UNIVERSIDAD DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLOGICA DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE LAS ENERGIA

“IMPLEMENTACION DE PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EQUIPOS CRITICOS DE PLANTAS DE ACIDO EN LA INDUSTRIA DEL COBRE”

Profesor guía & coautor: Luis Alejandro Jaque Tamblay

Juan Iván Iriarte Ferreira

Copiapó, Chile 2025

Dedicatoria

A mi hijo Emilio Gustavo, mi mayor fuente de inspiración y motivación. Gracias por ser mi razón para seguir adelante y por recordarme lo que realmente importa. Te amo con todo mi corazón.

Agradecimientos.

A mis padres, Iván y Gladys

Gracias por ser el pilar fundamental, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante. Todo lo que soy y he logrado es gracias a ustedes. Desde los primeros pasos en mi vida académica, hasta este momento de la tesis, siempre han estado a mi lado, brindándome su guía, su paciencia y su confianza

Tabla de contenidos

Resumen 6

1. Capítulo I: Introducción 7

Introducción 7

2. Capitulo II: Presentación de proyecto 8

Objetivo general 8

Objetivo específico 8

2.1. Descripción de la problemática 8

2.2. Necesidad de estudios 8

2.3. Justificación 9

2.4. Alcance 10

2.5. Hipótesis 11

3. Capitulo III: Marco Teórico 12

3.1. Empresa 12

3.2. Planta de Acido 12

3.2.1. Producción de ácido sulfúrico 12

3.3. Área de limpieza de gases 18

3.4. Política de mantenimiento predictivo 20

3.4.1. Mantenimiento predictivo 20

3.5. Técnicas de mantenimiento 22

3.5.10. Mantenimiento RCM (Basado en Confiabilidad) 31

4. Capitulo IV: Situación actual 32

5. Capitulo V: Propuesta 34

6. Capitulo VI: Costo beneficio 55

6.1 Análisis de costos sin la implementación del programa preventivo 55

6.2 Análisis de costo de implementación de plan de mantenimiento predictivo. 56

6.3 Comparativa de ahorro sin implementación vs la proyección con implementación para 2025 56

6.4 Grafica de ahorro anual comparativa 57

6.5 Grafica de ahorro Mensual en Pesos y Porcentaje 58

7. Capitulo VII: Conclusión 58

8. Capitulo VIII: Bibliografía 60

Abstract

The ENAMI “Hernán Videla Lira Foundry” has facilities equipped with various types of equipment for carrying out work in the smelting, converting, and acid plant areas. Both areas require a high level of equipment availability, since a failure in one area completely halts the copper smelting process and sulfuric acid production. Therefore, this study focuses specifically on increasing equipment availability to achieve greater operational continuity.

The implementation of a predictive maintenance plan in copper sulfuric acid plants represents a quantum leap in asset management. By replacing the conventional reactive approach with a proactive one, these industries improve their operations, reduce costs, and mitigate risks.

Due to its corrosive nature and the extreme operating conditions of the plants, sulfuric acid requires a particular approach to maintenance. Vital equipment, such as heat exchangers, pumps, and fans, is at risk of rapid wear. Predictive maintenance enables the constant monitoring of the condition of these devices using various technologies, such as thermography, vibration analysis, and oil analysis.

In this paper, we will explain how predictive maintenance works, how to identify critical equipment, the main maintenance techniques, and the steps to implement this type of maintenance in an organized manner.

The key benefits of this technique are increased equipment availability, cost reduction, improved safety, and optimized production.

In summary, predictive maintenance is a powerful tool for optimizing operations in copper sulfuric acid plants. By adopting this strategy, companies can improve their competitiveness, reduce costs, and ensure the long-term sustainability of their operations.

Resumen

La empresa ENAMI “Fundición Hernán Videla Lira” posee instalaciones que cuenta con diversos tipos de equipos para la ejecución de trabajos en las áreas de fusión, conversión y plantas de ácido. Ambas áreas requieren de un alto nivel de disponibilidad de equipos, ya que al fallar una se detiene el proceso de fundición del cobre y la producción de ácido sulfúrico por completo, debido a esto, es que el enfoque de estudio se centra específicamente en aumentar la disponibilidad del equipo y así tener una mayor continuidad operacional

La puesta en marcha de un plan de mantenimiento predictivo en las fábricas de ácido sulfúrico de cobre simboliza un avance cuántico en la administración de activos. Al sustituir la perspectiva reactiva convencional por una proactiva, estas industrias consiguen mejorar sus operaciones, disminuir gastos y reducir riesgos.

