceso que será objeto del informe es el "Mantenimiento de los Hornos Convertidores Peirce Smith y Equipos Auxiliares" en la Fundición Ilo de la empresa Southern Perú Cooper Corporation. Este proceso de mantenimiento incluye diversas etapas, como el diseño de una nueva "Boca Bridada" del horno, el seguimiento a la planificación de mantenimiento, y la reparación general de

refractarios y componentes de los hornos convertidores. El informe se centra en describir la metodología empleada en este mantenimiento con el propósito de mejorar los indicadores de confiabilidad y disponibilidad de estos equipos y, en última instancia, contribuir a la mejora continua en el proceso de afinado y procesamiento de cobre.

1.8 Resultados concretos que ha alcanzado en este periodo de tiempo

1.8.1 Mejora en la Disponibilidad.

Se pudo realizar una reducción en el tiempo de la Boca Embridado para los hornos convertidores, lo que significa que los equipos están disponibles para operar de manera más consistente.

1.8.2 Mejora en la Disponibilidad.

Los indicadores de confiabilidad podrían haber mejorado, lo que se traduce en una menor probabilidad de fallas o interrupciones en el proceso de producción.

1.8.3 Reducción de Costos.

Es posible que el mantenimiento más eficiente haya llevado a una reducción de costos operativos y de reparación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

2.1 Explicación del papel que jugaron la teoría y la práctica en el desempeño laboral en la situación objeto del informe, como se integraron ambas para resolver problemas

La teoría y la práctica desempeñaron papeles complementarios y esenciales en el éxito de la situación objeto del informe, que involucraba la innovación, mantenimiento y reparación de los hornos convertidores Peirce Smith y equipos auxiliares en la Fundición Ilo de la empresa Southern Perú Cooper Corporation.

2.2.1 Teoría.

2.1.1.1 Fundamentos Técnicos.

La teoría proporcionó los fundamentos técnicos necesarios para comprender el funcionamiento de los hornos convertidores, los procesos de fusión y conversión del cobre, así como los principios de mantenimiento de equipos industriales. Esto permitió a los profesionales involucrados en el proyecto tener un conocimiento sólido de la materia y comprender la ciencia detrás de los procesos.

2.1.1.2 Metodologías de Mantenimiento.

La teoría proporcionó las metodologías y enfoques de mantenimiento que se utilizarían para optimizar el rendimiento y la confiabilidad de los equipos. Esto incluyó técnicas de planificación, programación y control de mantenimiento.

2.1.1.3 Innovación y Mejora Continua.

La teoría también desempeñó un papel en la fase de innovación, ya que proporcionó el marco para el diseño de la nueva "Boca Bridada" en lugar de las bocas soldadas anteriores. Se basó en el conocimiento teórico y la investigación para proponer una solución más segura y eficiente.

2.2.1 Práctica.

2.1.2.1 Implementación de Soluciones

La práctica se centró en la implementación real de las soluciones propuestas. Esto incluyó la fabricación e instalación de la nueva "Boca Bridada", así como la reparación de refractarios y componentes. La práctica convirtió las ideas teóricas en acciones concretas.

2.1.2.2 Seguimiento y Evaluación

Durante el proceso de 17 días, la práctica permitió el seguimiento en tiempo real de las tareas de mantenimiento, la observación de problemas o desafíos que surgieran y la toma de medidas correctivas según fuera necesario.

2.1.2.3 Evaluación de Resultados

Al final del período, la práctica permitió evaluar los resultados concretos, como la reducción del tiempo de inactividad no planificado, el aumento de la confiabilidad y la mejora en la calidad del producto. Esto proporcionó datos tangibles sobre el impacto de las acciones tomadas.

2.2 Descripción de las acciones, metodología y procedimiento a los que se recurrió para resolver la situación profesional objeto del informe

Para resolver la situación profesional objeto del informe, que se centra en la mejora de la confiabilidad y disponibilidad de los hornos convertidores Peirce Smith y equipos auxiliares en la Fundición Ilo de Southern Perú Cooper Corporation.

2.2.1 Mantenimiento.

El mantenimiento abarca dos aspectos esenciales: en primer lugar, se enfoca en controlar o prevenir los procesos de deterioro que pueden llevar a la falla de un objeto técnico y, en segundo lugar, se ocupa de restaurar dicho objeto a su condición operativa mediante medidas correctivas después de que se ha producido una falla. El primero de estos aspectos recibe el nombre de mantenimiento preventivo (PM), mientras que el segundo se conoce como mantenimiento correctivo (CM).

En esencia, el mantenimiento se refiere a la combinación de todas las acciones técnicas y administrativas relacionadas, cuyo propósito es conservar un elemento en un estado que le permita cumplir con su función requerida, o bien, restaurarlo a dicho estado en caso de que haya experimentado una falla.

2.2.2 Los Costos del Mantenimiento.

Los costes de mantenimiento pueden dividirse en dos grandes categorías:

Los costes directos se refieren a los gastos directamente asociados con las tareas de mantenimiento y reparación. Esto incluye el costo de la mano de obra necesaria para llevar a cabo las labores de mantenimiento, el coste de los materiales

y las piezas de repuesto utilizados, los honorarios de los contratistas contratados para trabajos específicos y los costes relacionados con las infraestructuras utilizadas en el proceso.

Por otro lado, los costes indirectos se originan a raíz de problemas no planificados en el mantenimiento, como fallos inesperados o medidas de reparación urgentes. Estos costes incluyen la pérdida de ingresos debida a la interrupción de la producción a causa de las tareas de mantenimiento y reparación, así como gastos relacionados con accidentes, retrasos, pólizas de seguro, y otros imprevistos. Por lo general, los costes indirectos son considerablemente más altos que los costes directos y varían según la naturaleza del proyecto o la instalación en cuestión. Medir estos costes indirectos puede ser complicado, pero suelen igualar o incluso superar los costes directos en términos generales.

Además, es importante destacar que los costes de mantenimiento tienden a aumentar con el tiempo debido al envejecimiento de los equipos e instalaciones, así como al incremento de los costes laborales. Esto plantea un desafío significativo tanto para empresas como para entidades gubernamentales, ya que la gestión eficiente del mantenimiento se vuelve crucial para evitar estos crecientes costes y garantizar el funcionamiento óptimo de las instalaciones a lo largo del tiempo. (Mohamed, 2016).

2.2.3 Terminología del Mantenimiento.

Utilizamos la siguiente terminología propuesta por Pintelon y Parodi-Herz (2008)

- Acción de mantenimiento. Intervención básica de mantenimiento, tarea elemental realizada por un técnico (¿Qué hacer?).

- Política de mantenimiento. Regla o conjunto de reglas que describen el mecanismo de activación de las diferentes acciones de mantenimiento (¿Cómo se activan?).
- Concepto de mantenimiento. Conjunto de políticas y acciones de mantenimiento de diversos tipos y la estructura general de decisión en la que se planifican y apoyan. (La lógica y la solución de mantenimiento utilizadas).

Las acciones de mantenimiento de un elemento incluyen las siguientes:

- a) Inspección. Verificación de la conformidad midiendo, observando, probando o calibrando las características relevantes de un artículo. Generalmente, las inspecciones se pueden realizar antes, durante o después de otros trabajos de mantenimiento.
- b) Prueba de conformidad. Ensayo utilizado para demostrar si una característica o una propiedad del artículo cumple o no la especificación establecida.
- c) Control. Actividad realizada manual o automáticamente que tiene por objeto observar el estado real del elemento. La supervisión se distingue de la inspección en que se utiliza para evaluar cualquier cambio en algunos parámetros del equipo con el tiempo. La supervisión puede ser continua, durante un intervalo de tiempo o tras un número determinado de operaciones. La supervisión suele realizarse en estado de funcionamiento.
- d) Mantenimiento ordinario. Actividades de mantenimiento elementales, regulares o repetidas, que no suelen requerir cualificación, autorización(es) o herramientas especiales. El mantenimiento rutinario puede incluir, por

ejemplo, limpieza, apriete de conexiones, comprobación del nivel de líquido, lubricación, etc.

- e) **Revisión.** se refiere a un conjunto de investigaciones y acciones llevadas a cabo con el fin de garantizar que el dispositivo mantenga el nivel necesario de disponibilidad y seguridad. Estas revisiones pueden llevarse a cabo en momentos programados previamente o después de un cierto número de operaciones, y en algunos casos, pueden implicar la desinstalación parcial o completa del artículo en cuestión.
- f) **Reconstrucción** es el proceso posterior al desmontaje de un elemento, donde se realizan reparaciones o sustituciones de componentes que están cerca de su vida útil o que requieren reemplazo periódico. El propósito principal de la reconstrucción suele ser prolongar la vida útil del artículo, a menudo superando la vida útil del equipo original. A diferencia de una revisión, la reconstrucción puede incluir mejoras y modificaciones en el proceso.

entendidas de la siguiente manera:

- **Mejora:** Combinación de todas las medidas técnicas, administrativas y de gestión destinadas a mejorar la fiabilidad del elemento sin cambiar la funcionalidad requerida.
- **Modificación:** En este caso, se engloba un conjunto de acciones técnicas, administrativas y de gestión que tienen como objetivo modificar la función requerida del elemento. Es importante destacar que la modificación no se considera una acción de mantenimiento en sí, ya que implica el cambio de la función original del elemento hacia una nueva función requerida. Estos cambios pueden tener un impacto en la confiabilidad, el rendimiento del

elemento, o incluso en ambos

- g) Reparación: Acción física realizada para restablecer el funcionamiento necesario de un equipo averiado. Dentro de una reparación podemos encontrar normalmente las siguientes acciones:
- Diagnóstico de averías: Acciones realizadas para el reconocimiento de averías, localización de averías y aislamiento de averías en el nivel de indentación adecuado e identificación de la causa.
 - Corrección de averías: Acciones tomadas después del diagnóstico de fallos para poner el elemento en un estado en el que pueda realizar una función requerida.
 - Comprobación de funcionamiento: Acción tomada después de las acciones de mantenimiento para verificar que el elemento es capaz de realizar la función requerida.
- h) Mantenimiento de Parada: Parada planificada y periódica (total o parcial) de una planta (refinería, planta química, central eléctrica, etc.) para realizar actividades de revisión y reparación e inspeccionar, probar y sustituir materiales de proceso (catalizador en una planta química). Las paradas son costosas, tanto por la pérdida de producción (varias semanas de duración) como por los costes directos de mano de obra, herramientas, equipos pesados y materiales utilizados para ejecutar el proyecto. (Mohamed, 2006)

2.2.4 Mantenimiento Correctivo Frente al Preventivo.

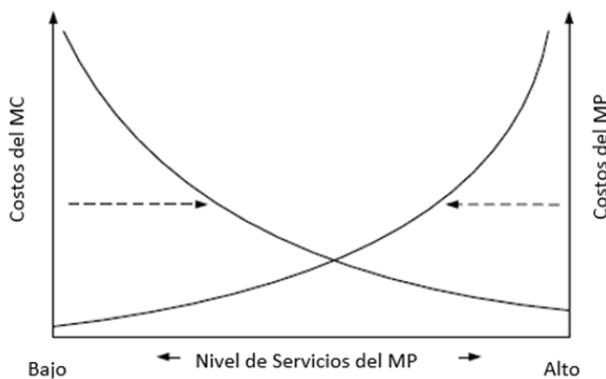
Como ya se ha mencionado, existen dos tipos de mantenimiento: preventivo (MP) y correctivo (MC). La realización del mantenimiento implica costes adicionales para los propietarios (particulares, empresas y organismos

públicos). A medida que aumenta el servicio de mantenimiento preventivo, aumentan los costes de mantenimiento preventivo y disminuyen los de mantenimiento correctivo, como muestra la figura 2.1

El coste total (costes MP y MC) tiene forma convexa, lo que indica que existe un nivel óptimo de esfuerzo MP. (Mohamed, 2016)

Figura 2

Costes de MP y MC frente a Esfuerzo de PM.



2.2.5 Gestión del Mantenimiento.

La gestión del mantenimiento se ocupa de la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento (por ejemplo, contratación de mano de obra cualificada, asignación y programación de recursos, etc.) en los niveles estratégico, táctico y operativo, y de la puesta en marcha de acciones para aplicar las decisiones.

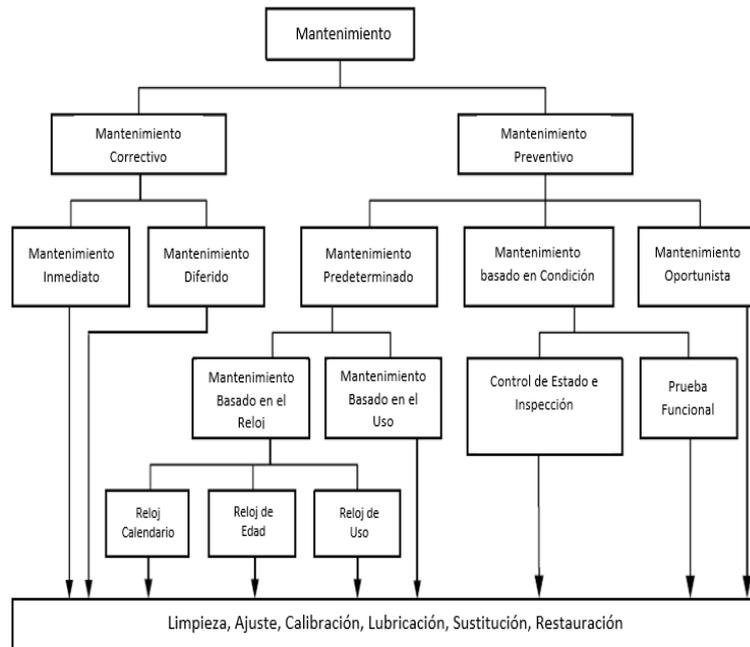
Las empresas y los organismos públicos deben tomar decisiones relativas al mantenimiento de los objetos de ingeniería en tres niveles diferentes: estratégico, táctico y operativo. Un mantenimiento adecuado con inspecciones periódicas en servicio de un objeto de ingeniería influye positivamente en el estado técnico del objeto y puede prolongar considerablemente su vida útil. Se necesita un marco adecuado para planificar y ejecutar las decisiones, y los datos desempeñan un papel importante.

2.2.6 Clases o Tipos de Mantenimientos.

Se muestra una forma eficaz de agrupar las distintas acciones (y políticas) de mantenimiento en una jerarquía de varios niveles en la siguiente Figura 3.

Figura 3

Clasificación de Acciones de Mantenimiento.



2.2.6.1 Mantenimiento Preventivo (MP).

2.2.6.1.1 Acciones del Mantenimiento Preventivo.

Las acciones de mantenimiento preventivo (MP) se llevan a cabo de acuerdo con criterios prescritos de tiempo, uso o condición y tienen por objeto reducir la probabilidad de fallo o la degradación funcional de un elemento.

Las acciones MP suelen requerir la puesta fuera de servicio de un elemento operativo y tienen por objeto aumentar la duración de su vida útil y/o su fiabilidad. Las acciones MP se llevan a cabo generalmente en instantes de tiempo discretos. Las acciones pueden ir desde servicios relativamente menores que requieren un

breve tiempo de inactividad, como inspección visual, lubricación, pruebas, sustitución planificada de piezas o componentes, etc., hasta revisiones importantes que requieren un tiempo de inactividad considerable, una planificación adecuada y recursos suficientes.

Los objetivos de las acciones de MP son:

- Prevenir el fracaso.
- Detectar el inicio del fallo: Aunque no podamos evitar un fallo, a menudo sabemos cómo detectar su aparición. Nuestro conocimiento de cómo hacerlo aumenta cada día gracias a la tecnología de monitorización del estado.
- Encontrar fallos ocultos: Comprobar si se ha producido un fallo antes de que el equipo entre en servicio.

Las acciones de mantenimiento preventivo pueden agruparse en mantenimiento predeterminado, mantenimiento basado en el estado y mantenimiento oportunista, como se muestra en la Figura 3. Estas acciones implican algún tipo de intrusión en el sistema de mantenimiento. (Mohamed, 2016)

2.2.6.1.1.1 Acciones de Mantenimiento Predeterminadas.

Una acción de Mantenimiento Preventivo predeterminada tiene las siguientes características:

- La acción se lleva a cabo en instantes de tiempo discretos determinados por alguna regla predeterminada.
- El momento de la acción implica un reloj o una medida del uso (por ejemplo, la producción).

Las acciones MP predeterminadas pueden dividirse a su vez en dos subcategorías: (i) basadas en el reloj y (ii) basadas en el uso.

a) Acciones de Mantenimiento Basadas en El Reloj.

Se pueden definir tres tipos de relojes y, como resultado, tenemos otras tres subcategorías de acciones de mantenimiento predeterminadas, como se muestra en la Figura 3.

- *Reloj Calendario.* Se trata del conocido reloj con una hora de inicio fija: el comienzo de un nuevo año. Por tanto, las acciones de mantenimiento se llevan a cabo en instantes de tiempo predeterminados en función de este reloj. Una política de este tipo es la sustitución en bloque utilizada para una flota de elementos idénticos (como las bombillas de un suburbio urbano) en la que todos ellos se sustituyen periódicamente.
- *Reloj de Edad.* Aquí se utiliza el conocido reloj que se pone a cero cuando un artículo se pone en uso. Las acciones PM se llevan a cabo en instantes de tiempo predeterminados utilizando este reloj. En otras palabras, las acciones PM se basan en que un artículo alcance cierta edad.

Los dos relojes anteriores funcionan de forma continua, y son apropiados para artículos en funcionamiento continuo a lo largo del tiempo. El siguiente reloj es apropiado para elementos utilizados de forma intermitente.

- *Reloj de uso.* En este caso, se utiliza el reloj de edad que se detiene cuando el elemento no está en uso (ya sea debido a la inactividad, o en virtud de MP o MC acción). Un ejemplo es el reloj de uso que registra el número de horas de vuelo de un motor de avión.

b) Acciones de Mantenimiento Basadas en El Uso.

Las acciones de MP se basan en el uso del elemento. El uso puede medirse de diferentes formas, como la producción (número de copias realizadas por una

fotocopiadora, número de despegues y aterrizajes de un tren de aterrizaje, número de toneladas producidas, etc.). Esto es adecuado para elementos de diversos sectores (como la fabricación, el transporte, etc.) que se utilizan de forma continua o intermitente.

Las acciones MP predeterminadas basadas en un reloj calendario son más fáciles de administrar que las que utilizan relojes basados en la edad o el uso. Sin embargo, estas últimas reflejan la degradación de una manera más sensata y, por tanto, son preferibles en muchos casos. (Mohamed, 2016)

2.2.6.1.1.2 Acciones de Mantenimiento Basadas en La Condición.

Una acción de mantenimiento preventivo basado en la condición es una acción que tiene las siguientes características:

- Existe un parámetro medible que se correlaciona con la degradación a lo largo del tiempo y el inicio del fallo.
- Los cambios en el parámetro medible se obtienen a partir de los datos recogidos mediante técnicas apropiadas de supervisión del estado.
- La recopilación de datos no suele requerir la intrusión en el objeto.

De esta definición se desprende que el factor más importante es la capacidad de identificar un parámetro medible que proporcione una correlación entre la medición y el nivel de degradación.

La combinación de la comprensión de los mecanismos de fallo, la disponibilidad de la tecnología de medición adecuada y las herramientas de análisis es vital para la aplicación del Mantenimiento basada en la condición.

El parámetro seleccionado puede proporcionar una medición directa o indirecta de la degradación. Un ejemplo de medición indirecta es la monitorización

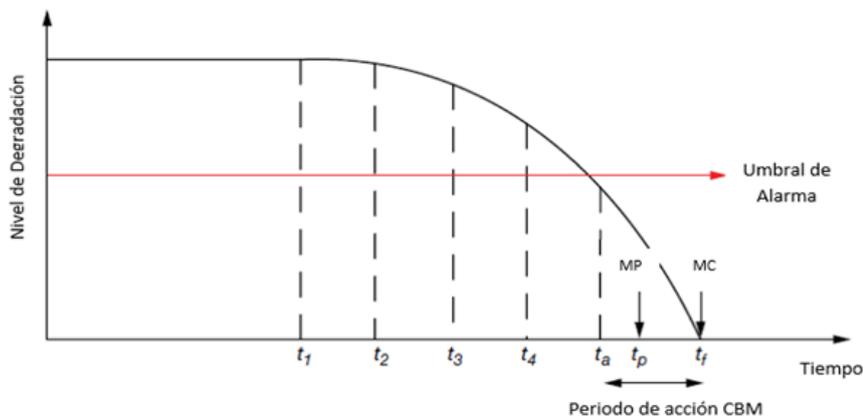
de la degradación de los rodamientos basada en el análisis de los restos de partículas en el aceite lubricante. El parámetro puede monitorizarse de forma continua o indirecta.

El parámetro puede controlarse de forma continua o en momentos puntuales, en línea o en fuera de línea y, en el caso de la supervisión en momentos concretos, es necesario determinar la frecuencia de supervisión.

La Figura 4 ilustra el concepto de CBM. La supervisión periódica de la degradación se produce en los instantes de tiempo t_1, t_2, \dots . Se trata de acciones de MP para evaluar el estado. La inspección en el momento t_a (el primer momento después de cruzar el umbral de alarma) es el punto de partida de un intervalo CBM. Obsérvese que t_p representa un tiempo posible para la acción CBM y t_f es un tiempo de fallo si no se ha tomado una acción MBC para ese momento. Más allá de t_f se requiere una MC que suele ser mucho más costosa que la acción preventiva para mejorar el estado mediante alguna acción apropiada.

Figura 4

Concepto de Mantenimiento Basado en La Condición.