Por su carácter corrosivo y las condiciones de funcionamiento extremas de las plantas, el ácido sulfúrico requiere un enfoque particular en el mantenimiento. Aparatos vitales, tales como los intercambiadores de calor, las bombas y los ventiladores, se encuentran en riesgo de desgaste rápido. El mantenimiento predictivo posibilita el seguimiento constante de la condición de estos dispositivos mediante varias tecnologías, tales como la termografía, el estudio de vibraciones y el estudio del aceite.

En este trabajo informaremos sobre cómo funciona el mantenimiento predictivo, como identificar equipos críticos, las principales técnicas de mantenimiento y los pasos para poder implementar este tipo de mantenimiento de manera ordenada.

Los beneficios claves de esta técnica es una mayor disponibilidad de equipos, reducción de costos, mejora de la seguridad y optimización de la producción.

En resumen, el mantenimiento predictivo es una herramienta poderosa para optimizar las operaciones en las plantas de ácido sulfúrico de cobre. Al adoptar esta estrategia, las empresas pueden mejorar su competitividad, reducir costos y garantizar la sostenibilidad de sus operaciones a largo plazo.

1. Capítulo I: Introducción

Introducción

En el proceso minero para la obtención del cobre, un metal de gran importancia en nuestros objetos diarios, nos encontramos con procesos complejos y exigentes que requieren un nivel alto de eficiencia y confiabilidad. Dentro de este proceso tenemos a las plantas de ácido sulfúrico, una sustancia que es fundamental en la extracción y refinación del cobre. Sin embargo, estas instalaciones se caracterizan por operar en condiciones extremas de temperatura, presión y con altos niveles de corrosión, lo que las expone a un desgaste acelerado y esto genera un mayor riesgo de fallas.

En el pasado, el mantenimiento se ha basado en enfoques reactivos y preventivos. El mantenimiento reactivo, que trata en reparar los equipos una vez que se ha producido la falla, resulta en paradas no programadas, perdidas de producción y grandes costes económicos. Por otro lado, el mantenimiento preventivo, basado en realizar ciertas tareas en periodos de tiempo definidos, puede llevar a la sustitución prematura de componentes en buen estado, generando gastos innecesarios.

Es por esto por lo que el mantenimiento predictivo aparece como una alternativa más eficiente y proactiva. Podemos emplear tecnologías avanzadas de monitoreo y análisis de datos que permitan detectar las condiciones de deterioro de los equipos e instalaciones de manera temprana, evitando así llegar a la falla. Con esto se pueden programar las intervenciones de mantenimiento de forma óptima, minimizando los riesgos de paradas no programadas y maximizando la disponibilidad de la planta.

En este trabajo se tendrá el objetivo de analizar en profundidad la implementación del mantenimiento predictivo en plantas de ácido sulfúrico del circuito de cobre. Exploraremos los desafíos y oportunidades asociadas a esta estrategia, así como las mejores prácticas para su implementación exitosa. La finalidad de este informe es la de proporcionar una guía para que las empresas mineras puedan optimizar sus programas de mantenimiento predictivo y mejorar la competitividad de sus operaciones.

2. Capitulo II: Presentación de proyecto

Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un plan de mantenimiento predictivo en el área de limpieza de planta de acido en ventiladores de tiro y toberas de enfriamiento.

Objetivo específico

- Analizar el estado actual de los equipos, características y sus especificaciones técnicas.
- Evaluar la viabilidad técnica en la implementación de un plan de mantenimiento predictivo en ventiladores de tiro y toberas de enfriamiento.
- Medir el impacto en la confiabilidad operativa y el proceso necesario para su implementación.
- Valorizar de los costos asociados de implementación de un plan de mantenimiento predictivo y evaluar en el impacto económico en la producción

2.1. Descripción de la problemática

Actualmente no se cuenta con un plan de mantenimiento predictivo de equipos en el área de plantas de ácido, lo que lleva a que prácticamente se trabaje a la falla, lo que produce detenciones inesperadas, baja producción y aumento de HH.

2.2. Necesidad de estudios

La necesidad de este estudio nace en base los antecedentes que se desarrollan a continuación:

2.2.1. Reducción de costos: El mantenimiento predictivo ayuda a prevenir fallas y averías en los equipos. Lo que reduce costos de reparación y reemplazo.

2.2.2. Mejora de la eficiencia: Al mantener los equipos en buen estado, se reduce el tiempo de inactividad y se aumenta la producción.

2.2.3. Aumento de la seguridad: El mantenimiento predictivo ayuda a prevenir accidentes y lesiones en el lugar de trabajo, lo que reduce el a los empleados y a los equipos.

2.2.4. Extensión de la vida útil de los equipos: El mantenimiento predictivo ayuda a prolongar la vida útil de los equipos, lo que reduce la necesidad de reemplazos prematuros.

2.3. Justificación

Las consecuencias de no contar con un mantenimiento predictivo en el área de limpieza de plantas de ácido son la obstrucción de toberas de enfriamiento en torre quench, debido a la suciedad de los gases lo que lleva a detener la planta por un alza de temperatura en la torre y por ende se debe parar todo el proceso, esta detención la podríamos programar si contáramos con una cámara termográfica ya que nos indicaría las toberas con puntos fríos (obstruida) y así programar una detención con todos los recursos necesarios para una buena mantención.

Otra de las consecuencias de no contar con un mantenimiento predictivo en el área de limpieza de plantas de acido son el desbalanceo de ventiladores de tiro ubicados a la entrada de la zona de limpieza y son quienes reciben los gases provenientes de fundición y lo llevan a la planta por intermedio de ductos, estos ventiladores al igual que las toberas anteriormente mencionadas se les adhiere con frecuencia suciedad en sus alavés lo que lleva a un alza de vibraciones en los descansos del equipo este fenómeno lleva a la detención del equipo. y al igual que el equipo anterior la detención del ventilador provoca la detención de la planta y fundición completa, si contáramos con un medidor de vibraciones (microlog) podríamos programar la detención del equipo y contar con todos los recursos y personal idóneo para realizar una buena mantención.

Toberas obstruidas de torre de enfriamiento

Ventilador de tiro con suciedad adherida

2.4. Alcance

Este plan de mantenimiento va enfocado en el área de planta de ácido específicamente en el área de limpieza donde vamos a aplicar técnicas de monitoreo a través de análisis de vibraciones (microlog) a ventiladores de tiro y con cámaras termográficas a toberas de enfriamiento de gases.

2.5. Hipótesis

Con este estudio se propone un aumento de disponibilidad en planta de ácido sulfúrico específicamente en área de limpieza de gases. Esta optimización permitirá reducir las detenciones no programadas, lo que disminuirá el riesgo de accidentes y mejorará la seguridad operativa y mitigaremos los impactos ambientales por detenciones de emergencia.

La implementación de esta mejora se llevará a cabo utilizando un plan de mantenimiento predictivo por intermedio de un monitoreo de condición en equipos claves de la planta de ácido específicamente en la zona de limpieza como lo son los ventiladores de tiro y toberas de enfriamiento de gases mediante medición de vibraciones y cámaras termográficas.

3. Capitulo III: Marco Teórico

3.1. Empresa

La empresa ENAMI “Fundición Hernán Videla Lira” posee instalaciones que cuenta con diversos tipos de equipos para la ejecución de trabajos en las áreas de fusión, conversión y plantas de ácido. Ambas áreas requieren de un alto nivel de disponibilidad de equipos, ya que al fallar una se detiene el proceso de fundición del cobre y la producción de ácido sulfúrico por completo, debido a esto, es que el enfoque de estudio se centra específicamente en aumentar la disponibilidad del equipo y así tener una mayor continuidad operacional