Como se muestra en la Figura 3, las acciones CBM pueden dividirse a su vez en las dos categorías siguientes:

- Pruebas funcionales;
- Control de Estado e Inspección.

En ambos casos, los datos se analizan para evaluar la condición o el estado del elemento. En el primer caso, la atención se centra en decidir si hay que tomar medidas inmediatas (como reparar o no), mientras que en el segundo se trata de extrapolar la degradación al futuro (mediante el análisis de tendencias) y predecir cuándo podría ser necesario actuar. Así se dispone de tiempo para planificar adecuadamente las actividades de mantenimiento y los recursos necesarios. Una comprensión adecuada de los mecanismos de fallo es fundamental para la CBM, y se necesita una modelización adecuada para predecir la vida residual y planificar estrategias de mantenimiento eficaces.

Las acciones predeterminadas de MP no pueden evitar muchos fallos de los elementos porque no tienen en cuenta su estado. La única forma de reducir la probabilidad de fallo es mediante sustituciones tempranas. El resultado es el descarte de la vida útil restante. Con CBM se reduce el descarte de vida útil y, por tanto, CBM es más deseable que PM predeterminado. Sin embargo, esto se consigue con el gasto adicional de tecnologías (sensores para recoger datos, análisis de datos, construcción de modelos, etc.). Por lo tanto, para los objetos caros, la opción preferida es la CBM, mientras que para los baratos es más apropiada la PM predeterminada. (Mohamed, 2016)2.2.6.1.1.3 *Acciones de Mantenimiento Oportunista.*

Las acciones de mantenimiento oportunistas se llevan a cabo en momentos convenientes que son imprevisibles y pueden clasificarse a grandes rasgos en los dos grupos siguientes:

- Internas al objeto: Fallo de un componente que ofrece la oportunidad de llevar a cabo acciones de MP en algunos de los componentes que no han fallado.
- Externo al objeto: El objeto se encuentra en estado de inactividad debido a factores externos (como el cese de la producción debido a la falta de insumos o el exceso de inventario que resulta en un cierre temporal de la planta) proporciona una oportunidad para llevar a cabo acciones de MP.

Como resultado, las acciones de mantenimiento oportunista se utilizan ampliamente en la minería, la fabricación y las industrias de transformación.

2.2.6.1.2 Efecto de las Acciones de MP en la Fiabilidad del Artículo.

Dado que la gestión del mantenimiento puede considerarse una forma de compensar la falta de fiabilidad de un artículo, las acciones de mantenimiento tienen un efecto significativo sobre la fiabilidad y los fallos futuros. En función de este efecto, las acciones del MP pueden clasificarse en las dos categorías siguientes: (i) MP perfecto y (ii) MP imperfecto.

2.2.6.1.2.1 Mantenimiento Preventivo Perfecto.

Con el MP perfecto, un elemento se restaura a un estado "tan bueno como nuevo". La sustitución de un elemento por otro nuevo es un ejemplo de MP perfecto. Por tanto, la tasa de fallos del sistema en el momento t viene dada por $h_1(t) = h_0(t - \tau)$ para $t > \tau$, donde τ indica el instante de tiempo en el que se realiza el MP y $h_0(.)$ es la tasa de fallos de un sistema nuevo, como se indica en la figura 2.4.

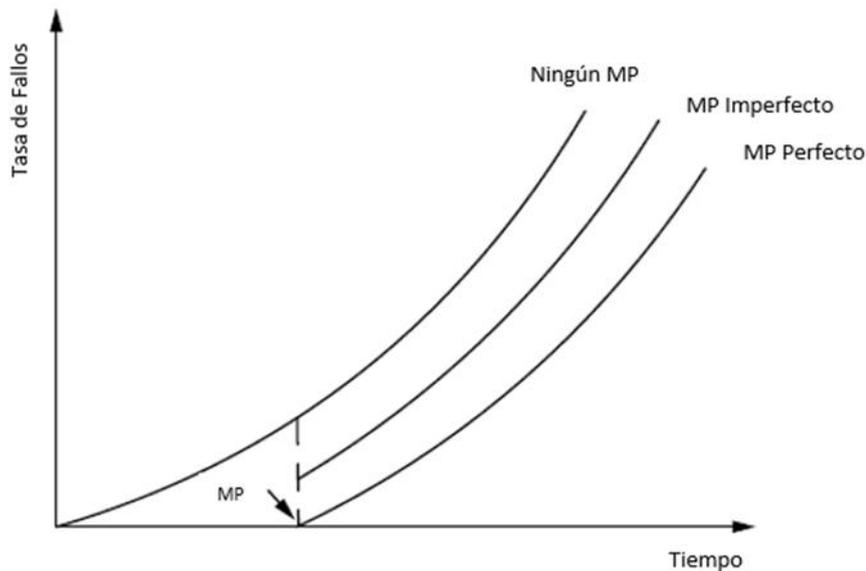
2.2.6.1.2.2 Mantenimiento Preventivo Imperfecto.

El MP imperfecto hace que la fiabilidad del elemento mejore hasta situarse

entre un estado "tan malo como el anterior" y uno "tan bueno como el nuevo". La puesta a punto de un motor es un ejemplo de MP imperfecto, ya que esta acción puede no dejar el motor como nuevo, pero mejora algo su rendimiento. En este caso, la tasa de fallos después de la MP es menor que justo antes del fallo, por lo que la tasa de fallos del artículo en el momento t , $t > \tau$, viene dada por $h_2(t)$ con $h_0(t) > h_2(t) > h_1(t)$, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Impacto de la Acción MP en la Tasa de Fallos del Sistema.



2.2.6.2 Mantenimiento Correctivo.

La principal diferencia entre el mantenimiento correctivo y el preventivo es que debe existir un problema antes de adoptar medidas correctivas. Las tareas preventivas tienen por objeto evitar que se produzca un problema. Las tareas correctivas corrigen los problemas existentes.

El mantenimiento correctivo, a diferencia del mantenimiento de averías, se centra en realizar tareas regulares y planificadas que mantendrán toda la maquinaria y los sistemas críticos de la planta en condiciones óptimas de funcionamiento. La

eficacia del mantenimiento se juzga en función de los costes del ciclo de vida de la maquinaria, los equipos y los sistemas críticos de la planta, no en función de la rapidez con la que una máquina averiada puede volver a ponerse en servicio.

El mantenimiento correctivo se considera una estrategia proactiva dentro de un programa completo de mantenimiento preventivo. Su objetivo principal radica en la prevención de averías, evitando desviaciones de las condiciones óptimas de funcionamiento y reduciendo reparaciones innecesarias, con la finalidad de mejorar la eficiencia de todos los sistemas esenciales de la planta.

El mantenimiento correctivo se basa en abordar de manera oportuna y completa cualquier problema emergente según lo requiera, mediante las reparaciones apropiadas. Todas las reparaciones están bien planificadas, las llevan a cabo artesanos debidamente formados y se verifican antes de que la máquina o el sistema vuelva a ponerse en servicio. Los problemas incipientes no se limitan a problemas eléctricos o mecánicos. Por el contrario, todas las desviaciones de las condiciones óptimas de funcionamiento, es decir, eficiencia, capacidad de producción y calidad del producto, se corrigen cuando se detectan. (Mohamed, 2016)

2.2.6.2.1 Acciones del Mantenimiento Correctivo (MC).

Las acciones de mantenimiento correctivo son las que se llevan a cabo tras el reconocimiento del fallo y tienen por objeto poner un elemento averiado en estado de funcionamiento para que realice su función normal.

Las acciones de MC son acciones destinadas a restablecer un elemento averiado a un estado operativo mediante la rectificación adecuada (reparación o sustitución) de los componentes averiados. Cuando falla un elemento reparable,

existe la opción de repararlo o sustituirlo por un elemento nuevo o reacondicionado. La decisión óptima suele basarse en consideraciones de coste y en el impacto de las acciones sobre futuros fallos del elemento en cuestión. Estas cuestiones se tratarán más adelante en este libro.

Las acciones de MC pueden ir desde reparaciones o sustituciones relativamente menores que requieren un breve tiempo de inactividad, como sustituir una lámpara, ajustar una máquina, etc., hasta reparaciones importantes que requieren una cantidad significativa de tiempo de inactividad y recursos. Aunque la MC no está planificada y se produce sin previo aviso, la organización de mantenimiento debe estar preparada para hacer frente a este tipo de eventos y minimizar sus efectos y consecuencias negativas.

En función del momento en que se produzcan las acciones de MC, éstas pueden clasificarse en dos categorías: (i) MC inmediata (de emergencia) y (ii) MC diferida.

2.2.6.2.1.1 Mantenimiento Correctivo Inmediato.

La MC inmediato es el mantenimiento correctivo que debe llevarse a cabo inmediatamente después de la detección del fallo.

El MC inmediato se lleva a cabo para rectificar fallos de elementos críticos o fallos que tienen consecuencias para el medio ambiente o la seguridad. El mantenimiento debe iniciarse de inmediato para restablecer el estado funcional del elemento averiado a fin de evitar daños adicionales, evitar lesiones o la muerte, prevenir daños medioambientales o evitar el elevado coste de la pérdida de producción.

2.2.6.2.1.2 Mantenimiento Correctivo Diferido.

MC diferido es un mantenimiento correctivo que se realiza de forma diferida de acuerdo con criterios de mantenimiento específicos, en lugar de hacerlo inmediatamente después de que se detecta una falla.

Si el fallo no es crítico y no requiere una acción inmediata o puede retrasarse (el fallo del limpiaparabrisas de un coche puede retrasarse si no es época de lluvias), la acción de mantenimiento puede aplazarse hasta un momento más conveniente.

En muchos casos, se toma la decisión deliberada de permitir que un elemento funcione hasta que falle. Esta práctica se conoce como funcionamiento hasta avería (RTF). Esta decisión puede tomarse ocasionalmente por una de las siguientes razones:

- No hay ninguna tarea de PM que tenga efecto independientemente de cuánto se esté dispuesto a gastar.
- El coste MP es superior al coste RTF y no hay consecuencias para la seguridad.
- El fallo está demasiado abajo en la lista de prioridades y no puede abordarse dentro del presupuesto asignado.

Sin embargo, si, tras el fallo, el elemento sigue siendo necesario, habrá que restablecer su estado operativo en el momento oportuno.

2.2.6.2.2 Efecto de las Acciones de MC en la Fiabilidad del Elemento.

Al igual que las acciones de MP, las acciones de MC (en forma de reparación y/o sustitución de componentes averiados) tienen un efecto significativo sobre la fiabilidad y los fallos posteriores de un elemento. Basándose en este efecto, las acciones de reparación pueden agruparse en tres categorías - perfectas, mínimas

e imperfectas - como se indica a continuación. (Mohamed, 2016)

2.2.6.2.2.1 Reparación perfecta.

Similar al MP perfecto, la reparación perfecta significa una acción de mantenimiento que restaura el artículo fallado a una condición "tan buena como nueva". Una revisión completa de un motor con una biela rota es un ejemplo de reparación perfecta. Por lo tanto, la tasa de fallos del artículo en el momento t viene dada por $h_1(t) = h_0(t - \tau)$ para $t > \tau$, donde τ indica el momento del primer fallo y $h_0(\cdot)$ es la tasa de fallos de un artículo nuevo, como se muestra en la figura 2.5.

2.2.6.2.2.2 Reparación Mínima.

Como su nombre indica, la reparación mínima consiste en devolver el artículo averiado a un estado operativo en el que el estado (o la fiabilidad) del artículo no se vea afectado, de modo que sea el mismo que antes de la avería. Cambiar una rueda pinchada en un coche y cambiar una correa de ventilador rota en un motor son ejemplos de MC mínima. En estos casos, la tasa de fallos del artículo no se ve afectada por la acción de mantenimiento. Por tanto, la fiabilidad tras la reparación es la misma que antes del fallo.

Se trata de una caracterización adecuada a nivel de sistema si el fallo se debe a uno o pocos componentes y su reparación o sustitución tiene muy poca repercusión en la fiabilidad global del artículo y en la tasa de fallos. En este caso, la tasa de fallos del elemento en el tiempo t viene dada por $h_2(t) = h_0(t)$ para $t > \tau$, como se muestra en la Figura 6.

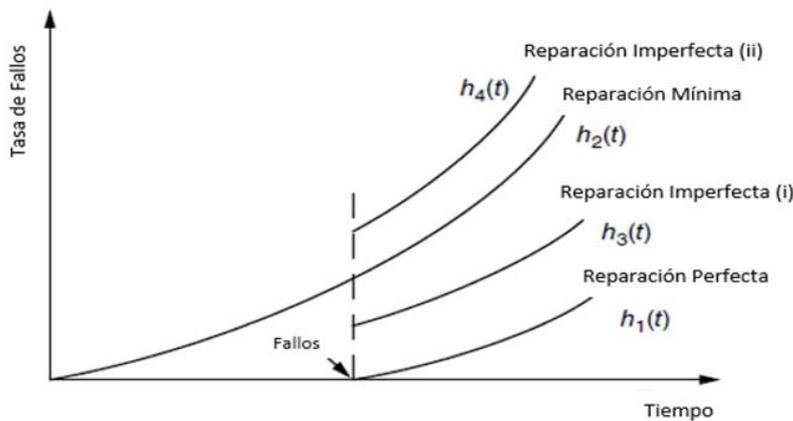
2.2.6.2.2.3 Reparación imperfecta.

Existen dos tipos de reparación imperfecta: Tipo (i) y Tipo (ii). En la reparación imperfecta de tipo (i), el estado de un artículo reparado está entre "tan

malo como el anterior" y "tan bueno como el nuevo". Como resultado, la tasa de fallos después de la reparación es inferior a la que había justo antes del fallo. Esto caracteriza la situación en la que la avería es un fallo importante que requiere la sustitución de varios componentes por otros nuevos, de modo que el índice global de averías mejora. En este caso, la tasa de averías del artículo en el momento t , $t > \tau$, viene dada por $h_3(t)$ con $h_2(t) > h_3(t) > h_1(t)$. En la reparación imperfecta de tipo (ii), la tasa de fallos de un artículo reparado es superior a la que tenía justo antes de fallar. Suele ser el efecto de una reparación de mala calidad que reduce la fiabilidad, de modo que la tasa de fallos del artículo en el momento t , $t > \tau$, viene dada por $h_4(t)$ con $h_4(t) > h_2(t)$. La Figura 6 muestra estos dos casos.

Figura 6

Acciones de mantenimiento en la tasa de fallos del Sistema.



2.2.6.3 Mantenimiento Predictivo.

El mantenimiento predictivo a menudo es malinterpretado y abusado, ya que muchos lo ven como un medio exclusivo para evitar fallas catastróficas en maquinaria rotativa crítica. Algunos lo describen como una herramienta de planificación que se basa en datos de vibración, análisis de lubricantes o termografía para determinar cuándo se necesita realizar mantenimiento correctivo. También,

algunos creen erróneamente, impulsados por los vendedores de sistemas de mantenimiento predictivo, que esta técnica resolverá todos los problemas en sus instalaciones críticas. Todas estas definiciones coinciden en que el mantenimiento predictivo se percibe mayormente como una herramienta de gestión del mantenimiento. (Mobley, 2008).

El mantenimiento predictivo es una técnica de gestión que, en pocas palabras, utiliza la evaluación periódica del estado real de funcionamiento de los equipos de la planta, los sistemas de producción y las funciones de gestión de la planta para optimizar el funcionamiento total de la planta. (Medina, 2022)

El resultado de un programa de mantenimiento predictivo son los datos. Hasta que no se tomen medidas para resolver las desviaciones o los problemas revelados por el programa, no se puede mejorar el rendimiento de la planta. Por lo tanto, debe existir una filosofía de gestión comprometida con la mejora de la planta antes de que se pueda obtener ningún beneficio significativo. Sin el compromiso absoluto y el apoyo de la alta dirección y la plena cooperación de todas las funciones de la planta, un programa de mantenimiento predictivo no puede proporcionar los medios para resolver el bajo rendimiento de la planta.

2.2.6.3.1 Los Beneficios del Mantenimiento Predictivo.

El mantenimiento predictivo no sustituye a los métodos más tradicionales de gestión del mantenimiento. Sin embargo, es un valioso complemento de un programa de mantenimiento integral de toda la planta. Mientras que los programas tradicionales de gestión del mantenimiento se basan en la revisión rutinaria de toda la maquinaria y en una respuesta rápida a los fallos inesperados, un programa de mantenimiento predictivo programa tareas de mantenimiento específicas a medida

que son realmente requeridas por los equipos de la planta. No puede eliminar la necesidad continua de uno o ambos programas de mantenimiento tradicionales (es decir, el de funcionamiento hasta el fallo y el preventivo). Sin embargo, el mantenimiento predictivo puede reducir el número de fallos inesperados y proporcionar una herramienta de programación más fiable para las tareas rutinarias de mantenimiento preventivo. (Schroeder, 2017)

El enfoque fundamental del mantenimiento predictivo radica en la supervisión periódica de la verdadera condición mecánica de los sistemas de maquinaria y la eficiencia operativa de los sistemas de proceso. Este enfoque tiene como objetivo prolongar al máximo el tiempo entre reparaciones necesarias, reducir al mínimo tanto la cantidad como el costo de las interrupciones no planificadas debido a fallos en la maquinaria, y en última instancia, mejorar la disponibilidad general de las plantas en funcionamiento.

La inclusión del mantenimiento predictivo en un programa integral de gestión de la planta se traducirá en una optimización de la disponibilidad de la maquinaria de proceso, lo que conllevará una significativa reducción en los gastos de mantenimiento. En esencia, el mantenimiento predictivo representa un programa de mantenimiento preventivo basado en el estado real de los equipos. (Corporativa, 2021).

Los beneficios que se derivan del uso de tecnologías de mantenimiento predictivo dependen de la forma en que se implemente el programa. Si el programa de mantenimiento predictivo se limita a prevenir fallos catastróficos de determinados sistemas de la planta, ése será el resultado que se obtendrá; sin embargo, centrarse exclusivamente en prevenir fallos puede dar lugar a un aumento

sustancial de los costes de mantenimiento. Por ejemplo, una gran acería integrada consiguió reducir los fallos no programados de las máquinas en más de un 30%, pero una revisión de los costes de mantenimiento reveló un aumento del 60%. (Mobley,2002)

2.2.6.3.2 Técnicas de Mantenimiento Predictivo.

Diversas tecnologías pueden y deben utilizarse como parte de un programa integral de mantenimiento predictivo. Debido a que los sistemas mecánicos o las máquinas constituyen la mayoría de los equipos de la planta, el monitoreo de vibraciones suele ser un componente clave de la mayoría de los programas de mantenimiento predictivo; sin embargo, el monitoreo de vibraciones no proporciona toda la información necesaria para un programa de mantenimiento predictivo exitoso. Esta técnica se limita a supervisar el estado mecánico y no otros parámetros críticos necesarios para mantener la fiabilidad y eficiencia de la maquinaria. Es una herramienta muy limitada para supervisar la eficiencia crítica de los procesos y la maquinaria y otros parámetros que pueden limitar gravemente la productividad y la calidad del producto.