3.2. Planta de Acido

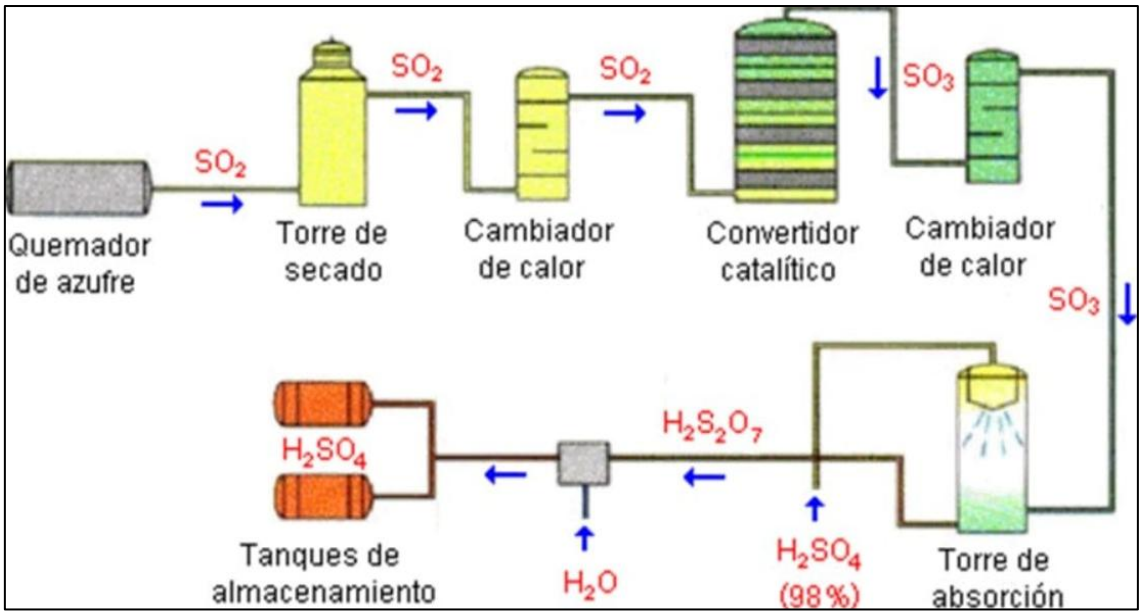
3.2.1. Producción de ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico, empleado en la extracción de cobre, es un instrumento crucial en la obtención y tratamiento de este metal. Este material se emplea en varias fases del proceso de minería, desde la lixiviación de los minerales hasta la purificación del cobre obtenido. El ácido sulfúrico posee la habilidad de disolver los minerales de cobre y desvincularlos de la roca fundamental, facilitando su recuperación futura.
Además, se emplea en el proceso de fundición de cobre para contribuir a la eliminación de impurezas y lograr un producto final de excelente calidad.
La aplicación del ácido sulfúrico en la minería de cobre es esencial para garantizar una producción eficaz y lucrativa, resaltando su relevancia como instrumento esencial en este sector. (Codelco, 2024)

No podemos adentrarnos en el estudio del mantenimiento de los equipos sin saber antes, de forma general, como es el proceso de obtención de este acido.

Una de las maneras industriales de adquirir ácido sulfúrico se realiza a través del método de contacto por oxidación de dióxido de azufre, que se extrae principalmente de la combustión de azufre o sulfuros metálicos (como la pirita). Este procedimiento puede experimentar ligeras fluctuaciones específicas de cada fábrica de producción, pero en términos generales opera de la siguiente forma. El procedimiento para generar ácido sulfúrico que emplea azufre puede segmentarse en tres fases. Una de las primeras conlleva la generación de dióxido de azufre. Posteriormente, el dióxido de azufre (SO2) se

transforma en un trióxido de azufre (SO3). La fase final consiste en transformar el óxido de azufre (VI) en ácido sulfúrico. El proceso de combustión de azufre se realiza con una cantidad excesiva de aire para reaccionar totalmente a una presión cercana a 0,5 MPa. Todo el procedimiento se lleva a cabo a una temperatura cercana a 150 grados Celsius en tanques cubiertos con una capa gruesa de ladrillo resistente al fuego y al ácido. El azufre fundido se filtra con el objetivo de eliminar impurezas (principalmente hierro y sustancias orgánicas). En ocasiones, también se incorpora la cal en el procedimiento para disminuir la acidez del azufre fundido, restringiendo de esta manera sus características corrosivas. El azufre calentado se sumerge en el quemador, donde posteriormente se consume. La combinación de dióxido de azufre y aire procedente del quemador es filtrada y se extraen todas las impurezas. En la etapa subsiguiente, el SO2 se transforma en SO3 mediante una reacción con oxígeno en la presencia de un catalizador. El pentóxido de vanadio (V2 O5) es el catalizador empleado, mientras que el sulfato de potasio disperso se utiliza como medio de transporte. Normalmente, la función de soporte de este catalizador se realiza con sílice o aluminosilicatos, los cuales se distinguen por su elevada porosidad, proporcionando así una amplia zona superficial para que la reacción siga adelante. La rapidez del proceso también está condicionada por la temperatura. En la práctica, se mantiene a una temperatura de alrededor de 500 °C para garantizar una velocidad de reacción adecuada y la mayor conversión posible. El paso final en la fabricación de ácido sulfúrico consiste en la absorción de SO3 en H2 SO4 concentrado u óleum, con el fin de prevenir la creación de una nube de ácido sulfúrico complicada de condensar. El ácido sulfúrico con una concentración del 98% fluye a una velocidad que permite que el SO3 recién absorbido incremente su concentración de manera mínima. Todo el procedimiento se realiza a una temperatura cercana a 70 °C, optimizando de esta manera la eficacia en la absorción de SO3. Adicionalmente, se añade agua al depósito de ácido para disolver el ácido en la misma. El ácido sulfúrico se drena y enfría de manera constante a través de intercambiadores de calor de placas antes de ser almacenado en tanques de almacenaje. El porcentaje total de transformación de azufre en ácido sulfúrico es cerca del 99%. (Group, 2020)