Un programa integral de mantenimiento predictivo debe abarcar una variedad de técnicas de supervisión y diagnóstico. Estas técnicas comprenden la monitorización de vibraciones, termografía, análisis de la fricción y lubricación (tribología), seguimiento de parámetros del proceso, inspección visual, utilización de ultrasonidos y otras formas de ensayos no destructivos. En este capítulo, se ofrece una breve descripción de cada una de estas técnicas que se deben incorporar en un programa de mantenimiento predictivo con capacidad total, diseñado para aplicaciones en instalaciones típicas. (Festo, 2021)

2.2.6.3.2.1 Control de Vibraciones y Análisis.

Todos los equipos mecánicos en movimiento generan un perfil de vibración, o firma, que refleja su estado de funcionamiento. Esto es cierto independientemente de la velocidad o de si el modo de funcionamiento es rotación, reciprocación o movimiento lineal. El análisis de vibraciones es aplicable a todos los equipos mecánicos, aunque una suposición común, aunque no válida, es que se limita a maquinaria rotativa simple con velocidades de funcionamiento superiores a 600 revoluciones por minuto (rpm). El análisis del perfil de vibración es una herramienta útil para el mantenimiento predictivo, el diagnóstico y muchos otros usos. (Mobley, 2002)

2.2.6.3.2.1.1 Aplicaciones del Análisis de Vibraciones.

El análisis de vibraciones no se limita exclusivamente al ámbito del mantenimiento predictivo; también se aplica con éxito en tareas de diagnóstico. Esta técnica desempeña un papel fundamental en el diagnóstico de la mayoría de los sistemas mecánicos utilizados en la producción de productos. Cuando se emplea de manera adecuada, los datos de vibraciones ofrecen una valiosa herramienta para mantener las condiciones óptimas de operación y la eficiencia de los sistemas esenciales en una planta. Además, el análisis de vibraciones puede extenderse a la evaluación del flujo de fluidos a través de tuberías o recipientes, la detección de fugas y diversas funciones de pruebas no destructivas que contribuyen a mejorar la confiabilidad y el rendimiento de los sistemas críticos en la planta. (Preditec, s.f)

En la Tabla 1 se enumeran los equipos rotativos, o centrífugos, y no rotativos, los trenes de máquinas y los procesos continuos que suelen controlarse mediante el análisis de vibraciones. (Mobley,2002)

Tabla 1*Equipos y procesos que suelen controlarse el análisis de vibraciones.*

Centrífugas	Reciprocante	Proceso continuo
Bombas	Bombas	Coladas continuas
Compresores	Compresores	Líneas de banda caliente y fría
Sopladores	Motores diésel	Líneas de recocido
Ventiladores	Motores de gasolina	Líneas de revestimiento
Motores/generadores	Cilindros	Máquinas de papel
Molinos de bolas	Otras Máquinas	Líneas de fabricación de latas
Enfriadoras		Líneas de decapado
Rodillos de producto	Máquinas-herramienta	Impresión
Mezcladoras	Mandriladoras	Teñido y Acabado
Cajas de engranajes	Talladoras con fresa madre	Líneas de fabricación de tejados
Centrifugadoras	Centros de mecanizado	Líneas de producción química
Transmisiones	Fresadoras de templado	Líneas de producción de petróleo
Turbinas	Máquinas para trabajar metales	Líneas de producción de neopreno
Generadores	Trenes de laminación	Líneas de Producción de Poliéster
Secadores rotativos	Equipos de Mecanizado	Líneas de Producción de Nylon
Motores eléctricos		Líneas de Producción de Pavimentos
Toda la maquinaria rotativa		Líneas de proceso continuo

2.2.6.3.2.1.2 Visión General del Análisis de Vibraciones.

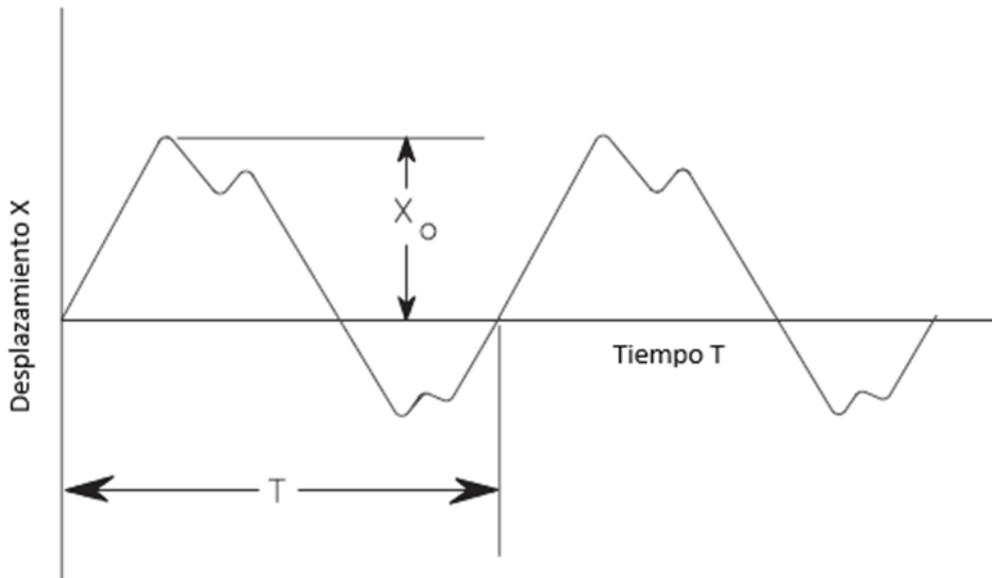
La teoría de las vibraciones y los análisis de perfiles de vibración, o firmas, son temas complejos que se tratan en muchos libros de texto. Esta sección proporciona suficiente teoría para permitir que se entienda el concepto de perfiles de vibración y su análisis.

a) Perfiles de Vibraciones Teóricas.

Una vibración es un movimiento periódico o que se repite después de un cierto intervalo. Este intervalo se denomina período de la vibración, T . En la Figura 7 se muestra un gráfico o perfil de una vibración, que muestra el período, T , y el desplazamiento o amplitud máxima, X_0 . La inversa del periodo, $1/T$, se denomina frecuencia, f , de la vibración, que puede expresarse en unidades de ciclos por segundo (cps) o hercios (Hz).

Figura 7

Movimiento Periódico.



Una función armónica es el tipo más simple de movimiento periódico y se muestra en la Figura 8, que es la función armónica para las pequeñas oscilaciones de un péndulo simple. (Mobley, 2002)

Dicha relación puede expresarse mediante la ecuación:

$$X = X_0 \text{Sen}(\omega t)$$

Donde:

X = Desplazamiento de la vibración (milésimas de pulgada o mils)

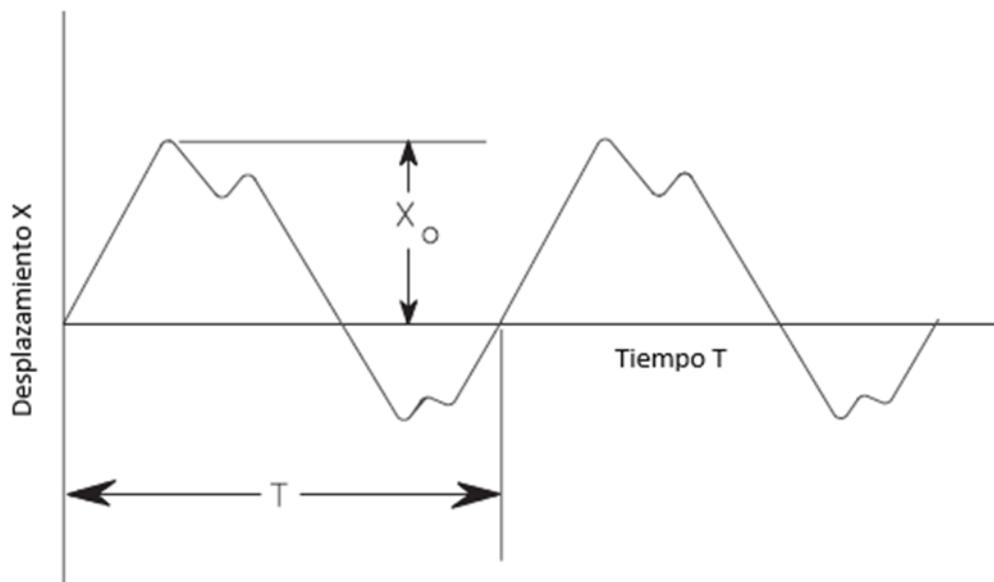
X_0 = Desplazamiento o amplitud máxima (mils)

ω = Frecuencia circular (radianes por segundo)

t = Tiempo (segundos)

Figura 8

Pequeñas oscilaciones de un péndulo simple, función armónica.



b) Perfiles de Vibraciones Reales.

El proceso de análisis de vibraciones requiere recopilar datos complejos de la máquina y descifrarlos. A diferencia de las simples curvas de vibración teóricas mostradas en las Figuras 7 y 8, el perfil de un equipo es extremadamente complejo

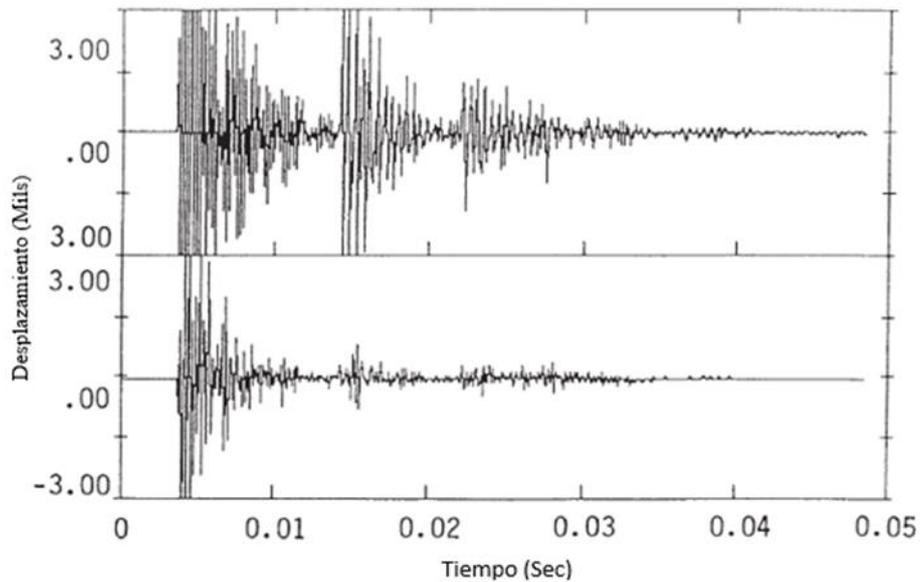
porque normalmente hay muchas fuentes de vibración. Cada fuente genera su propia curva, pero éstas se suman y se muestran como un perfil compuesto. Estos perfiles pueden visualizarse en dos formatos: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

- *Dominio del Tiempo.*

Los datos de vibración trazados como amplitud en función del tiempo se denominan perfil de datos en el dominio del tiempo. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la complejidad de este tipo de datos para una pieza real de maquinaria industrial.

Figura 9

Perfil de vibración típico en el dominio del tiempo para una pieza de maquinaria



Nota. Adaptado de Waveform

Los gráficos del dominio del tiempo deben utilizarse para toda la maquinaria de movimiento lineal y alternativo.

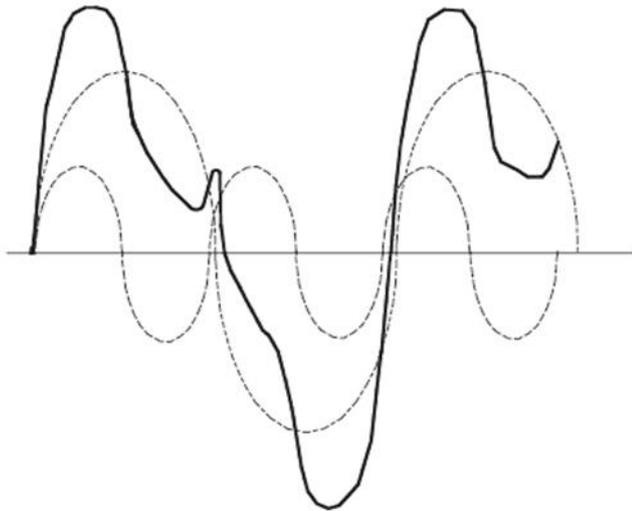
Son útiles en el análisis general de los trenes de máquinas para estudiar los cambios en las condiciones de funcionamiento; sin embargo, los datos de dominio temporal son difíciles de utilizar. Debido a que todos los datos de vibración en este

tipo de gráfico se suman para representar el desplazamiento total en un momento dado, es difícil ver directamente la contribución de cualquier fuente de vibración en particular.

El físico y matemático francés Jean Fourier determinó que las funciones de datos no armónicos como el perfil de vibración en el dominio del tiempo son la suma matemática de funciones armónicas simples. Las curvas discontinuas de la Figura 10 representan componentes armónicos discretos de la curva no armónica total o sumada representada por la línea continua. (Moblely,2002).

Figura 10

Curvas Discretas y Totales en el Dominio del Tiempo.



Este tipo de datos, que se toman rutinariamente a lo largo de la vida útil de una máquina, son directamente comparables con los datos históricos tomados exactamente a la misma velocidad de funcionamiento y carga; sin embargo, esto no es práctico debido a las variaciones en las operaciones diarias de la planta y a los cambios en la velocidad de funcionamiento. Esto afecta significativamente al perfil y hace imposible comparar datos históricos.

Dominio de la frecuencia.

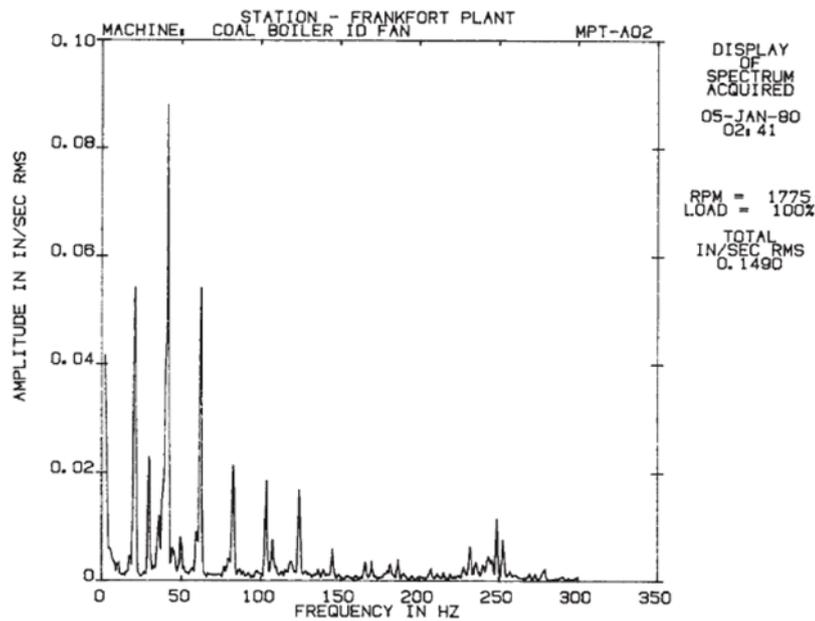
Desde un enfoque práctico, las funciones de vibración armónica simple están directamente relacionadas con las frecuencias circulares de las partes rotativas o móviles de una máquina. Estas frecuencias son múltiplos de la velocidad de funcionamiento fundamental de la máquina, expresada en revoluciones por minuto (rpm) o ciclos por minuto (cpm). Identificar estas frecuencias constituye el primer paso esencial para analizar el estado operativo de la máquina.

Para obtener datos en el dominio de la frecuencia, se utiliza una técnica matemática conocida como transformada rápida de Fourier (FFT) para convertir los datos del dominio del tiempo. La FFT permite representar cada componente de vibración en un espectro complejo de la maquinaria como un pico de frecuencia discreta.

pico de frecuencia. La amplitud en el dominio de la frecuencia puede ser el desplazamiento por unidad de tiempo en relación con una frecuencia determinada, que se representa en el eje Y frente a la frecuencia en el eje X. Esto se opone al dominio del tiempo en el espectro de vibraciones. Esto se opone a los espectros de dominio temporal que suman las velocidades de todas las frecuencias y trazan la suma como el eje Y contra el tiempo como el eje X. En la Figura 11 se muestra un ejemplo de trazado o firma de vibración en el dominio de la frecuencia. (Moblely,2002)

Figura 11

Firma Típica de Vibración en el Dominio de la Frecuencia.



Los datos en el dominio de la frecuencia son necesarios para los equipos que funcionan a más de una velocidad y para todas las aplicaciones rotativas. Dado que el eje X del espectro está normalizado en frecuencia a la velocidad de funcionamiento, un cambio en la velocidad de funcionamiento no afectará al gráfico. Un componente de vibración presente a una velocidad de marcha seguirá encontrándose en el mismo lugar del gráfico para otra velocidad de marcha después de la normalización, aunque la amplitud puede ser diferente.

c) *Interpretación de los Datos de Vibraciones.*

La clave para aprovechar el análisis de las firmas de vibración en el contexto del mantenimiento predictivo y el diagnóstico, así como en otras aplicaciones, radica en la habilidad de distinguir entre los patrones de vibración típicos y los inusuales. En el funcionamiento normal de maquinaria en movimiento o rotativa, se producen vibraciones comunes, como las generadas por la rotación de ejes y

otros componentes giratorios, el contacto con rodamientos, la interacción de los dientes de los engranajes, entre otros. Sin embargo, existen problemas específicos en la maquinaria que generan vibraciones anómalas, pero que se pueden identificar. Ejemplos de estos problemas incluyen tornillos sueltos, desalineación de ejes, desgaste en cojinetes, fugas o el inicio de fatiga en el metal. La capacidad de distinguir entre vibraciones normales y aquellas que indican problemas es esencial para aplicar eficazmente el análisis de firmas de vibración en la gestión y el mantenimiento de equipos industriales.

El mantenimiento predictivo mediante el análisis de firmas de vibración se basa en los siguientes hechos, que constituyen la base de los métodos utilizados para identificar y cuantificar las causas raíz de los fallos:

- Todos los problemas y modos de fallo comunes de la maquinaria tienen componentes de frecuencia de vibración distintos que pueden aislarse e identificarse.
- Para el análisis se suele utilizar una firma de vibración en el dominio de la frecuencia, ya que consta de picos discretos, cada uno de los cuales representa una fuente de vibración específica.
- Existe una causa, denominada función de forzamiento, para cada componente de frecuencia en la firma de vibración de una máquina-tren.
- Cuando observamos la firma de vibración de una máquina a lo largo del tiempo, notaremos

Aunque un aumento o disminución de la amplitud puede indicar degradación del tren de máquinas, no siempre es así. Las variaciones en la carga, las prácticas de funcionamiento y una variedad de otros cambios normales también

modifican la amplitud de uno o más componentes de frecuencia dentro de la firma de vibración. Además, es importante señalar que una amplitud menor no indica necesariamente una mejora del estado mecánico de la máquina. Por lo tanto, es importante que se comprenda claramente el origen de todas las variaciones de amplitud. (Mobley,2002)

d) *Equipos de Medición de Vibraciones.*

Los datos sobre vibraciones se obtienen mediante el siguiente procedimiento: (1) montaje de un transductor en la máquina en varios puntos, normalmente en la carcasa de la máquina y en las tapas de los cojinetes, y (2) utilizar un dispositivo portátil de recopilación de datos, denominado monitor o analizador de vibraciones, para conectarlo al transductor y obtener lecturas de las vibraciones o analizador de vibraciones, que se conecta al transductor para obtener lecturas de las vibraciones. (Mobley,2002)

- *Transductores.*

El transductor más utilizado para medir vibraciones es un acelerómetro. Contiene una película piezoeléctrica (o sensible a la presión) que convierte la energía mecánica en señales eléctricas. El dispositivo suele incluir un peso suspendido entre dos láminas piezoeléctricas. El peso se mueve en respuesta a las vibraciones y comprime la lámina piezoeléctrica, enviando una señal eléctrica cada vez que se comprime el peso.

- *Analizadores de vibraciones Portátiles.*

El analizador de vibraciones portátil incorpora un microprocesador que le permite convertir matemáticamente la señal eléctrica en aceleración por unidad de tiempo, realizar una FFT y almacenar los datos. Puede

programarse para generar alarmas y visualizaciones de los datos. Los datos almacenados por el analizador pueden descargarse a un PC o a un ordenador más potente para realizar análisis más sofisticados, almacenar y recuperar datos y generar informes.

2.2.6.3.2.1.3 Fuentes de Vibración.

Todas las máquinas que cuentan con partes móviles generan fuerzas mecánicas en el transcurso de su funcionamiento normal. Estas fuerzas evolucionan a medida que cambia el estado mecánico de la máquina debido a factores como el desgaste, modificaciones en el entorno operativo, variaciones en la carga, entre otros. Para comprender la generación de vibraciones, es fundamental tener conocimiento sobre la dinámica de la maquinaria y cómo estas fuerzas originan componentes de frecuencia de vibración únicos.

Las vibraciones no se producen porque sí. Hay una causa física, denominada función de forzamiento, y cada componente de una firma de vibración tiene su propia función de forzamiento. Los componentes que conforman una firma se reflejan como picos discretos en la FFT o en el gráfico del dominio de la frecuencia.

El perfil de vibración resultante del movimiento es el resultado de un desequilibrio de fuerzas. Según la definición, el equilibrio se produce en los sistemas en movimiento cuando todas las fuerzas generadas por la máquina y que actúan sobre ella se encuentran en un estado de equilibrio. Sin embargo, en las aplicaciones del mundo real siempre existe algún nivel de desequilibrio, y todas las máquinas vibran en cierta medida. En esta sección se analizan las fuentes de vibración más comunes en las máquinas rotativas, así como en las máquinas con movimiento alternativo y/o lineal. (Mobley,2002)

2.2.6.3.2.2 Termografía.

La termografía es un método de mantenimiento predictivo que se emplea para monitorear el estado de la maquinaria, las estructuras y los sistemas en una instalación. Se basa en dispositivos diseñados para captar la radiación infrarroja, es decir, la temperatura, con el fin de evaluar el funcionamiento. Al identificar irregularidades térmicas, es decir, áreas que presentan temperaturas anómalas (más altas o más bajas de lo normal), un inspector con experiencia puede identificar y definir posibles problemas en desarrollo en las instalaciones. (Vedan, s.f).

2.2.6.3.2.2.1 Conceptos Básicos de Termografía.

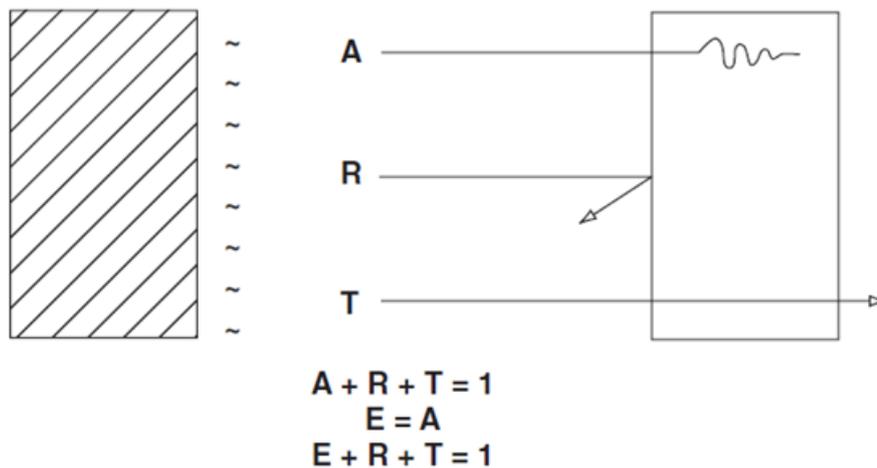
La tecnología infrarroja se fundamenta en el concepto de que cualquier objeto emite radiación o energía cuando su temperatura supera el cero absoluto. Esta radiación, conocida como radiación infrarroja, constituye una forma de energía liberada por los objetos. Las emisiones infrarrojas, presentes en longitudes de onda que se ubican por debajo del espectro visible en el rango del rojo, son extremadamente cortas y no pueden ser percibidas a simple vista, a menos que se utilicen instrumentos especiales.

La cantidad de radiación infrarroja que emite un objeto depende de su temperatura superficial. Sin embargo, medir la temperatura utilizando métodos infrarrojos puede ser complicado debido a que un objeto puede tener tres fuentes de energía térmica detectables: la energía emitida por el objeto en sí, la energía reflejada por el objeto y la energía transmitida a través del objeto. En el contexto de un programa de mantenimiento predictivo, solo la energía emitida por el objeto es relevante. Las energías reflejada y transmitida pueden distorsionar los datos infrarrojos originales. Por lo tanto, es necesario eliminar las energías reflejada y

transmitida de los datos recolectados antes de poder llevar a cabo un análisis significativo. (Mobley,2002)

Figura 12

Emissiones de Energía



Nota. Todos los cuerpos emiten energía en la banda infrarroja

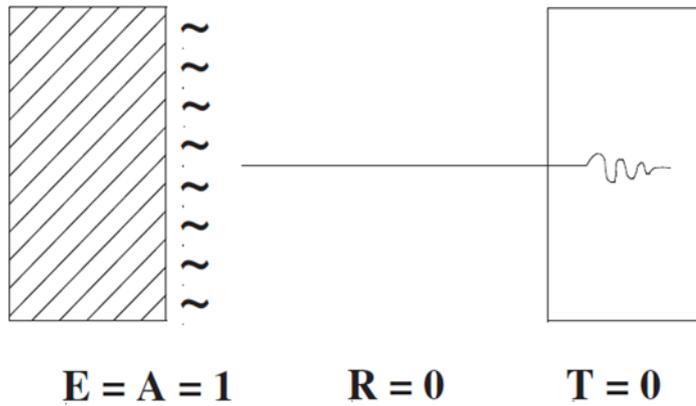
Esto constituye la base de la imagen infrarroja o termografía. A = Energía absorbida. R = Energía reflejada.

T = Energía transmitida. E = Energía emitida.

La característica de la superficie de un objeto tiene un impacto en la cantidad de energía que emite o refleja. Existe una superficie ideal de emisión, representada por la figura 13, conocida como "cuerpo negro," que presenta una emisividad de 1.0. En el caso de estas superficies, no ocurre la reflexión de energía; en su lugar, absorben por completo toda la energía externa y la liberan nuevamente en forma de energía infrarroja. (Mobley,2002)

Figura 13

Emisiones de cuerpo negro.



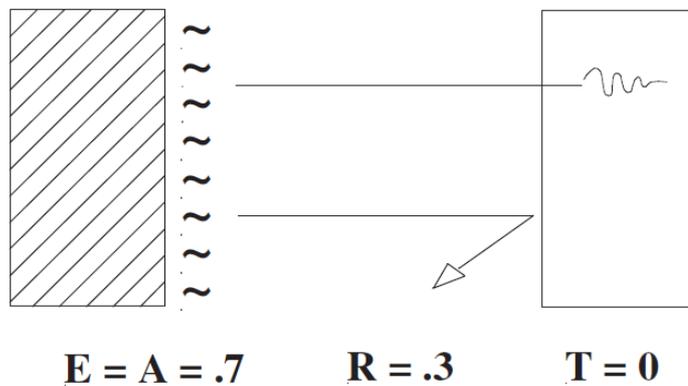
Nota. Un cuerpo o perfecto absorbe toda la energía infrarroja

Adaptada de Una Introducción al Mantenimiento Predictivo, R. Keith Mobley.

Las superficies que reflejan la energía infrarroja se denominan "cuerpos grises" y tienen una emisividad inferior a 1,0 (Figura 14).

Figura 14

Emisiones de Cuerpos Grises.



Nota. Todos los cuerpos que no son cuerpos negros emitirán cierta cantidad de energía infrarroja

La mayoría de los equipos de manufactura se incluyen en esta clasificación. Para garantizar mediciones precisas de temperatura en el mantenimiento predictivo, es esencial realizar una evaluación cuidadosa de la emisividad real de un objeto. Con el propósito de ayudar a los usuarios en la determinación de la emisividad, se

han creado tablas de referencia para los materiales más comunes. Es fundamental destacar que estas pautas no representan valores de emisividad absolutos para todos los tipos de maquinaria o equipos en una instalación.

Diversos factores, como las alteraciones en la condición de la superficie, la calidad de la pintura y otros recubrimientos protectores, así como numerosas variables adicionales, tienen la capacidad de influir en el coeficiente de emisividad real de los equipos en una planta. Además de considerar la energía reflejada y transmitida, aquellos que utilizan técnicas termográficas deben también tener en cuenta la atmósfera que se encuentra entre el objeto y el instrumento de medición. Los gases presentes, como el vapor de agua, tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja, y elementos como el polvo suspendido en el aire, la iluminación, y otros elementos de la atmósfera circundante pueden ocasionar distorsiones en la medición de la radiación infrarroja. Dado que las condiciones atmosféricas cambian constantemente, la utilización de técnicas termográficas requiere una atención meticulosa en cada ocasión que se recopilan datos infrarrojos. (Mobley,2002)

2.2.6.3.2.2.2 Tipos de Instrumentos Infrarrojos.

La mayoría de los sistemas o dispositivos de monitoreo por infrarrojos están equipados con filtros especiales que pueden emplearse para contrarrestar los impactos adversos derivados de la atenuación atmosférica en los datos infrarrojos. Sin embargo, es fundamental que el usuario en la planta sea consciente de los factores particulares que pueden influir en la exactitud de los datos infrarrojos y aplique los filtros adecuados u otras técnicas de ajuste de la señal necesarias para compensar ese factor o factores específicos que causan atenuación.

La óptica colectora, los detectores de radiación y algún tipo de indicador son los elementos básicos de un instrumento infrarrojo industrial. El sistema óptico tiene la función de capturar la energía radiante y dirigirla hacia un detector, donde se transforma en una señal eléctrica. Posteriormente, la electrónica del dispositivo amplifica esta señal de salida y la somete a un proceso para que sea legible y visualizable. En el contexto del mantenimiento predictivo, se emplean tres categorías principales de instrumentos: termómetros infrarrojos o radiómetros puntuales, escáneres de línea y sistemas de imágenes. (Mobley,2002)

a) *Termómetros de infrarrojos.*

Los termómetros infrarrojos o radiómetros de medición puntual se diseñan con el propósito de proporcionar la temperatura real de una superficie en un único punto, típicamente de tamaño reducido, en una máquina o estructura. En el contexto de un programa de mantenimiento predictivo, se puede emplear el termómetro infrarrojo puntual en conjunto con varios instrumentos basados en microprocesadores que se enfocan en la medición de vibraciones para supervisar la temperatura en áreas críticas de maquinaria y equipos en la planta. Esta técnica suele utilizarse para controlar aspectos como las temperaturas en las tapas de los cojinetes, el calentamiento de los devanados de los motores, comprobaciones puntuales de las temperaturas en tuberías de proceso y aplicaciones similares. Una limitación importante es que se obtiene la temperatura de un único punto de la máquina o estructura. No obstante, cuando se combina con datos de vibración, la información infrarroja obtenida en ese punto específico puede ser de gran valor para el análisis y mantenimiento.

b) *Escáneres de línea.*

Este tipo de instrumento infrarrojo proporciona una exploración en una sola dimensión o una línea de radiación para fines comparativos. A pesar de que puede abarcar un campo de visión ligeramente más amplio, es decir, una zona mayor de la superficie de la máquina, sus aplicaciones en el ámbito del mantenimiento predictivo son limitadas.

c) *Imágenes Infrarrojas.*

A diferencia de otras tecnologías infrarrojas, las imágenes térmicas o infrarrojas permiten escanear máquinas, procesos o equipos completos con radiación infrarroja en un período de tiempo muy corto. La mayoría de los sistemas de imágenes funcionan como una cámara de video. El usuario puede ver un perfil de emisión de calor de área amplia simplemente mirando la óptica del dispositivo. En el mercado existe una gran variedad de instrumentos de imagen térmica, desde escáneres en blanco y negro relativamente económicos hasta sistemas a todo color basados en microprocesadores. Muchas de las unidades menos caras están diseñadas estrictamente como escáneres y no pueden almacenar ni recuperar imágenes térmicas. La incapacidad de almacenar y recuperar datos térmicos anteriores limita un programa de mantenimiento predictivo a largo plazo.

2.2.6.3.2.2.3 Capacitación.

La capacitación es fundamental con cualquiera de los sistemas de imágenes. Las variables que pueden destruir la precisión y la repetibilidad de los datos térmicos deben compensarse cada vez que se adquieren datos infrarrojos. Además, la interpretación de los datos infrarrojos requiere una amplia formación y experiencia.

La inclusión de la termografía en un programa de mantenimiento predictivo le permitirá supervisar la eficacia térmica de los sistemas de procesos críticos que dependen de la transferencia o retención de calor, los equipos eléctricos y otros sistemas. transferencia o retención de calor; equipos eléctricos; y otros parámetros que mejorarán tanto la como la eficacia de los sistemas de la planta. Las técnicas de infrarrojos pueden utilizarse para detectar problemas en una variedad de sistemas y equipos de planta, incluidos conmutadores eléctricos, cajas de engranajes, subestaciones eléctricas, transmisiones, paneles de disyuntores, motores, envolventes de edificios, cojinetes, líneas de vapor y sistemas de proceso que dependen de la o transferencia de calor.

2.2.6.3.2.2.4 Teoría Básica de Los Infrarrojos.

La energía infrarroja es luz que funciona fuera del rango dinámico del ojo humano. Los generadores de imágenes infrarrojas se desarrollaron para ver y medir este calor. Estos datos se transforman en datos digitales y se procesan en imágenes de vídeo denominadas termogramas. Cada píxel de un termograma tiene un valor de temperatura, y el contraste de la imagen se deriva de las diferencias de temperatura de la superficie. Una inspección por infrarrojos es una técnica no destructiva para detectar diferencias térmicas que indican problemas en los equipos. Las inspecciones por infrarrojos se realizan con el equipo de la planta en funcionamiento, por lo que no es necesario interrumpir la producción. La información exhaustiva se puede utilizar para preparar estimaciones de tiempo y coste de reparación, evaluar el alcance del problema, planificar la disponibilidad de materiales de reparación y realizar las reparaciones con eficacia.

a) *Espectro Electromagnético.*

Todos los objetos emiten energía electromagnética cuando se calientan. La cantidad de energía está relacionada con la temperatura. Cuanto mayor es la temperatura, más energía electromagnética emite. El espectro electromagnético contiene varias formas de energía radiada, como los rayos X, los ultravioletas, los infrarrojos y la radio. La energía infrarroja cubre el espectro de 0,7 micras a 100 micras.

El espectro electromagnético es un continuo de todas las ondas electromagnéticas ordenadas según su frecuencia y longitud de onda. Una onda tiene varias características. El punto más alto de la onda se denomina cresta. El punto más bajo de la onda se denomina depresión. La distancia de cresta a cresta de la onda se denomina longitud de onda. La frecuencia es el número de crestas de onda que pasan por un punto determinado por segundo. A medida que aumenta la frecuencia de la onda, disminuye la longitud de onda. Cuanto más corta es la longitud de onda, más energía contiene; cuanto más larga, menos energía.

b) *Conceptos de Transferencia de Calor.*

el calor es una forma de energía térmica. la primera ley de la termodinámica es que el calor cedido por un objeto debe ser igual al absorbido por otro. la segunda ley es que la transferencia de calor se produce del sistema más caliente al más frío. si el objeto está frío, absorbe energía en lugar de emitirla. todo objeto emite energía térmica o energía infrarroja a través de tres tipos o modos diferentes: conducción, convección o radiación.

Es importante comprender las diferencias entre estas tres formas.

Conducción. es la transferencia de energía a través o entre objetos sólidos.

Una barra metálica calentada en un extremo se calentará, con el tiempo, en el otro extremo. cuando un cojinete de motor está defectuoso, el calor generado por el cojinete se transfiere a la carcasa del motor. ésta es una forma de conducción.

Convección. es la transferencia de energía a través de o entre fluidos o gases. si tomara el mismo motor mencionado anteriormente y colocara un ventilador soplando directamente sobre el cojinete caliente, la temperatura de la superficie sería diferente. esto es enfriamiento por convección. ocurre en la superficie de un objeto. Un operador debe tener cuidado para identificar la verdadera causa y efecto. En este caso, la diferencia entre el buen y el mal calentamiento de la fuente y el enfriamiento de la superficie se debe a la inyección.

Radiación. es la transferencia de calor mediante longitudes de onda de energía electromagnética. la causa más común de radiación es la energía solar. Sólo la energía radiada es detectada por un generador de imágenes infrarrojas. Si el motor antes mencionado estuviera al aire libre en el patio de almacenamiento de losas con losas apiladas a su alrededor, la energía electromagnética del sol y de las losas aumentaría la temperatura.

Por ejemplo, un planchón de acero que sale del horno en la banda caliente tendrá longitudes de onda cortas. Se puede sentir el calor y ver el resplandor rojo del planchón. Las longitudes de onda se han acortado de cresta a cresta y la energía emitida ha aumentado, entrando en la banda visible del espectro. por el contrario, cuando la bobina sale de los bobinadores se ha enfriado. se pierde energía. las longitudes de onda han aumentado de cresta a cresta y han disminuido en frecuencia.

La Emisividad.

La emisividad es el porcentaje de energía emitida por un objeto. La energía infrarroja incide sobre un objeto; a continuación, la energía se transmite, se refleja o se absorbe. Un término común utilizado en termografía infrarroja es cuerpo negro. Un cuerpo negro es un emisor térmico perfecto. Su emisividad es del 100%. No tiene reflexión ni transmitancia. Cada uno de los objetos que escanee tendrá un valor de emisividad diferente. Un porcentaje de la energía total será causado por la reflexión y la transmitancia.

2.2.6.3.2.2.5 Equipos de Infrarrojos.

A continuación, se enumeran los criterios utilizados para evaluar los equipos de infrarrojos. Es importante determinar qué modelo se adapta mejor a sus necesidades antes de realizar la compra. Algunos de estos puntos serán importantes para usted y otros no.

- Portabilidad. ¿Qué grado de portabilidad requiere su aplicación? ¿Afectan el peso y el tamaño del instrumento a la recogida de datos? ¿Qué tipo de equipo va a escanear?
- Facilidad de uso. ¿Cuánta formación se necesita para utilizar el generador de imágenes? ¿Se puede utilizar fácilmente en su entorno?
- Cualitativo o cuantitativo. ¿Mide temperaturas? En caso afirmativo, ¿qué intervalo de temperatura se medirá? ¿Necesitará más de un rango?
- Mediciones ambientales o cuantitativas. ¿Cuáles son las temperaturas ambiente máxima y mínima en las que va a escanear?
- Longitudes de onda cortas o largas. Los sistemas de longitud de onda larga ofrecen menos reflexión solar y funcionan en el ancho de banda de 8 a 14

micras. Los sistemas de longitud de onda corta ofrecen menores errores de temperatura cuando se introduce un valor de emisividad incorrecto. El ancho de banda operativo para una unidad de onda corta es de 2 a 5,6 micras.

- Baterías. ¿Cuál es el peso y el tamaño de las pilas? ¿Cuánto durarán? ¿Necesitará baterías adicionales? ¿Cuánto tardan en cargarse?
- Objetivos intercambiables. ¿Se adaptan las disponibles a su aplicación? ¿Cuánto cuestan?
- Monitor, ocular o ambos. ¿Necesitará mostrar una imagen en directo a otras personas mientras realiza una inspección?
- Analógico o digital. ¿Cómo procesará las imágenes? ¿La impresora de imágenes es analógica, digital o ambas?
- Software. ¿Puede el paquete de software producir informes de calidad y almacenar y recuperar imágenes? ¿Necesita edición de colonización y temperatura?

2.2.6.3.2.3 Tribología.

Tribología es el término general que hace referencia al diseño y la dinámica de funcionamiento de la estructura de soporte rodamiento-lubricación-rotor de la maquinaria. Para el mantenimiento predictivo pueden utilizarse varias técnicas tribológicas: el análisis del aceite lubricante, el análisis espectrográfico, la ferrografía y el análisis de partículas de desgaste.

El análisis del aceite lubricante es una técnica destinada a evaluar la condición de los aceites utilizados en maquinaria mecánica y eléctrica, enfocándose en sus propiedades químicas. No se utiliza para determinar el estado operativo de la maquinaria en sí. Algunos métodos de análisis de aceites lubricantes ofrecen un

desglose preciso de la cantidad de elementos químicos individuales, incluyendo aditivos y contaminantes presentes en el aceite. La comparación de la concentración de metales traza en muestras sucesivas de aceite puede revelar patrones de desgaste en las piezas que entran en contacto con el aceite en el equipo de la planta, lo que puede servir como un indicador temprano de posibles fallos en la maquinaria. (Mobley,2002)

2.2.6.3.2.3.1 Análisis de Aceites Lubricantes.

El análisis del aceite se ha convertido en una importante ayuda para el mantenimiento preventivo. Los laboratorios recomiendan tomar muestras del lubricante de las máquinas a intervalos programados para determinar el estado de la película lubricante, que es fundamental para el funcionamiento del tren de máquinas.

a) Pruebas de Análisis de Aceites.

Normalmente, se realizan las siguientes pruebas en muestras de aceite lubricante:

❖ Viscosidad.

La viscosidad es una propiedad fundamental de los aceites lubricantes. Se compara la viscosidad real de las muestras de aceite con la de una muestra sin usar para determinar si la muestra se ha vuelto más delgada o más espesa debido a su uso. Una viscosidad excesivamente baja disminuirá la capacidad de la película de aceite para evitar el contacto entre las superficies metálicas. Por otro lado, una viscosidad excesivamente alta puede obstruir el flujo de aceite hacia áreas críticas en la estructura de soporte del rodamiento, lo que reduce su capacidad para proporcionar la lubricación necesaria.

❖ *Contaminación.*

La presencia de agua o refrigerante en el aceite puede generar complicaciones significativas en un sistema de lubricación. Varios de los aditivos empleados en la formulación de lubricantes contienen componentes similares a los utilizados en los aditivos de refrigerantes. Por lo tanto, es esencial que el laboratorio cuente con la capacidad de realizar un análisis preciso del aceite nuevo para establecer comparaciones significativas.

❖ *Dilución del Combustible.*

La dilución del aceite en un motor, causada por la contaminación del combustible, debilita la resistencia de la película de aceite, la capacidad de sellado y la detergencia. Un funcionamiento incorrecto, fugas en el sistema de combustible, problemas de encendido, sincronización inadecuada u otras deficiencias pueden causarla. La dilución del combustible se considera excesiva cuando alcanza un nivel del 2,5 al 5 por ciento.

❖ *Contenido de Sólidos.*

La determinación de la cantidad de partículas sólidas en una muestra de aceite es un procedimiento común. Se mide la proporción de sólidos en la muestra en términos de porcentaje en volumen o peso. La presencia de sólidos en un sistema de lubricación puede ocasionar un aumento considerable en el desgaste de las piezas que dependen de la lubricación. Cualquier incremento no esperado en la concentración de partículas sólidas debe ser motivo de atención y preocupación.

❖ *Hollín de Combustible.*

El hollín causado por la combustión de combustibles es un indicador importante para el aceite utilizado en motores diesel y siempre está presente en

cierta medida. Una prueba para medir el hollín del combustible en el gasóleo es importante porque indica la eficacia de combustión del motor. La mayoría de las pruebas de hollín se realizan mediante análisis por infrarrojos.

❖ *Oxidación.*

La oxidación del aceite lubricante puede ocasionar problemas como la formación de residuos de laca, corrosión en las superficies metálicas o el aumento de la viscosidad del aceite. La mayoría de los lubricantes incluyen aditivos diseñados para prevenir la oxidación, pero una vez que estos aditivos se agotan, la oxidación del aceite comienza. Para cuantificar el grado de oxidación en una muestra de aceite, se utiliza el análisis infrarrojo diferencial.

❖ *Nitración.*

La nitración se produce como consecuencia de la combustión del combustible en los motores, generando productos altamente ácidos que pueden dejar residuos en las áreas de combustión. La nitración también acelera la oxidación del aceite. El análisis por infrarrojos se emplea para identificar y cuantificar los productos resultantes de la nitración.

❖ *Índice de Acidez Total (TAN).*

La acidez en el aceite es una forma de cuantificar la presencia de ácido o sustancias con características ácidas en una muestra de aceite. Dado que los aceites nuevos contienen aditivos que pueden influir en esta medida (conocida como TAN), resulta esencial comparar las muestras de aceite usado con el aceite nuevo sin utilizar del mismo tipo. Para llevar a cabo esta evaluación, es crucial realizar análisis periódicos en momentos predefinidos.

❖ *Número de Base Total (TBN).*

El número de base (TBN) del aceite es un indicador de su capacidad para neutralizar la acidez. Un valor de TBN más alto señala una mayor eficiencia para contrarrestar la acidez. Las causas habituales de un TBN bajo pueden incluir la selección de un aceite no adecuado para una aplicación dada, intervalos prolongados entre los cambios de aceite, el sobrecalentamiento y la utilización de combustibles con un contenido elevado de azufre.

❖ *Recuento de Partículas.*

Las pruebas de recuento de partículas son importantes para anticipar posibles problemas del sistema o de la máquina. Esto es especialmente cierto en los sistemas hidráulicos. El análisis de recuento de partículas realizado como parte de un análisis normal de aceite lubricante es diferente del análisis de partículas de desgaste. En esta prueba, un recuento elevado de partículas indica que la maquinaria puede estar desgastándose de forma anormal o que pueden producirse fallos debido a orificios bloqueados temporal o permanentemente. No se intenta determinar los patrones de desgaste, el tamaño y otros factores que identificarían el modo de fallo dentro de la máquina.