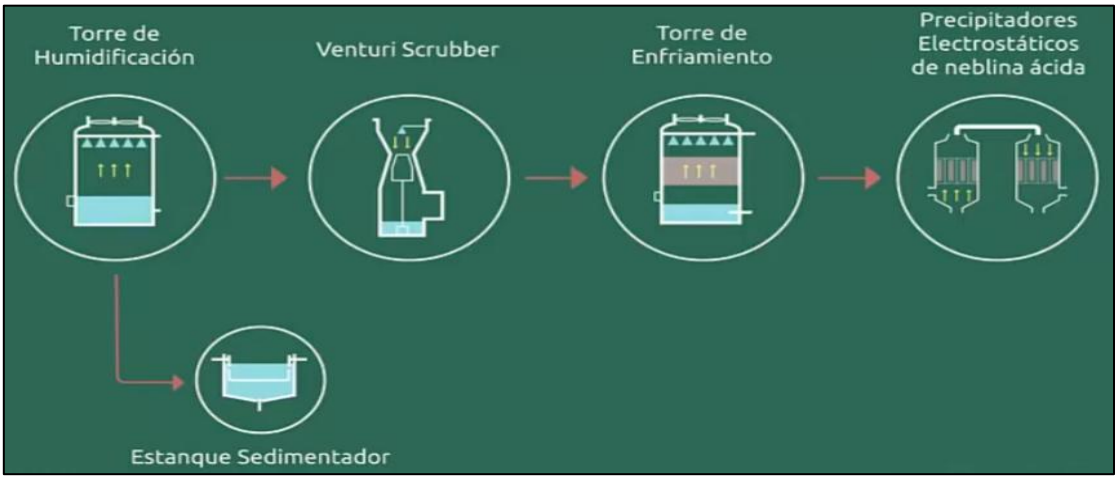
Por otro lado, Las compañías que extraen cobre de minerales sulfurados han necesitado implementar procedimientos para el tratamiento de los gases derivados de la transformación de estos minerales. Según esto, se han aplicado diversas técnicas de tratamiento, siendo la más habitual la inclusión de plantas de ácido sulfúrico. De este modo, el objetivo general de la planta de ácido es de enfoque ecologista, es decir, reducir o eliminar los gases producto de la conversión de minerales azufrados y, como consecuencia de esto, producir ácido sulfúrico.

Pasaremos a detallar el proceso productivo de una planta ideada por la empresa Cobremar en Perú. Tener en cuenta que el proceso general se mantiene en todas las plantas más allá de algunas variaciones dependiendo del fabricante y las tecnologías utilizadas.

El flujo de gases que proviene de la fundición de cobre contiene principalmente dióxido de azufre, vapor de agua, oxigeno, nitrógeno, dióxido de carbono y contaminantes (polvos). El flujo de gases ingresa a la planta de ácido a alta temperatura, húmedo y con polvos, por lo que debe ser acondicionado antes de ingresar a la zona de contacto. La planta de ácido sulfúrico tiene la capacidad de producir un determinado número de toneladas métricas de ácido sulfúrico al 100% diariamente, mediante la recepción constante de gas de proceso con una composición específica y logrando una conversión del 97,5% del dióxido de azufre (SO2) en trióxido de azufre (SO3). El producto ácido utilizado en el ejemplo de esta empresa estaría formado por un 98,5 % de ácido sulfúrico.

Las etapas de elaboración del ácido en este proceso son las siguientes: “Limpieza de gases”, “Secado”, “Conversión de SO_2 a SO_3”, “Absorción del SO_3”.