❖ *Análisis Espectrográfico.*

El análisis espectrográfico es una herramienta que permite realizar mediciones precisas y rápidas de varios elementos presentes en el aceite lubricante. Estos elementos suelen clasificarse como metales de desgaste, contaminantes o aditivos, y en algunos casos, un elemento puede encajar en más de una de estas categorías. Sin embargo, es importante destacar que el análisis estándar del aceite lubricante no tiene como objetivo identificar los modos de fallo específicos

asociados a problemas de desarrollo en los componentes de la maquinaria. Por lo tanto, es necesario complementar estas técnicas con enfoques adicionales como parte de un programa de mantenimiento predictivo integral.

b) Análisis de Partículas de Desgaste.

El análisis de partículas de desgaste está estrechamente vinculado al análisis del aceite, ya que implica la obtención de partículas de desgaste a partir de muestras de aceite lubricante. Aunque el análisis del aceite proporciona una evaluación precisa del estado del aceite en sí, el análisis de partículas de desgaste ofrece información directa sobre el estado de desgaste de los componentes de la máquina. El estudio de las partículas presentes en el lubricante de una máquina puede proporcionar valiosa información sobre su estado general, basándose en características como la forma, composición, tamaño y cantidad de las partículas. Este análisis se realiza típicamente en dos etapas.

El primer método consiste en la supervisión constante de los niveles de sólidos en el aceite lubricante de la máquina. En términos simples, la cantidad, la composición y el tamaño de las partículas presentes en el aceite reflejan el estado mecánico de la máquina. En condiciones normales, una máquina contendrá bajos niveles de sólidos, con partículas de tamaño inferior a 10 micras. A medida que el estado de la máquina se deteriora, tanto la cantidad como el tamaño de las partículas aumentarán. El segundo método de análisis de partículas de desgaste implica el examen de la materia particulada en cada muestra de aceite lubricante. (Mobley,2002)

❖ *Tipos de Desgaste.*

Se pueden distinguir cinco tipos fundamentales de desgaste según la

clasificación de partículas: desgaste por rozamiento, desgaste por corte, fatiga de rodadura, desgaste combinado de rodadura y deslizamiento, y desgaste por deslizamiento severo. De estos, solamente el desgaste por rozamiento y los primeros mecanismos de fatiga de rodadura producen partículas cuyo tamaño principal es inferior a 15 micras.

Desgaste por Rozamiento. El desgaste por rozamiento se origina como resultado del desgaste típico causado por el deslizamiento en una máquina. Durante el funcionamiento normal, se forma una capa en la superficie de desgaste, y mientras esta capa se mantenga estable, el desgaste de la superficie se produce de manera normal. Sin embargo, si la capa se desgasta más rápido de lo que se renueva, la velocidad de desgaste se incrementa, y el tamaño máximo de las partículas aumenta. Un exceso de contaminantes en un sistema de lubricación puede aumentar el desgaste por rozamiento en gran medida, aunque la capa de cizallamiento mixto no sea completamente eliminada. Aunque la probabilidad de una falla catastrófica es baja, estas máquinas pueden experimentar un desgaste rápido. Un incremento drástico en las partículas de desgaste suele indicar problemas inminentes.

Partículas de Desgaste de Corte. Las partículas de desgaste por corte se originan cuando una superficie penetra en otra. Estas partículas se generan cuando una superficie dura, que está desalineada o fracturada, produce un borde afilado que corta a través de una superficie más suave. También pueden surgir cuando un contaminante abrasivo se incrusta en una superficie blanda y corta la superficie opuesta. Las partículas de desgaste por corte son consideradas anómalas y siempre deben ser objeto de atención. Incluso si su tamaño es de unas pocas micras de largo y una fracción de micra de ancho, es probable que la causa sea la contaminación.

Un aumento en la cantidad de partículas de mayor longitud indica un posible fallo inminente del componente.

Fatiga por Rodadura. La fatiga por rodadura se relaciona principalmente con los rodamientos de contacto rodante y puede dar lugar a tres tipos de partículas distintas: partículas de desprendimiento por fatiga, partículas esféricas y partículas laminares. Las partículas de desprendimiento por fatiga son aquellas que se desprenden cuando ocurre una picadura o desprendimiento en la superficie de un rodamiento. Un incremento en la cantidad o tamaño de estas partículas suele ser el primer signo de una anomalía. Es importante destacar que la fatiga por rodadura no siempre resulta en la generación de partículas esféricas, y estas últimas pueden originarse por otras fuentes. La detección de partículas esféricas es relevante ya que se pueden identificar antes de que ocurra un desprendimiento. Por otro lado, las partículas laminares son extremadamente finas y se crean cuando una partícula de desgaste atraviesa un contacto de rodadura. A menudo, presentan perforaciones. Aunque las partículas laminares pueden generarse a lo largo de la vida útil de un rodamiento, su cantidad tiende a aumentar cuando ocurren desprendimientos por fatiga.

Desgaste Combinado de Rodadura y Deslizamiento. El desgaste combinado por rodadura y deslizamiento ocurre debido al contacto en movimiento de las superficies en sistemas de engranajes. Estas partículas de mayor tamaño son el resultado de tensiones de tracción en la superficie del engranaje, lo que provoca una penetración más profunda de las grietas de fatiga en los dientes del engranaje antes de la picadura. En este proceso, no se generan esferas. El gripado de los engranajes se produce cuando la carga o la velocidad son excesivamente altas. El calor

generado debido a esta situación rompe la película lubricante y causa la adhesión de los dientes del engranaje. Conforme las superficies desgastadas se tornan más rugosas, la velocidad de desgaste aumenta. Una vez que el gripado comienza, generalmente afecta a todos los dientes del engranaje.

Desgaste por Deslizamiento Severo. El desgaste severo por deslizamiento en un sistema de engranajes se produce debido a cargas excesivas o aumento de la temperatura. En tales situaciones, se originan partículas más grandes desprendiéndose de las superficies desgastadas, lo que provoca un incremento en la velocidad de desgaste. Si las tensiones aplicadas continúan aumentando, se llega a un segundo punto de transición en el que la superficie se fractura, llevando a un desgaste catastrófico. Es importante destacar que el análisis espectrográfico convencional se enfoca en la detección de contaminantes de partículas con un tamaño igual o inferior a 10 micras, y los contaminantes de mayor tamaño no son considerados. Esta limitación puede afectar los beneficios obtenidos a través de esta técnica.

c) Ferrografía.

Esta técnica guarda similitudes con la espectrografía, aunque existen dos diferencias significativas. En primer lugar, la ferrografía lleva a cabo la separación de contaminantes particulados mediante un campo magnético en lugar de quemar una muestra, como es el caso en el análisis espectrográfico. Debido a que se emplea un campo magnético para aislar los contaminantes, esta técnica está mayormente restringida al análisis de partículas ferrosas o magnéticas. (Moblely,2002)

La segunda diferencia es que las partículas contaminantes de más de 10 micras pueden separarse y analizarse. El análisis ferrográfico normal captará

partículas de hasta 100 micras de tamaño y proporciona una mejor representación de la contaminación total por petróleo que las técnicas espectrográficas.

2.2.6.3.2.4 Ultrasonidos.

Esta técnica de mantenimiento predictivo opera siguiendo principios similares a los del análisis de vibraciones, ya que ambas técnicas monitorean el ruido generado por maquinaria o sistemas en una planta para evaluar su condición operativa real. Sin embargo, a diferencia del análisis de vibraciones, el enfoque de los ultrasonidos se centra en las frecuencias más elevadas, es decir, los ultrasonidos, que resultan de la dinámica particular de sistemas de procesos o máquinas. Mientras que el rango típico de monitorización para el análisis de vibraciones abarca desde menos de 1 Hz hasta 30.000 Hz, las técnicas ultrasónicas se aplican a un espectro de frecuencias que oscila entre 20.000 Hz y 100 kHz.

2.2.6.3.2.4.1 Aplicaciones de los Ultrasonidos.

Como parte de un programa de mantenimiento predictivo, los instrumentos ultrasónicos se utilizan para tres aplicaciones principales: análisis de ruido aéreo, detección de fugas o materiales. (Moblely,2002).

a) Análisis del Ruido Aéreo.

De acuerdo con las regulaciones de la Administración de Seguridad y Salud en el Trabajo (OSHA), todas las instalaciones industriales tienen la obligación de cumplir con los estándares de niveles de ruido ambiental. Estas disposiciones requieren que estas instalaciones realicen un monitoreo periódico de los niveles de ruido en todas las áreas de la planta y que proporcionen protección auditiva en aquellas zonas donde el nivel de ruido ambiente supere los límites aceptables.

Los dispositivos ultrasónicos son las principales herramientas empleadas

para llevar a cabo la supervisión de los niveles de ruido ambiental y asegurar la conformidad con las regulaciones de la OSHA. Además, en algunas plantas, se utilizan medidores ultrasónicos simples para llevar a cabo evaluaciones de equipos y sistemas no críticos con el propósito de detectar posibles emisiones de ruido anormal. Sin embargo, esta última aplicación se limita a una medición básica de "cumple/no cumple" y carece prácticamente de capacidad para identificar la causa subyacente del ruido inusual.

b) *Detección de Fuga.*

La aplicación principal de la inspección ultrasónica se centra en la detección de fugas. Las fugas, que se caracterizan por el flujo turbulento de líquidos o gases a través de puntos de restricción (como orificios), generan patrones de alta frecuencia que pueden identificarse de manera efectiva a través de técnicas ultrasónicas. De este modo, esta técnica resulta idónea para identificar fugas en componentes como válvulas, purgadores de vapor, tuberías y otros sistemas de procesamiento.

c) *Ensayo de Materiales.*

Los ultrasonidos han sido, y siguen siendo, una metodología de ensayo primaria para el ensayo de materiales. Las frecuencias típicas de ensayo comienzan en 250 kiloHertz (kHz), o 250.000 ciclos por segundo (cps), hasta 25 MegaHertz (MHz), o 25 millones de cps.

El ensayo de materiales consiste generalmente en introducir una fuente de energía en el material a ensayar y registrar las características de respuesta mediante instrumentos ultrasónicos.

Estas pruebas pueden ser tan sencillas como golpear el material con un

martillo y registrar los resultados con un acelerómetro y un medidor de ultrasonidos. Las pruebas ultrasónicas se basan en la medición del tiempo y la amplitud o intensidad de una señal entre la emisión y la recepción. Debido a la falta de correspondencia de las propiedades acústicas entre los materiales, el sonido se reflejará parcialmente en las interfaces. La calidad de la energía reflejada depende de la relación de impedancia acústica entre dos materiales. Por ejemplo, el sonido transmitido a través del acero que alcanza un límite acero/aire provocará una reflexión interna del 99,9%, mientras que un límite acero/agua sólo reflejará el 88% dentro del material y transmitirá el 12% al agua. Si las relaciones de impedancia son muy diferentes, como en el caso de una grieta abierta con una interfaz acero/aire, se producirá una reflexión adecuada que permitirá detectar el defecto. Por el contrario, una pequeña grieta en un campo de tensión de compresión que no tenga caras oxidadas producirá un límite acero/acero y no podrá detectarse con este método.

2.2.6.3.2.4.2 Tipos de Sistemas Ultrasónicos.

Existen dos categorías de sistemas ultrasónicos aplicables al mantenimiento predictivo: estructurales y aéreos. Ambos ofrecen una evaluación rápida y precisa de anomalías en el funcionamiento y detección de fugas. Los detectores ultrasónicos de tipo aéreo pueden operar en modos de escaneo o de contacto y se emplean principalmente para detectar escapes de gases a presión. Estos instrumentos son versátiles, ya que su sensibilidad se limita a ultrasonidos en lugar de gases específicos, lo que los distingue de la mayoría de los dispositivos convencionales de detección de fugas de gas. Además, se utilizan con frecuencia para identificar diferentes tipos de fugas en sistemas de vacío.

En el modo de contacto, estos sistemas emplean una varilla metálica como guía de ondas ultrasónicas que, al tocar una superficie, responde a las altas frecuencias ultrasónicas en el lado opuesto de dicha superficie. Este método se emplea para localizar flujos turbulentos o restricciones de flujo en tuberías de proceso.

Ciertos sistemas ultrasónicos incorporan transmisores que pueden ser instalados en el interior de tuberías o recipientes de instalaciones industriales. En este modo de funcionamiento, se emplean para identificar áreas donde las ondas ultrasónicas penetran a lo largo de la superficie del recipiente. Esta aplicación de transmisión ultrasónica resulta beneficiosa para llevar a cabo inspecciones rápidas de soldaduras en tanques, puntos de acceso, sellos, juntas, o incluso en la estructura de edificios.

La mayoría de los sistemas de monitoreo ultrasónico se presentan como escáneres que ofrecen una indicación de la amplitud general del ruido dentro del rango de frecuencias del instrumento. Sin embargo, no proporcionan información sobre tendencias a largo plazo ni tienen la capacidad de almacenar datos. En consecuencia, estos instrumentos se utilizan en inspecciones puntuales y su costo tiende a ser relativamente asequible.

La capacitación necesaria para emplear con eficacia las técnicas ultrasónicas, especialmente cuando se utilizan para detectar fugas, suele ser mínima. Dado el bajo costo de adquisición, la formación simplificada y el potencial impacto de las fugas en la disponibilidad de la planta, la incorporación de técnicas ultrasónicas en un programa de mantenimiento predictivo integral suele ofrecer una relación costo-beneficio favorable.

2.2.6.3.2.4.3 Limitaciones.

Es importante ejercer precaución al integrar la técnica de ultrasonidos en su programa de mantenimiento. Muchos sistemas de ultrasonidos se comercializan como herramientas para evaluar el estado de los rodamientos. Sin embargo, aunque las frecuencias naturales de los rodamientos estén dentro del rango de frecuencia detectado por los instrumentos ultrasónicos, esta técnica no es adecuada para determinar con precisión el estado de los rodamientos.

En una máquina típica, muchas otras dinámicas operativas también generan frecuencias que se encuentran dentro del rango de frecuencia cubierto por un instrumento ultrasónico. Las frecuencias relacionadas con el engrane de los engranajes, el movimiento de las palas y otros componentes de la máquina también pueden generar señales ultrasónicas que no se pueden separar de las señales producidas por los rodamientos supervisados mediante este tipo de instrumento. El único método confiable para evaluar el estado de componentes específicos de la máquina, incluyendo los rodamientos, es el análisis de vibraciones.

No se recomienda el uso de ultrasonidos para monitorizar el estado de los rodamientos. (Moblely,2002)

2.2.6.3.2.5 Inspección Visual.

La inspección visual regular de los equipos y sistemas de una planta es un componente esencial de cualquier estrategia de mantenimiento predictivo. En muchos casos, la inspección visual tiene la capacidad de detectar posibles problemas que podrían pasar desapercibidos al utilizar otras técnicas de mantenimiento predictivo.

Incluso con las técnicas mencionadas anteriormente, hay situaciones en las

que problemas importantes podrían no ser identificados. Llevar a cabo inspecciones visuales periódicas en todos los sistemas críticos de la planta fortalece las demás técnicas y asegura que los posibles problemas se detecten antes de que provoquen daños significativos.

La mayoría de los sistemas de mantenimiento predictivo basados en vibraciones incorporan la capacidad de registrar observaciones visuales como parte integral del proceso de recopilación de datos. Dado que los costos adicionales asociados con estas observaciones visuales son bajos, esta técnica debería formar parte de todos los programas de mantenimiento predictivo.

Es esencial realizar inspecciones visuales regulares en todos los equipos y sistemas de la planta. La información adicional obtenida a través de la observación directa contribuye a mejorar el programa de mantenimiento predictivo, independientemente de las técnicas principales que se empleen.

Como se mencionó previamente, las inspecciones son cruciales para determinar la necesidad de requisitos de mantenimiento preventivo, y es fundamental que sean no destructivas para no dañar el equipo.

A continuación, se describen algunos métodos comunes de ensayos no destructivos:

- *Sentidos del Cuerpo.* Vista, Olor, Sonido, Sabor, Tacto
- *Temperatura.* Termistor, Termómetro, Crayones, pegatinas, pinturas, Infrarrojos, Termopila, Flujo de calor
- *Vibración Desgaste.* Acelerómetro, Estetoscopio, Estroboscopio, Escucha ultrasónica, Alineación láser.
- *Defectos de los Materiales.* Magnéticos-Tinturas penetrantes, Corrientes de

Foucault-Radiografías, Ultrasonidos-Dureza Rockwell, Resonancia sónica.

- *Depósitos, Corrosión y Erosión.* Ultrasonidos, Radiografías, Potencial catódico, Peso.
- *Flujo.* Detector de Freón Neón, Bomba de Humo, Sensor de Gas, Manómetros de desconexión rápida, Manómetro.
- *Eléctrico.* Detector de averías del cable, Comprobador de salidas, HiPot, VOM, Osciloscopio, Pistola medidora de estática, Registrador de frecuencia, Medidor de ángulo de fase, Probador de disyuntores, Tensión transitoria
- *Química/Física.* Análisis espectrográfico del aceite, Humedad, Agua o anticongelante en gases/líquidos, Viscosidad, Metales presentes

Las pruebas pueden realizarse en componentes relacionados funcionalmente o en el producto de salida. Por ejemplo, la mayoría de las prensas de impresión, copiadoras y duplicadoras están pensadas para producir imágenes de alta calidad en papel. La inspección de esas copias de salida puede mostrar si el proceso funciona correctamente. En la copia aparecerán saltos, manchas, borrones y arrugas. Un buen inspector puede saber exactamente qué rodillo se está desgastando o qué rodamiento está causando los saltos. Una inspección minuciosa, que puede realizarse sin "desmontar" la máquina, ahorra tiempo al técnico y expone el equipo a posibles daños. (Mobley,2002)

2.2.5.3.2.5.1 Métodos de Inspección Visual.

La mayoría de las inspecciones visuales realizadas como parte de un programa de mantenimiento preventivo resultan ineficaces debido a que los métodos empleados son en su mayoría subjetivos. Por ejemplo, una tarea preventiva podría incluir la instrucción: "Verificar la tensión de la correa trapezoidal y ajustar

si es necesario". Sin embargo, este enfoque plantea interrogantes como: ¿cómo debe el técnico verificar la tensión? ¿Dónde debe realizar la medición? ¿Cuáles son los niveles aceptables de tensión? Para que una inspección visual sea efectiva, debe ser cuantificable, y todos los miembros del equipo deben aplicar los mismos métodos de manera uniforme. Los métodos concretos pueden variar, desde simples inspecciones visuales, como la detección de fugas o la lectura de un manómetro, hasta la utilización de instrumentos de medición, como vacuómetros o relojes comparadores, entre otros. En todos los casos, es esencial que los métodos establezcan de forma clara cómo se debe llevar a cabo la inspección, el lugar preciso donde realizar las mediciones o inspecciones, los criterios de evaluación y el rango aceptable de rendimiento.

En términos generales, las inspecciones visuales se pueden dividir en dos categorías principales: aquellas que dependen exclusivamente de los sentidos humanos y aquellas que requieren el uso de sensores o instrumentación especializada.

a) *Los Sentidos Humanos.*

Las personas tienen una notable capacidad para percibir información a través de sus sentidos, como imágenes, sonidos, olores, sabores, vibraciones y sensaciones táctiles inusuales. Por lo tanto, es fundamental que todos los líderes de mantenimiento se esfuercen en potenciar la sensibilidad de sus propios sentidos y la de su equipo. La experiencia suele ser un maestro valioso, pero en ocasiones vivimos situaciones sin comprender completamente lo que estamos experimentando. Por lo tanto, proporcionar unas pocas horas de formación sobre lo que se debe observar y detectar puede ser sumamente beneficioso.

Los sentidos humanos tienen la capacidad de percibir diferencias significativas, pero su sensibilidad a cambios pequeños tiende a disminuir con el tiempo. Para ilustrar este punto, consideremos si alguna vez ha intentado comparar si dos colores son idénticos sin tener muestras de ambos para hacer la comparación. Esta situación resalta la importancia de contar con patrones de referencia. Un estándar se convierte en una referencia para evaluar la situación actual. Por lo tanto, es fundamental proporcionar especificaciones cuantitativas, fotografías, grabaciones y ejemplos tangibles. Los parámetros críticos deben estar claramente definidos en las muestras, indicando lo que es aceptable y lo que no lo es. Lo ideal es que las evaluaciones puedan reducirse a una clasificación simple de "aprobado" o "reprobado".

A medida que se implementa un programa de mantenimiento preventivo basado en la fiabilidad, es importante recopilar muestras que ayuden a determinar de manera precisa el nivel de desgaste que puede ocurrir antes de que surjan problemas.

b) Sensores.

Debido a que los seres humanos no pueden mantener una vigilancia constante ni percibir pequeños cambios, y a menudo no pueden acceder a espacios reducidos, especialmente mientras los equipos están en funcionamiento, es esencial emplear sensores que puedan monitorear las condiciones y transmitir información a dispositivos indicadores externos. La tecnología de sensores ha experimentado avances significativos en términos de capacidad, precisión, tamaño y costo. Por ejemplo, se encuentran comúnmente en vehículos transductores de presión, termopares de temperatura, amperímetros eléctricos, contadores de revoluciones y

sensores de nivel de líquido utilizando flotadores.

En el caso de equipos rotativos como motores, turbinas, compresores, motores a reacción y generadores, se pueden aplicar técnicas de análisis de movimiento, posición y vibración. Los acelerómetros son dispositivos que se instalan de manera permanente en el equipo en dos ubicaciones separadas por 90 grados, lo que es perpendicular a los ejes de rotación. Estos acelerómetros miden sus salidas, que luego se pueden analizar mediante instrumentos portátiles de prueba y registradores gráficos, o mediante registradores permanentes con alarmas que señalan cualquier superación de umbrales problemáticos. Estos dispositivos pueden apagar automáticamente el equipo para evitar daños.

c) Análisis espectrométrico del aceite.

El proceso de análisis espectrométrico del aceite es útil para cualquier dispositivo mecánico móvil que utilice aceite para lubricarse. Comprueba la presencia de metales, agua, glicol, dilución de combustible, viscosidad y partículas sólidas. Los motores de automoción, los compresores y las turbinas se benefician del análisis del aceite. La mayoría de las grandes petroleras ofrecen este servicio si les compra lubricantes. La experiencia indica que el resultado típico es que se utiliza menos aceite y se reducen los costes con respecto antes de utilizar el análisis espectrométrico del aceite.

La mayor ventaja es la detección precoz del desgaste de los componentes. No sólo evalúa cuándo el aceite ya no lubrica correctamente y debe sustituirse, sino que también identifica y mide pequeñas cantidades de metales que se desgastan de las superficies móviles. Los elementos metálicos encontrados, y su cantidad, pueden indicar qué componentes se están desgastando y en qué grado, de modo que

el mantenimiento y la revisión puedan planificarse cuidadosamente. Por ejemplo, la presencia de cromo indicaría desgaste de la culata; el bronce fosforoso probablemente procedería de los cojinetes principales; y el acero inoxidable apuntaría hacia los taqués. Naturalmente, la experiencia con determinados equipos permite mejorar el diagnóstico.

2.2.6.3.2.6 Otras Técnicas.

Existen diversas técnicas no destructivas disponibles para detectar problemas iniciales en equipos o sistemas de planta. Sin embargo, algunas de estas técnicas pueden no ser adecuadas para una aplicación generalizada o resultar costosas en el contexto de un programa de mantenimiento predictivo. En consecuencia, estas técnicas se emplean principalmente para verificar los modos de fallo previamente identificados mediante las técnicas de mantenimiento predictivo abordadas en este capítulo.

2.2.6.3.2.6.1 Pruebas eléctricas.

Los métodos tradicionales de pruebas eléctricas deben utilizarse junto con el análisis de vibraciones para evitar el fallo prematuro de los motores eléctricos. Estas pruebas deben incluir:

Pruebas de Resistencia.

La resistencia se evalúa utilizando un óhmetro, aunque en realidad este dispositivo no mide directamente la resistencia, sino la corriente. La escala del medidor está calibrada en ohmios, pero su funcionamiento se basa en medir la corriente. El medidor suministra una corriente muy baja, generalmente del orden de 20 a 50 microamperios, al objeto de prueba al aplicar una tensión en sus terminales y luego mide la corriente en el circuito.

Desde una perspectiva práctica, las pruebas de resistencia son limitadas, pero aún pueden proporcionar información útil. Estas pruebas pueden identificar si un circuito está abierto o cerrado, lo que puede ayudar a detectar interrupciones en el circuito o cortocircuitos a tierra.

Es importante tener en cuenta que los componentes inductivos y capacitivos en el circuito pueden distorsionar las mediciones de resistencia. Los componentes capacitivos pueden inicialmente parecer un cortocircuito y luego abrirse gradualmente a medida que se cargan, mientras que los componentes inductivos pueden inicialmente parecer circuitos abiertos y su resistencia disminuirá a medida que se cargan. El tiempo necesario para cargar completamente condensadores e inductores está relacionado con las características reales de resistencia, capacitancia e inductancia en el circuito.

Además, al desconectar el medidor del circuito, es importante tener en cuenta que los elementos capacitivos e inductivos pueden retener carga, por lo que se debe tener precaución al desconectar el equipo de prueba.

Pruebas con Megger.

Para medir resistencias elevadas, se recurre a un dispositivo llamado megaóhmetro. A diferencia de un óhmetro convencional, que mide la corriente para determinar la resistencia, el megaóhmetro mide la tensión. En este proceso de prueba, se aplica una tensión relativamente alta, que varía entre 500 y 2,500 voltios según el equipo, al circuito, y se verifica que no se produzcan fallos. En general, se considera una prueba no destructiva, siempre y cuando la tensión aplicada no supere la capacidad nominal del aislamiento. Este método se utiliza principalmente para verificar la integridad del aislamiento. No detecta cortocircuitos entre devanados,

pero puede identificar problemas relacionados con tensiones más altas con respecto a tierra.

Prueba HiPot.

La prueba de alto potencial, conocida como prueba HiPot, es un método potencialmente destructivo utilizado para evaluar la integridad del aislamiento en sistemas eléctricos. En esta prueba, se aplican niveles de tensión que son el doble de la tensión nominal más un adicional de 1,000 voltios. Principalmente, algunos fabricantes de equipos y empresas de reconstrucción emplean esta prueba como parte de su proceso de garantía de calidad. Es fundamental entender que las pruebas HiPot causan daño al aislamiento en cada aplicación. Esta prueba tiene el potencial de deteriorar el aislamiento, incluso si este aún es funcional, lo que hace que su uso en campo no sea generalmente recomendado.

Pruebas de Impedancia.

La impedancia de una bobina consta de dos elementos: una parte real, que se relaciona con la resistencia, y una parte reactiva, que puede ser inductiva o capacitiva. Este enfoque de prueba resulta beneficioso debido a su capacidad para identificar cortocircuitos sustanciales en las bobinas, ya sea entre las vueltas de alambre de la bobina o en conexión con tierra. No existe otra técnica no invasiva que permita detectar un cortocircuito en el interior de una bobina entre sus vueltas de alambre.

Otras técnicas.

Otras técnicas que pueden ayudar al mantenimiento predictivo son las emisiones acústicas, las corrientes de Foucault, las partículas magnéticas, la tensión residual y la mayoría de los métodos no destructivos tradicionales. (Mobley,2002)

2.3 Proceso de Obtención del Cobre

El cobre se encuentra distribuido en la superficie terrestre, principalmente en minerales de cobre o en minerales que contienen una mezcla de metales, como el zinc y el plomo. Uno de los minerales primarios que contiene cobre es la calcopirita, que es una combinación de minerales de sulfuro de cobre y hierro, pero también incluye otros componentes. Para extraer el cobre de la calcopirita, se lleva a cabo un proceso que implica la trituración y molienda del mineral para separar los componentes valiosos de los no valiosos.

Este proceso de extracción del cobre de la calcopirita involucra dos etapas principales:

Fusión: En esta etapa, la calcopirita se calienta a alrededor de 1200°C, lo que la convierte de un estado sólido a líquido. Como resultado de este proceso térmico, se obtiene un material llamado "mata de cobre", que es una mezcla de cobre y hierro.

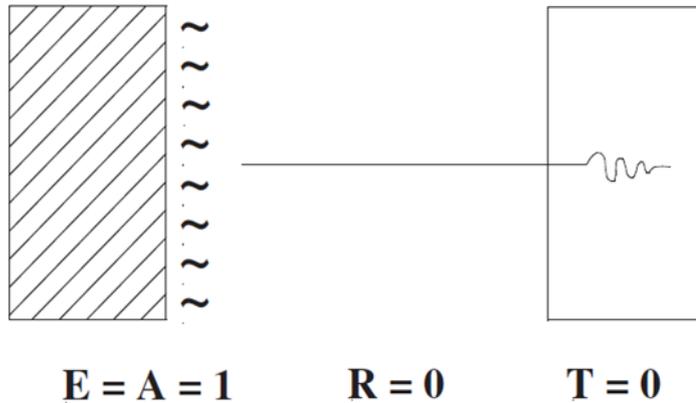
Oxidación en el Horno Convertidor PS: Luego, la mata de cobre se introduce en el horno convertidor PS, donde se somete a un proceso de oxidación. El propósito de esta etapa es obtener cobre blíster con una pureza que oscila entre el 96 y el 98%. Durante esta etapa, se generan reacciones que eliminan impurezas y aumentan la pureza del cobre.

Estos hornos convertidores se encuentran en fundiciones conocidas como SPCC, EL TENIENTE de la Empresa CODELCO de Chile etc.

Esta clase de horno es complementado por otros procesos mejoramiento de la calidad del cobre, pero debe ser uno de los más importantes. (Carrillo et al., 2004).

Figura 15

Proceso de Fundición del Cobre.



Nota. Adaptado de SPCC (2005)

2.4 Características del Convertidor Pierce Smith

El nombre de estos hornos se debe a sus creadores, William Peirce y E.A.Cappelen Smith, quienes eran el Gerente de Planta y el Jefe Metalurgista, respectivamente, de la Empresa Baltimore Copper Smelting & Rolling Company en New Jersey. A principios del siglo XX, inventaron un proceso para purificar la mata de cobre y producir cobre de alta calidad y pureza, conocido como cobre blíster. El convertidor PS es un reactor cilíndrico de burbujeo semicontinuo con dimensiones aproximadas de 4.5 metros de diámetro y 11 metros de largo.

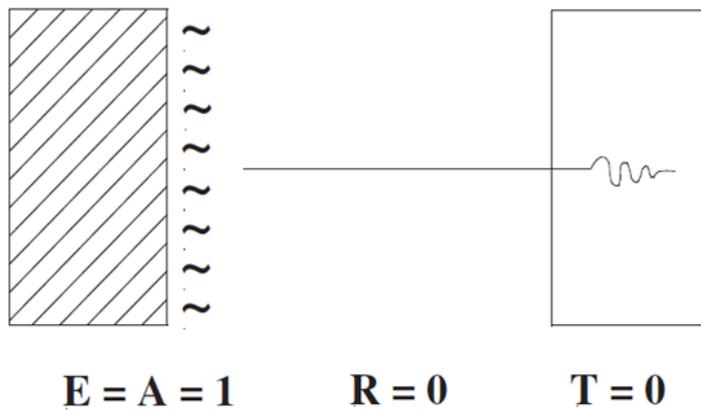
Para mejorar las condiciones del proceso y reducir las emisiones ambientales, se ha avanzado hacia un proceso cerrado en el que la carga inicial se mantiene constante a lo largo del proceso, sin necesidad de recargar más material.

El convertidor Peirce Smith es un horno ampliamente reconocido y utilizado en todo el mundo para la producción de cobre blíster. Es un reactor semicontinuo donde se transforma la mata y el metal blanco en cobre blíster al insuflar aire con oxígeno en el cobre fundido, lo que genera burbujeo y provoca reacciones de oxidación durante el procesamiento. Dado que se trata de un proceso por lotes, las

operaciones se realizan en dos etapas. En la primera etapa, se elimina el sulfuro del sulfuro ferroso y se escoria el hierro. En la segunda etapa, se eliminan los sulfuros del sulfuro cuproso, lo que da como resultado la producción de cobre blíster con una pureza que oscila entre el 98.5% y el 99.2%. (Inacap Chile, 2013)

Figura 16

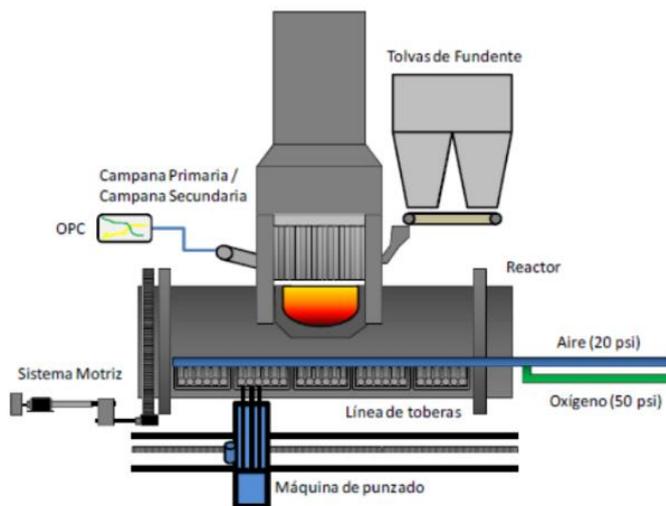
Convertidor Peirce Smith con sus Flujos y Partes Principales.



Nota. Adaptado Che León (2002)

Figura 17

Convertidor Peirce-Smith.



Nota. Adaptado de SPCC (2002)

En general, un Convertidor Peirce-Smith está compuesto de los siguientes sistemas y equipos:

- Un sistema para suministro de oxígeno técnico y aire comprimido.
- Un reactor de forma cilíndrica con boca para carguío y para salida de gases.
- Un sistema para alimentación del fundente.
- Una máquina para de punzado de las toberas.
- Una campana primaria.
- Una campana secundaria.
- Un sistema de fuerza motriz.
- Un dispositivo espectroscópico de óptica de llama.

Figura 18

Diagrama de Flujo de La Nueva Fundición de Ilo.

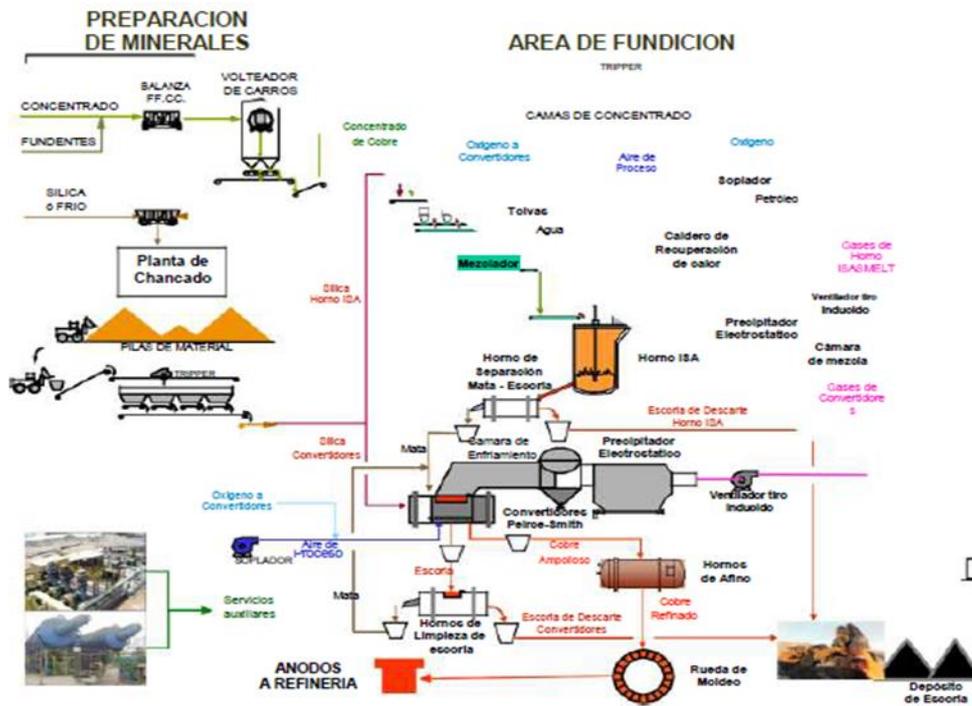


Figura Nº 2.1.
Diagrama de Flujo de la Nueva Fundición

Nota. Adaptado de Tiburcio (2019)

El reactor, diseñado por Peirce y Smith entre los años 1897 y 1906, se compone de tres estructuras con soportes giratorios y un sistema de alimentación en la parte posterior. Un cable enrollado alrededor de la estructura media del reactor se utiliza para girar el horno mediante un mecanismo electromecánico. Sus dimensiones aproximadas son un diámetro de 10 pies y una longitud de 26 pies.

Las características principales de este proceso son las siguientes:

El proceso se denomina "Batch" y se basa en la ejecución de ciclos de operación, lo que implica mantener varias unidades operativas para alcanzar la producción deseada.

El CPS es un reactor móvil y abierto, lo que lo convierte en una fuente de emisiones de gases contaminantes debido a las reacciones de oxidación en su interior. Sin embargo, los niveles de emisiones dependen de las operaciones e instalaciones que capturan los gases y los envían a la planta de ácido sulfúrico.

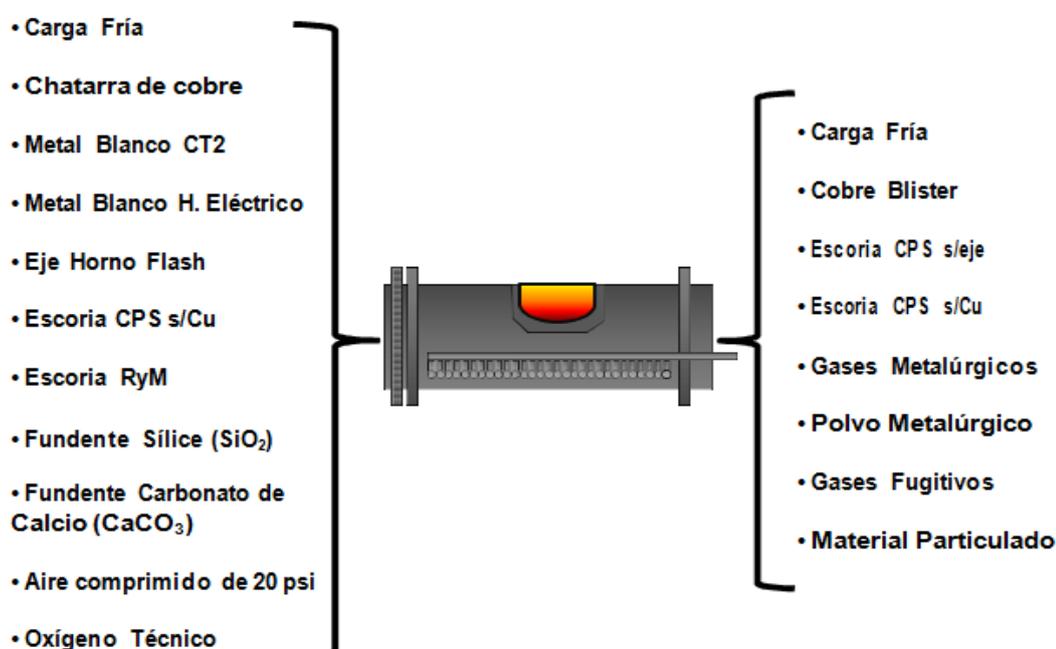
La alimentación proviene del horno de fusión flash con un contenido promedio de cobre del 62%, y luego se realiza el soplado del cobre.

La capacidad de producción está relacionada con el tamaño del horno, la cantidad de aire inyectado a través de las toberas, el suministro de oxígeno, la continuidad del proceso y la ley del cobre alimentado. Todos estos parámetros afectan la dinámica de las reacciones en el proceso y, por lo tanto, el tiempo de operación conocido como "tiempo efectivo de soplado" y la "velocidad de conversión", tanto para el soplado al cobre como al soplado a la escoria. Estos son los principales parámetros utilizados para controlar el proceso.

En la Figura 19 se presenta un diagrama que ilustra los elementos principales que entran y salen del horno convertidor Peirce Smith en la Fundición de Ilo de Southern Perú. Se pueden observar elementos de entrada como la carga fría, chatarra de cobre, escoria, fundente, aire comprimido, oxígeno técnico, entre otros. Los productos de salida incluyen cobre blíster, carga fría, escoria, gases metalúrgicos, polvo metalúrgico, material particulado, entre otros.

Figura 19

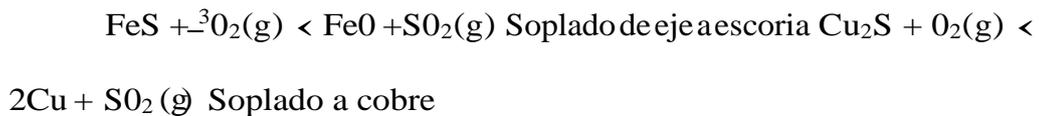
Diagrama de Entrada/Salida Proceso Conversión Peirce-Smith.



Nota. Adaptado de SPCC (s.f)

2.5 Conversión de Eje y Metal Blanco para Producir Cobre Blíster

Las reacciones principales que ocurren dentro del proceso el flujo de aire con oxígeno que ingresa por las toberas al reactor, denominado “aire de soplado”, hace que se oxiden las moléculas del sulfuro de cobre Cu₂S y sulfuro de hierro FeS, teniendo como productos óxidos de hierro y cobre respectivamente. Las siguientes reacciones son las que gobiernan las etapas de los procesos:



Se producen reacciones secundarias en el proceso que están relacionadas con la formación de la escoria. En este contexto, el óxido de hierro FeO se oxida, dando lugar a la formación de magnetita Fe₃O₄ y, en parte, a la fayalita. Además, se produce la oxidación del cobre durante la etapa de soplado.

Cada escoria tiene una composición determinada, siendo el grado de oxidación la que determine al interior del reactor. Durante la etapa de soplado, la escoria tiene una composición básicamente de magnetita Fe₃O₄, fayalita, además de óxido de cobre debido a la sobre oxidación. También se encuentra con la presencia de sulfuros de cobre Cu₂S, sulfuros de hierro FeS y otros sulfuros metálicos, los cuales forman parte de la escoria como producto del arrastre mecánico producido por agitación del mineral fundido durante el vaciado del reactor. (Etcheverry, 2013).

2.6 Descripción de Los Equipos que Componen El Proceso

El Convertidor Peirce Smith, por lo general está compuesto por los siguientes equipos y sistemas:

- El Reactor Cilíndrico para Carguío y Salida Gases.
- Campanas primarias.
- Campanas secundarias.
- El Sistema para Alimentación del Fundente.
- La Máquina para Punzado de las Toberas.
- Sistema de dotación de oxígeno técnico y de aire comprimido.
- Sistema de Fuerza Motriz.

2.6.1 El Reactor.

El equipo principal encargado de llevar a cabo el proceso de conversión es un cilindro horizontal que cuenta con un sistema de fuerza motriz. Este cilindro tiene la capacidad de bascular sobre su propio eje de rotación, y en el momento de la operación, se mueve desde lo que se conoce como la "posición de soplado" hasta la "posición de alimentación" o "posición de carguío".

Este equipo también está equipado con toberas a través de las cuales se inyecta aire y oxígeno. Esto es esencial para el proceso de oxidación del azufre, una fase comúnmente denominada "soplado".

La característica básica geométrica del convertidor que se halla en la Fundición son las mostradas en la siguiente Tabla 2. (Etcheverry,2013).

Tabla 2

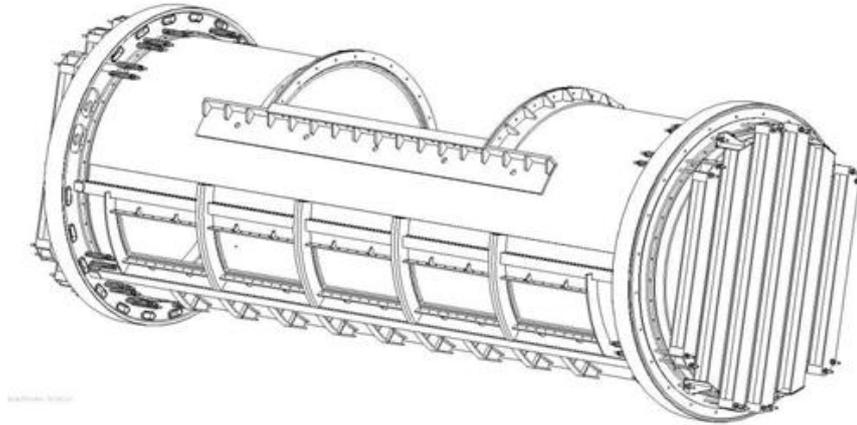
Característica Geométrica Convertidores Peirce-Smith Fundición Chuquicamata.

Parámetros	Unidad	Valor
Reactor		
- Longitud exterior	m	13,2
- Diámetro exterior	m	4,5
- Área de la boca (carguío/salida de gases)	m ²	11,3
Línea de Toberas		
- Número total de paños de toberas	Unid	5
- Cantidad de toberas por paño	Toberas/paño	1
- Número de toberas	Unid	5
- Diámetro nominal de las toberas	pulgadas	1/8
Mampostería Refractaria		
- Espesor en zona de toberas	pulgadas	1
- Espesor en el resto del manto	pulgadas	5
- Espesor en la culata	pulgadas	4

Nota. Adaptado de Refinería DC (2002)

Figura 20

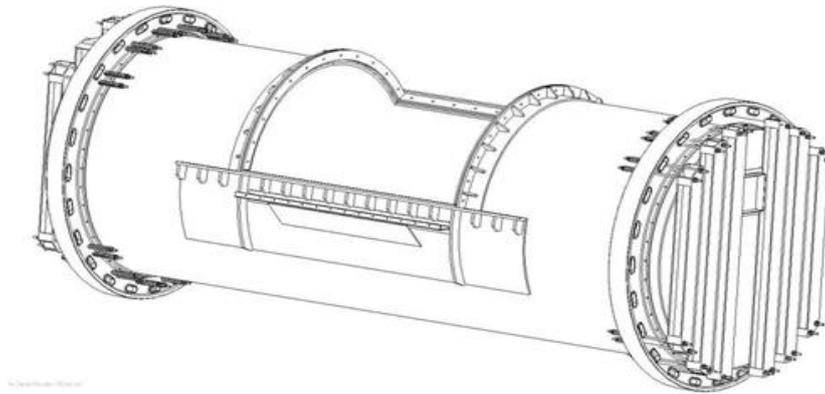
Convertidor Peirce- Smith-vista desde Línea de Toberas.



Nota. Adaptado de SPCC (s.f)

Figura 21

Convertidor Peirce- Smith-vista desde Boca de Carguío.



Nota. Adaptado de SPCC (s.f)

2.6.2 Máquina para El Punzado de Las Toberas.

Las toberas del reactor permanecen abiertas de forma constante para permitir la entrada de aire de soplado, un elemento fundamental en el proceso del horno de conversión.

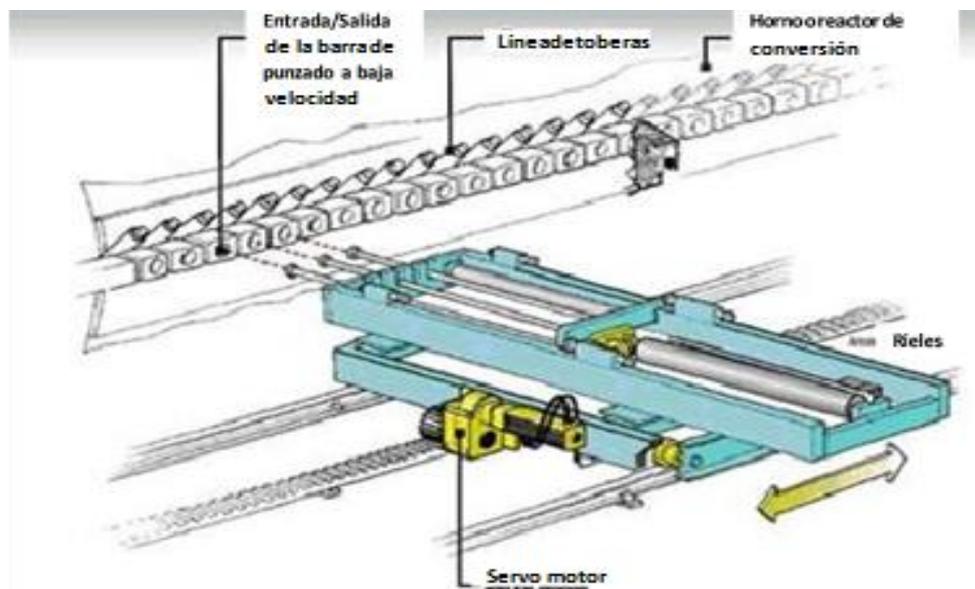
Cada Convertidor Peirce Smith (CPS) cuenta con una máquina de punzado que proporciona la autonomía necesaria en sus operaciones. Estas máquinas se desplazan a lo largo de rieles que generalmente están dispuestos de manera paralela a la línea de las toberas del reactor. La fuerza motriz para su funcionamiento se obtiene de la presión neumática generada por las redes de aire comprimido, que opera a una presión de 90 psi en la planta. Las máquinas son operadas manualmente, lo que requiere de un operador ubicado en una cabina de control. Este operador maneja los controles para controlar el desplazamiento de las máquinas sobre los rieles y para llevar a cabo la operación de punzado de las toberas.

Cada máquina de punzado tiene la capacidad de utilizar hasta cuatro barras en funcionamiento simultáneo, aunque en la práctica, normalmente solo se emplean dos debido a los desafíos de alineación que se presentan en cada reactor.

Un dispositivo llamado "veleta" permite al operador realizar los ajustes necesarios para determinar el orden en que se efectuará el punzado de las barras. Esto solo es posible cuando el equipo se encuentra posicionado frente a las toberas y se encuentra enclavado. La operación de punzado y avance de las barras se logra gracias a la fuerza generada por un cilindro de 60" x 73" de largo. (Etcheverry,2013)

Figura 22

Máquina para Punzado.



Nota. Adaptado de Heath (s.f.)

2.6.3 Alimentación de Fundente.

Para la alimentación del fundente: sílice, SiO_2 , se utilizan dos tolvas de 80 toneladas de capacidad que alimentan por una correa transportadora a velocidad constante por gravedad y que introduce todo el material necesario a un depósito que lo conduce hacia el interior del reactor. Dicho depósito se halla dentro de un carro móvil, que cuando se tiene que adicionar la sílice, debe desplazarse hacia el reactor, colocando la punta del depósito al interior del horno convertidor.

2.6.4 Dotación de Oxígeno Técnico y Aire Comprimido.

El sistema de soplado de aire para los convertidores Peirce Smith consiste en una red de varias tuberías que se origina en la planta de generación termoeléctrica y se extiende hasta el sistema de toberas de soplado en los hornos convertidores.

El aire comprimido se suministra desde el sistema principal o manifold de distribución en la planta, proporcionando aire a una presión de 20 psi y a una

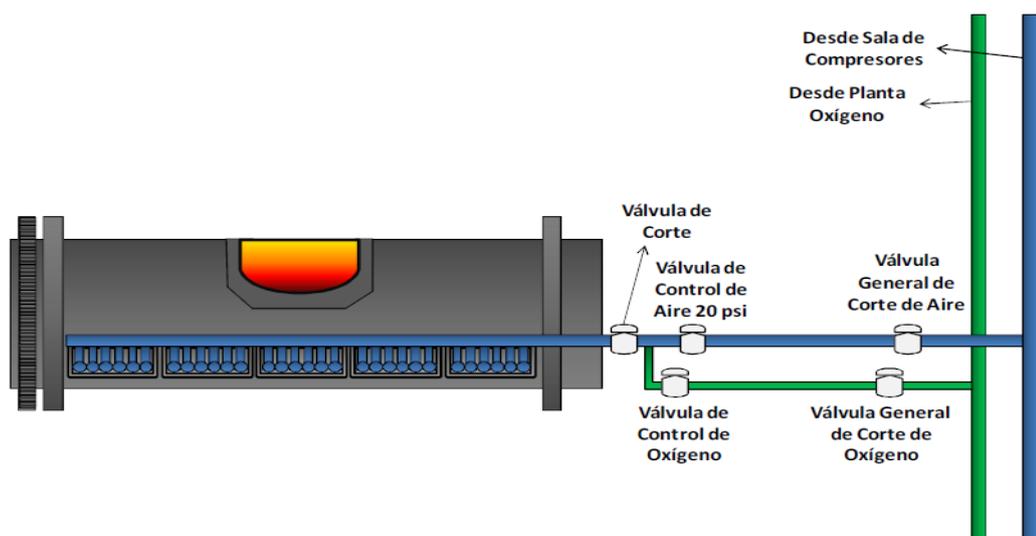
temperatura de 100 °C a los convertidores en funcionamiento. Estos conductos, al acercarse a los hornos convertidores, se conectan a cada uno de ellos a través de un sistema que incorpora una válvula de corte general, válvulas de control y válvulas de cierre, numeradas en orden desde la más cercana a la más lejana del convertidor. Esta línea de suministro de aire llega a un múltiple situado en la base del reactor, desde donde se distribuye uniformemente el aire a cada una de las toberas del horno.

El oxígeno se suministra a una presión de 50 psi a través de una tubería principal que conecta con las plantas de oxígeno de la fundición. Luego, esta se une a una línea de aire a 20 psi después de la válvula de control presente en cada horno. Los conductos de oxígeno también incluyen válvulas generales, de cierre y de control.

En la siguiente Figura 23 se muestra un diagrama o esquema de la dotación de oxígeno y aire comprimido al horno. (Etcheverry,2013)

Figura 23

Sistema de Dotación de Oxígeno y Aire Comprimido.



Nota. Adaptado de SPCC (s.f)

2.6.5 Sistema de Mando Motriz.

El reactor cuenta con un mecanismo basculante que se logra mediante el uso de un sistema de rodillos (polines) que descansan sobre una estructura de concreto armado y acero. Estos rodillos permiten la rotación del horno alrededor de su eje longitudinal y se desplazan a lo largo de dos pistas de rodadura ubicadas a ambos lados del cilindro, cubriendo todo su perímetro.

El horno PS se apoya en un total de ocho rodillos, cuatro en cada una de las pistas de rodadura. El sistema motriz de estos hornos Convertidores es mecánico y permite un giro bidireccional claramente identificable, compuesto por componentes específicos.

Dichos componentes son:

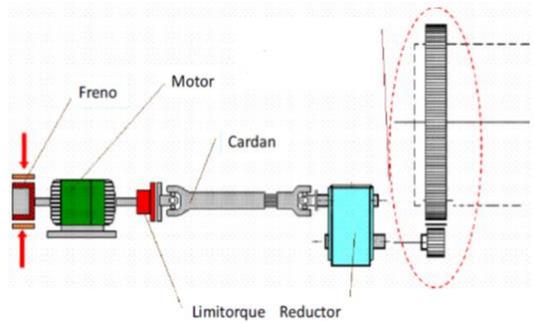
- El freno
- El motor
- El sistema limitorque
- El cardán
- El reductor de velocidades
- El sistema de acople al Convertidor.

Este sistema de acople corresponde al torque o par mecánico generado por el motor

Y que es aplicado finalmente para hacer girar el cilindro.

Figura 24

Sistema de Mando Motriz.



Nota. Adaptado de SPCC (s.f)

2.5.6 Espectroscopia Óptica.

Para monitorear y seguir el desarrollo del proceso en el convertidor, se utiliza un dispositivo en el reactor que permite llevar a cabo un análisis espectroscópico de la luz emitida por ciertos componentes presentes en los gases metalúrgicos que se producen durante la etapa de procesamiento. Estos componentes incluyen el plomo sulfuroso (PbS), plomo óxido (PbO) y el hidróxido de cobre (CuOH). A medida que las propiedades físicas del mineral fundido y la escoria cambian durante el proceso, las composiciones de los gases de salida también se modifican.

El sistema de monitoreo permite obtener la información que permite identificar las condiciones de operación siguientes:

- La terminación del Soplado a la Escoria
- La falta de Fundente: sílice.
- El exceso de oxidación en el soplado a la escoria o sobre soplado.
- El proceso del primer escoriado que está listo para efectuarse.
- Momento del perfecto escoriado.
- Perfecto soplado al cobre.

CAPÍTULO III

APORTES Y DESARROLLO DE EXPERIENCIAS

3.1 Aportes utilizando los conocimientos o bases teóricas adquiridos durante la carrera

Los aportes utilizando los conocimientos o bases teóricas adquiridos durante la carrera en este proyecto de suficiencia profesional son fundamentales para el éxito.

3.1.1 Comprender los Principios de Operación

Los conocimientos teóricos sobre los principios de operación de los hornos convertidores y los procesos de fundición y conversión del cobre permitieron una comprensión profunda de cómo funcionan estos equipos. Esto es esencial para identificar problemas y diseñar soluciones efectivas.

3.1.2 Diseño de la Boca Bridada

La decisión de diseñar una nueva "Boca Bridada" en lugar de utilizar las bocas soldadas anteriores se basó en una comprensión teórica de la soldadura, sus desafíos y riesgos. El diseño de una solución más segura y eficiente se apoyó en estos conocimientos teóricos.

3.2 Desarrollo de experiencias

La experiencia lo aprendes en el campo mejorando el diseño de la Boca Embridadada con seguridad, eficiencia y tecnología, para el mejoramiento de la empresa y lograr resultados de trabajo en menos tiempo.

3.2.1 Descripción de Los Trabajos Realizados

3.2.1.1 *Fabricación de Boca Bridada.*

En el ámbito de la innovación, hemos desarrollado una mejora significativa al fabricar una boca bridada para el horno convertidor Peirce Smith. Este avance representa un cambio importante con respecto a las bocas anteriores que estaban soldadas a la estructura principal. El reemplazo de estas bocas solía ser un proceso tedioso y necesario cada año debido al desgaste, lo que dificultaba su extracción y montaje.

Para abordar esta problemática, decidimos rediseñar la forma y el ensamblaje de la boca, convirtiéndola en una versión bridada que se puede montar fácilmente mediante uniones empernadas. Esta innovación ha recibido la aprobación y el reconocimiento de las altas autoridades de nuestra empresa, y también ha sido premiada. Además, empresas chilenas mostraron un gran interés en esta innovación y visitaron nuestras instalaciones para conocer tanto su funcionamiento como el proceso de fabricación y montaje.

3.2.1.2 *Proceso de Fabricación de Boca Bridada.*

Para la confección de las bocas bridadas se ha utilizado la siguiente secuencia:

- A. Corte de 2 piezas de plancha de acero de 2 pulgadas a 40 grados, cuya medica exterior es de 4500 mm por 152 mm.
- B. Corte de 2 pieza de planchas de acero de 1 pulgada de dimensiones 6000

mm por 127 mm

- C. Corte de 2 piezas de plancha de acero de 1 pulgada de medidas 4500 mm por 127 mm
- D. Hacer hueco cuadrado en plancha de 1 pulgada, con medidas 152 x 152 mm
- E. Cortar plancha de acero de 1 pulgada a 30 grados cuyas medidas son 3500 mm x 400 mm
- F. Cortar plancha de acero de 1 pulgada a 40 grados, cuyas medidas son 3500 mm x 127 mm
- G. Habilitar plancha de acero de 1 y media pulgada a 40 grados, de medidas externas de 3500 mm x 600 mm.
- H. Cortar plancha de acero de 1 pulgada para confeccionar 16 piezas de cartelas largas de 450 mm x 127 mm.
- I. Habilitar 2 piezas de plancha de acero de 1 y media pulgadas a 40 grados, cuyas medidas son 1700 mm x 600 mm.
- J. Cortar planchas de acero de 1 pulgada para confeccionar 16 piezas de cartelas, cuyas medidas son 127 mm x 26 mm.
- K. Habilitar planchas de acero de 1 pulgada para confeccionar 7 piezas de cartelas, cuyas medidas son 102 mm x 26 mm.
- L. Confeccionar huecos para los pernos en la brida de 34 mm de diámetro.
- M. Soldadura de uniones y cartelas con soldadura Innershield de 3 mm.
- N. El peso de la Boca fabricada para el Convertidor es de 7200 kg.

Figura 25

Convertidor Peirce Smith.



3.2.3 Materiales y Equipos Utilizados.

Todos los materiales utilizados son nuevos y cuentan con una calidad reconocida. Son productos de primer uso que actualmente son ampliamente aceptados en los mercados nacionales, internacionales y locales. Además, vienen respaldados por las garantías vigentes proporcionadas por los fabricantes.

En el sitio de la obra, se toman medidas para asegurar que los materiales sean almacenados de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Esto se hace para evitar daños a los materiales, a los equipos de la obra, a las personas involucradas en el proyecto y a terceros. La responsabilidad de garantizar un adecuado almacenamiento recae en el supervisor de la obra.

Es fundamental que todo el material recibido en el sitio de la obra sea

almacenado de manera apropiada y puntual, siguiendo las especificaciones proporcionadas por el fabricante y las recomendaciones detalladas en los manuales de instalación. Esto se realiza con el objetivo de mantener las condiciones de almacenamiento lo más cercanas posible a las óptimas.

Los principales materiales utilizados en la fabricación de las Bocas Bridadas son:

- Planchas de acero ASTM A515 de 1 pulgada de espesor
- Planchas de acero ASTM A515 de 1.1/2 pulgada de espesor
- Soldadura de hilo tubular autoprotegido Innershield AWS E70T-7
- Planchas de acero ASTM A515 de 2 pulgadas de espesor

3.2.3.1 Equipos, Máquinas y Herramientas.

Los equipos utilizados son nuevos, exclusivos para la fabricación de la boca bridada del horno convertidor Peirce Smith, los cuales pasamos a enumerar:

- Equipos de soldadura FCAW-S: 02 unidades
- Equipo de oxicorte: 01 unidad
- Pistola de impacto neumático: 01 unidad
- Esmeril neumático: 02 unidades
- Escuadra de plancha de 24 pulgadas: 02 unidades
- Prensas de 12 pulgadas: 04 unidades
- Tecles de 4 toneladas: 02 unidades
- Tiralínea y winchas

Para ejecutar obras de mantenimiento y reparación del horno convertidor Peirce Smith, en las inmediaciones se instalan los equipos que se van a necesitar en la ejecución de dichos trabajos, como son:

- Máquinas de soldar MIG/MAG 04 unidades.
- Equipos de soldadura oxiacetilénica 02 unidades
- Herramientas:
 - Tecles de 5 toneladas, cantidad 02
 - Tecles de 3 toneladas, cantidad 02
 - Tenazas de arcair, cantidad 02
 - Grilletes de 1pulg, cantidad 08
 - Gatas hidráulicas de 50 toneladas, cantidad 02
 - Escuadras de 24 pulg, cantidad 02
 - Pernos de 1 pulg. X 5 pulg, cantidad 40
 - Llaves de impacto neumático de diverso calibre
 - Juegos de dados de diverso calibre
 - Rollos de soldadura innershil alambre 3 mm
 - Estrobos de 1pulg x 3mts, cantidad 08
 - Esmeriles neumáticos cantidad 02

3.2.3.2 La Mano de Obra.

Será calificada y con experiencia certificada, ejecutará las labores o trabajos siguiendo las normas vigentes y las recomendaciones efectuadas por los fabricantes de los accesorios o productos a ser utilizados o instalados, debiendo tenerse cuidado especial que presenten buen aspecto de instalación y limpieza final de los accesorios y aparatos expuestos a la vista, contando para ellos con la supervisión y dirección de la Superintendencia de Planta, siendo entera responsabilidad de éste último el estricto cumplimiento del Proyecto y de la Normatividad Vigente.

Figura 26

Vista de la Estructura de la Boca Bridada, Lado Superior.



Figura 27

Vista de la Estructura de la Boca Bridada, Lado Lateral.



3.3.4 Reparaciones del Horno Pierce Smith.

3.3.4.1 Reparaciones.

Estas labores de reparación se enfocan principalmente en el monitoreo

térmico de los materiales conocidos como ladrillos refractarios de los Convertidores Peirce Smith. Una vez que se ha llevado a cabo este control, se elabora un plan y un cronograma de reparaciones que abarca tres modalidades o tipos de mantenimiento o reparaciones de envergadura. Estos son:

- Reparación o mantenimiento Parcial
- Reparación o mantenimiento General.
- Reparación o mantenimiento Total.

a) Reparación o mantenimiento parcial.

La reparación de esta modalidad consiste en el cambio parcial de materiales y ladrillos refractarios en áreas con desgaste mayor con el fin de asegurar su operación segura del horno PS en la campaña próxima.

Así mismo, en los trabajos de reparación de tipo mecánico, se realizó lo siguiente:

- Cambio de la estructura de soporte de la boca.
- Cambio de elementos de refuerzo en línea de toberas.
- Cambio de la totalidad de las toberas.

El tiempo estándar de la reparación dura aproximadamente 6 días.

b) Reparación o mantenimiento general.

La reparación refractaria, aunque parcial, involucra un mayor porcentaje de reemplazo en comparación con la reparación parcial. Esto se hace con el propósito de sustituir todas las partes o áreas que presentan un desgaste significativo, asegurando así que la reparación permita un funcionamiento seguro del horno en las próximas campañas. Además de las reparaciones mecánicas, se llevan a cabo los siguientes trabajos:

- El cambio total de las toberas.
- El cambio de las planchas de refuerzo en la línea de las toberas.

El tiempo de la ejecución de la reparación dura de manera aproximada 11 días.

Figura 28

Muestra de Ladrillos Desgastados Parte Boca del CPS.



c) Reparación total.

Esta reparación consta de un cambio total de ladrillos refractarios del horno PS, los cuales son Ladrillos Repsa, modelo Machín 60, tipo de ladrillo Cuña, con medidas 18” de largo por 6” de ancho para el casco del convertidor, y el mismo ladrillo Machín 60 de 18” por 4” para tapas de los costados del convertidor. En el convertidor entran 120 filas dispuestos horizontalmente en todo el casco.

Además, en la ejecución de las reparaciones mecánicas, se realizan las siguientes operaciones:

- Se cambia de manera total la estructura de la boca.
- El cambio total de las toberas y líneas.
- Enderezado de la carcasa y otras estructuras.

- Cambio total de sellos y ponchos.

El tiempo de ejecución de las reparaciones dura aproximadamente de 17 días, los cuales se dividen en: 2 días para cambio de boca bridada, 3 días para colocación de ponchos y sellos, y finalmente 12 días para cambio total de ladrillos refractarios.

Figura 29

Vista del Interior del Horno.



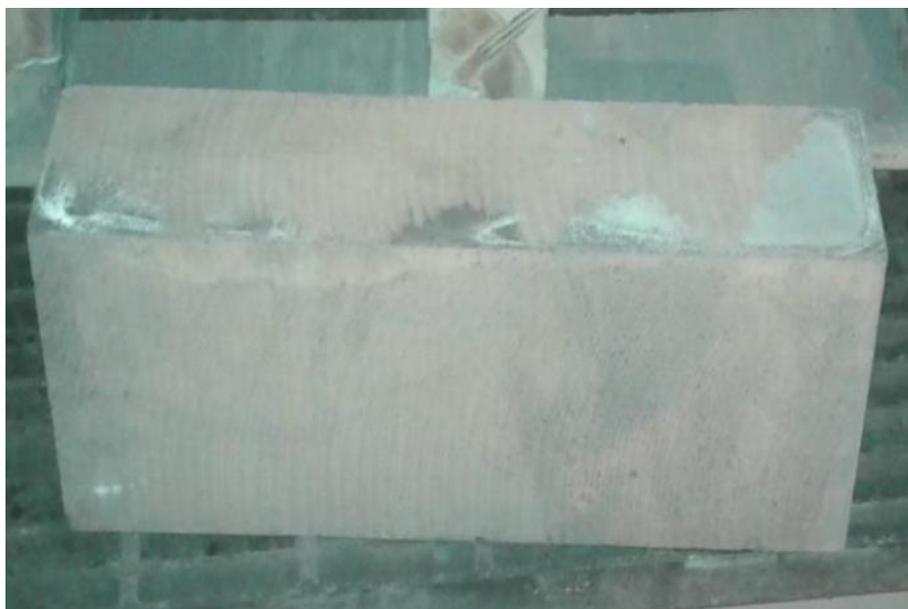
Figura 30

Boca del Convertidor Peirce Smith.



Figura 31

Superficie del Ladrillo Nuevo.



Nota. Fotos tomadas en la función de Ilo SPPC

3.3.4.2 Mantenimiento de mecanismos del horno Peirce Smith.

a) Máquina de Punzado de Toberas.

El propósito de esta máquina es garantizar que las toberas del reactor se mantengan en funcionamiento para permitir el flujo de aire necesario en el proceso de conversión. En la actualidad, se dispone de una máquina de punzado para cada horno convertidor. Su funcionamiento implica desplazarse a lo largo de un riel que se encuentra paralelo a la línea de toberas del reactor, y obtiene la fuerza motriz a través de la presión neumática generada por el aire comprimido a 90 psi que se encuentra en la red de la planta.

Alineamiento en la línea de las toberas.

Para que el sistema de punzado funcione de manera eficiente, sin interrupciones y logre mantener la corriente de aire de soplado en el nivel necesario,

es necesario que el área de mantenimiento mecánico y refractario se encargue de esta tarea. Además, se requiere establecer un estándar cada vez que se realice una reparación con el fin de garantizar la completa eliminación del refractario del reactor. Durante la reconstrucción, es esencial asegurarse de que la línea de toberas

Figura 32

Sistema de Punzado de Toberas.



b) Motores Accionados por Eléctricos.

El Convertidor Peirce Smith está equipado con un motor eléctrico de corriente continua para su accionamiento. Las características principales son:

Marca Westinghouse, Voltaje 550 DC, Potencia 75 HP, Velocidad 500 rpm, Excitado en serie, modelo MCA 75 serie 222690.

Figura 33

Motores Eléctricos del Horno Convertidor.



c) Sistema de Frenos Magnéticos.

El sistema de frenado tiene la responsabilidad de detener el convertidor cuando es necesario. Su estructura fundamental comprende una bobina en serie de 500Vcd. Cuando esta bobina no recibe energía, las bandas o pastillas mantienen el motor frenado. Sin embargo, al aplicar tensión a esta bobina, se genera un campo magnético que separa las bandas, permitiendo el movimiento del motor.

Las principales características de este sistema de frenos incluyen la marca Westinghouse, el empleo de una bobina en serie de 500Vcd y un diámetro de

tambor de 20 pulgadas. Asimismo, se identifica por la serie numerada 2433631.

Figura 34

Sistemas de Frenos Magnéticos.



d) Contactores Electromecánicos.

Mediante estos componentes, se activa la bobina que regula la apertura y cierre de sus contactos, lo que facilita la ejecución del control lógico. Algunas de las características principales de estos elementos abarcan su marca, que es Westinghouse, su serie numerada 857D506G02 y la utilización de bobinas de excitación a 500Vcd y 120Vcd.

e) Equipos de Resistencias.

Estos elementos constituyen una parte esencial del sistema destinado a incrementar la velocidad del motor, lo cual se produce al ir reduciendo gradualmente la carga de las resistencias. Algunas de las características fundamentales de estos componentes son su marca, que es Westinghouse, y su

modelo denominado LG.

f) Relevadores de Tiempo.

Estos componentes forman parte de la sección encargada de incrementar la velocidad del motor. Cuentan con un mecanismo de ajuste de tiempo de naturaleza mecánica que, cuando se alcanza el periodo establecido, activa su contacto correspondiente. Esto resulta en la alimentación de los contactores electromecánicos que a su vez provocan el cortocircuito de las resistencias de aceleración del motor. Algunas de las características más destacadas de estos elementos incluyen su marca, que es Westinghouse, y su serie numerada 1293490.

g) Sistema de Acoplamientos de Transmisión.

Este sistema conecta directamente los ejes de transmisión de potencia y se compone de una estructura compacta que incorpora una brida con pernos rígidos. Estos pernos no admiten ninguna forma de desalineación y, en su mayoría, se utilizan en los ejes de transmisión de puentes y en los carros empleados en grúas puente.

h) Caja de Reducción.

La caja reductora es un dispositivo que típicamente se compone de un conjunto de engranajes diseñados para mantener una velocidad de salida constante que se aproxime al valor requerido para el generador. Por lo general, esta caja reductora incorpora un tornillo sin fin que reduce significativamente la velocidad.

Figura 35

Caja de Reducción.



i) Eje Cardan.

Un eje cardánico es un dispositivo que conecta dos ejes rotando a un ángulo determinado entre sí, permitiendo la transferencia del movimiento rotativo a pesar de este desfase angular. En la mayoría de los vehículos de motor de combustión interna, el eje cardánico se utiliza como parte del árbol de transmisión, encargándose de llevar la potencia desde la parte frontal del motor hacia las ruedas traseras.

Figura 36

Eje Cardán.



j) Engranajes, Piñón - Corona.

Las ruedas dentadas, comúnmente conocidas como engranajes, representan un mecanismo ampliamente empleado en la transmisión de potencia en diversas máquinas. Estos engranajes constan de dos ruedas dentadas que encajan una con la otra. Por lo general, una de ellas, llamada corona, tiene un mayor número de dientes, mientras que la otra, denominada piñón, es de menor tamaño. Para lograr la transmisión del movimiento, es esencial que ambas ruedas tengan un paso y módulo idénticos.

k) Mecanismo del Tornillo sin Fin.

Se trata de un sistema mecánico diseñado para transferir potencia y movimiento rotativo, destacando por su capacidad de reducción de velocidad y aumento del torque, lo que permite generar fuerzas significativas. Un rasgo distintivo es su habilidad para transmitir movimiento a ejes perpendiculares, es decir, ubicados a 90 grados entre sí.

Sin embargo, una de las desventajas notables es que el sentido de giro no es reversible, especialmente cuando se emplean relaciones de transmisión considerables. Además, este sistema consume una cantidad apreciable de potencia debido a la fricción.

En construcciones de alta calidad, se fabrica la rueda corona con bronce, mientras que el sinfín se elabora con acero templado para minimizar la fricción.

Figura 37

Tornillo sin Fin.



3.4 Presentación de Los Resultados

3.4.1 Resultados de Las Intervenciones en El Horno CPS.

Como resultado de las acciones llevadas a cabo en las áreas de innovación, reparación y mantenimiento del horno convertidor Peirce Smith, se han obtenido resultados sumamente exitosos. En el pasado, las paradas de planta solían extenderse más allá de los 20 días debido a la dificultad en el retiro e instalación de las bocas soldadas. Sin embargo, gracias a la introducción de las bocas bridadas, estos procesos se han vuelto considerablemente más ágiles.

De manera similar, el cambio de refractarios ha mostrado mejoras significativas en el rendimiento del personal a lo largo del tiempo, gracias a las técnicas implementadas con este propósito. Lo mismo se aplica a los mecánicos y electricistas, cuya eficiencia en el mantenimiento de los equipos bajo su responsabilidad ha mejorado sustancialmente en términos de tiempo.

En resumen, el horno convertidor Peirce Smith se encuentra en excelentes condiciones y opera al máximo de su capacidad con éxito.

Campamentos.

Los contratistas establecen campamentos en las proximidades, a una distancia adecuada, utilizando contenedores para almacenar herramientas y configurar áreas de comedor para sus trabajadores. Además, se mantiene una vigilancia constante mediante el uso de equipos de radio de largo y mediano alcance que permiten la comunicación entre el campamento y las oficinas centrales. También se dispone de equipos de primeros auxilios y extintores contra incendios en estas instalaciones.

3.4.2 Personal.

El personal que labora en la reparación y mantenimiento del horno Peirce Smith básicamente está compuesto por ingenieros, supervisores, técnicos y obreros.

Dentro del personal técnico y obreros están:

Soldadores: cantidad 08

Soldadores por turno: cantidad 04

Cada turno es de 12 horas

Mecánicos un solo turno: cantidad 02

Albañiles especializados: cantidad 14

Albañiles por turno: cantidad 07

Eléctricos un solo turno: cantidad 02

El personal que ha sido contratado para llevar a cabo las tareas debe adherirse a los procedimientos establecidos por la empresa SPCC para acceder a sus instalaciones ubicadas en la zona industrial de la Fundición. Los supervisores se encargan de gestionar los permisos necesarios para que dicho personal pueda ingresar, en colaboración con el departamento de Recursos Humanos.

Capacitación del Personal.

El personal contratado y los nuevos empleados reciben una orientación de seguridad proporcionada por el área de seguridad de SPCC. Además, el personal técnico se encarga de entrenar e informar a los trabajadores acerca de las tareas y actividades que se llevarán a cabo durante la parada.

Cada día, al comienzo de las actividades, se realizan charlas de seguridad breves, de alrededor de 5 minutos, ya que estas son prácticas estándar de seguridad de nuestra empresa, SPCC.

Para garantizar un inicio seguro de las tareas, se tramitan los siguientes documentos antes de comenzar los trabajos: una orden de trabajo, un permiso de trabajo, un permiso para actividades en altura, PETS (Procedimientos de Evaluación de Trabajo Seguro), IPERC (Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos Críticos), así como un Listado de Verificación que incluye equipos, materiales y herramientas.

3.4.3 Prevención de Accidente y Equipos de Protección Personal.

Para efectuar el servicio, el personal se coloca los siguientes EPPs por cada persona.

Tabla 3

Implementos de Protección Personal.

N°	EPPs Básicos
1.	Casco de seguridad con su respectivo barbiquejo y cortaviento
2.	Lentes con micas oscuras, de seguridad.
3.	Zapatos de seguridad con punta endurecida y reforzada.
4.	Chaleco para seguridad con cintas reflectivas.

-
5. Bloqueador Solar.
 6. Tapones para Oídos.
 7. Pantalón de cuero
 8. Guantes de soldar manga larga
 9. Escarpines
 10. Mascarilla o respirador de gases
 11. Guantes cortos de mecánico
 12. Ropa de trabajo, camisa y pantalón
 13. Guantes fly flex
 14. Arnés con línea de vida

Nota. Esta tabla muestra la lista de equipos de protección personal EPPs

Plan de seguridad.

Antes del inicio de actividades de la reparación y mantenimiento se efectúa el plan de seguridad, el cual da las pautas para la ejecución de la obra.

- Reglas de seguridad para el personal contratado.
- Provisión de medicamentos y equipos de primeros auxilios para afrontar posibles contingencias.
- Equipo de transporte para el traslado de heridos y lesionados.
- Medidas de higiene en el lugar de trabajo.
- Medidas de seguridad en las instalaciones contra posibles fenómenos físicos y climáticos, así como animales o acción de terceras personas.
- Prever riesgos eléctricos del personal en obra.

Prevención de Accidentes.

El personal, tanto el que forma parte de la plantilla fija como el contratado, debe llevar consigo su documentación para ser debidamente identificado y para que se pueda llevar un control de su presencia en el lugar de trabajo. A lo largo de la jornada laboral, se aplican rigurosas medidas de seguridad, con un enfoque especial en el personal contratado, con el objetivo de prevenir cualquier posible incidente o accidente.

Se garantiza que al menos un operario de cada equipo reciba formación en primeros auxilios y cuente con un botiquín correspondiente. Todo el personal relacionado con trabajos eléctricos debe estar capacitado para interrumpir el suministro eléctrico y brindar asistencia en caso de descargas eléctricas. En el caso de equipos que no superen un peso de 20 kg, se requiere la colaboración de dos operarios tanto en su uso como en su instalación. Cualquier equipo que supere significativamente ese peso debe ser manipulado con ayuda de equipo mecánico. En cuanto a herramientas cortantes, como cinceles u objetos similares que excedan los 15 cm de longitud, se requiere un uso seguro y controlado. Se promueve el uso exclusivo de llaves tipo corona, prohibiendo el uso de tubos como extensores de brazo de palanca. Además, los contratistas deben implementar medidas de seguridad adecuadas durante las instalaciones eléctricas, tanto en la disposición de los cables como en la conexión de equipos, incluyendo la puesta a tierra de los equipos. Por razones de seguridad para los trabajadores, se evita el uso de escaleras metálicas.

CONCLUSIONES

Primera. Cada vez que se organiza una parada de mantenimiento integral para el horno Peirce Smith, se lleva a cabo una planificación previa y se seleccionan múltiples empresas contratistas del sector privado para que participen en las tareas programadas durante la interrupción de la planta. Esto se realiza con el propósito de garantizar que todas las actividades programadas se ejecuten según el cronograma y que el horno esté en condiciones óptimas al concluir el proceso.

Segunda. Como mencionamos en el capítulo anterior, la innovación en la fabricación de la Boca Bridada ha producido resultados sobresalientes, ya que facilita el desmontaje en situaciones de emergencia.

Dentro del proceso de obtención de cobre, el horno convertidor PIERCE SMITH juega un papel esencial. Cuando el cobre blíster sale del convertidor, su pureza es de al menos un 97%, lo que lo convierte en el método más comúnmente empleado para la producción de cobre. Además, es importante destacar que el proceso de oxidación es ampliamente utilizado a nivel mundial, ya que permite la entrada de aire y oxígeno, lo que provoca la formación de burbujas y es un aspecto fundamental en el proceso.

Tercera. Podemos concluir que este horno es altamente eficiente y de diseño moderno, ya que es capaz de generar grandes cantidades de cobre con un alto grado de pureza. La empresa otorga una gran importancia al cuidado y mantenimiento de este equipo de producción en la fundición de Ilo.

Este convertidor desempeña un papel fundamental para las empresas con instalaciones de fundición de minerales, ya que simplifica las operaciones necesarias para obtener cobre de alta calidad, lo que a su vez mejora tanto los ingresos económicos de la empresa como los beneficios para el estado peruano.

Cuarta. La introducción de oxígeno técnico en el horno PS se asegura mediante un sistema de boquillas que se controlan de forma automática.

La capacidad actual de la planta de oxígeno es adecuada para garantizar el suministro constante al horno.

Al finalizar los trabajos, nos sentimos satisfechos por el éxito logrado y por haber cumplido con el plan y la programación previstos.

RECOMENDACIONES

Primera. La empresa Southern Perú sigue respaldando las propuestas de los técnicos e ingenieros en la búsqueda de mejoras en diversos aspectos de los equipos y maquinaria utilizados en la Fundición de Ilo y en las unidades de explotación minera.

Segunda. Quiero transmitir a mis colegas trabajadores que es fundamental que sigamos enfocados en el constante mejoramiento de los enfoques y tecnologías empleados en las labores de reparación y mantenimiento del horno Peirce Smith y otros equipos, tal como lo hemos venido haciendo hasta el momento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carrillo, F., Hernandez, R., Martinez, J. y Rosello, A. (2004). Cinética del Soplado a Cobre en un Convertidor Peirce-Smith. *Información tecnológica*. [15(5), 33-36. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642004000500005>
- Codelco Chile. (2013). *División Chuquicamata* . Recuperado <https://www.codelco.com/perfil-de-la-empresa/reporte2013/2014-04-23/145100.html>
- Etcheverry, J. (2013). *Modelo de Gestión para la Optimización del Proceso de Conversión de la Fundición Chuquicamata*. (Tesis de Magister). Universidad de Chile Facultad de Ciencias y Matemáticas Departamento de Ingeniería Industrial. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114304>
- Kapusta,J. (2008). The international Peirce-Smith converting centennial symposium. *JOM*, 60(23). <https://doi.org/10.1007/s11837-008-0130-z>
- Medina, R. (2022). Tipos de mantenimiento en las unidades de medición de producción de pozos petroleros. *Investigación en Ciencias de la Administración ENFOQUES*, 6(21), 37-49. <https://www.redalyc.org/journal/6219/621972217002/html/>
- Mobley, K., Higgins, L. y Wilkoff, D. (2008). *Maintenance Engineering Handbook. Séptima Edición*, The McGraw-Hill.
- Mobley, R. (2002). *An introduction to Predictive Maintenance*. Segunda Edición. Elsevier Science.
- Mohamed,B., Kurmar, U. y Prabhakar,D. (2016). *Introduction to Maintenance*

Engineering Modeling, Optimization and Management. Hoboken, United: John Wiley & Sons State

- Mory. B., Montesinos, D., Bohorquez, J., Gorvenia, L. y Mena, V. (2018). *Diagnóstico Operativo Empresarial de la Planta de Ácido Sulfúrico y Oxígeno de Southern Perú Copper Corporation*. (Grado de Magister). Pontificia Universidad Católica del Perú escuela de posgrado. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/11608>
- Pérez, F. (2021). *Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial*. Universidad Santo Tomás, Bucaramanga. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33276/9789588477923.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Predictiva21 (31 de agosto de 2023). *Termografía I*. Recuperado de <https://predictiva21.com/termografia-3/>
- Preditec. (s.f). *Mantenimiento Predictivo*. Recuperado el 6 de octubre de 2023, de <http://www.preditec.com/mantenimiento-predictivo/analisis-de-vibraciones/>
- Schroeder, T. (23 de octubre de 2017). *Los beneficios del mantenimiento predictivo*. SoftExpert Excellence Blog. Recuperado de <https://blog.softexpert.com/es/los-beneficios-del-mantenimiento-predictivo/>
- Southwick, L. (2008) "Cappelen Smith and their Amazing Copper Converting Machine" Larry M. Southwick. John Wiley and Sons, San Francisco, California, USA. *JOM* 60,24-,34. <https://doi.org/10.1007/s11837-008-0131-y>

Vedan, A. (s.f). *Termografía en el mantenimiento predictivo*. Recuperado de <https://tractian.com/es/blog/termografia-en-el-mantenimiento-predictivo/>