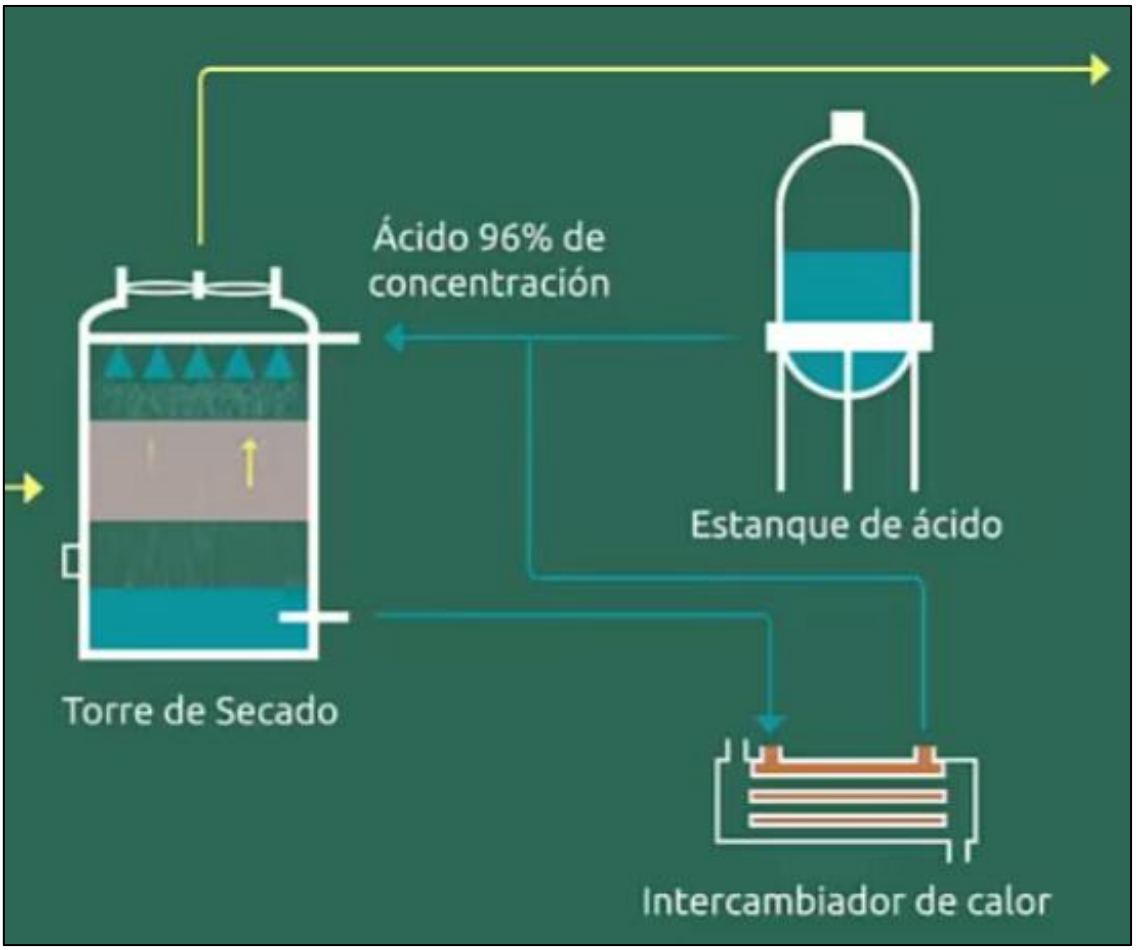
Durante la fase de eliminación de gases y enfriamiento, el gas que incluye el SO2 sale del horno flash y el convertidor de cobre con la presencia de nitrógeno, oxígeno, partículas sólidas, humo de metal, vapor de agua y otras sustancias no deseadas como halógenos, flúor, cloro, selenio y arsénico. La purificación parcial o completa de los contaminantes gaseosos y líquidos se realiza en un sistema de limpieza que se muestra en la imagen a continuación:



El gas que proviene de la cámara de mezcla ingresa a la torre de humidificación a una temperatura de 320 grados Celsius y esta torre no tiene ningún material de relleno en su interior. El gas es lavado utilizando boquillas que contienen ácido débil, con una concentración de aproximadamente el 30% de ácido sulfúrico. Así es como el gas se enfría al entrar en contacto con el líquido de forma contraria a una temperatura de 90 grados Celsius. El ácido de baja acidez es devuelto a la torre sin ser enfriado y las sustancias más densas se envían a un tanque de sedimentación que contiene principalmente polvo y arsénico. El gas se envía al Venturi Scrubber desde la torre de humidificación, donde ingresa a favor de la corriente junto con ácido débil inyectado a través de toberas. El gas vuelve a enfriarse y todas las impurezas (especialmente arsénico y selenio) son retenidas en su totalidad. Así es como el gas es transportado a la torre de refrigeración, que incluye material de relleno en su interior. Una vez más, un ácido débil se recircula en el interior a través del relleno en contraflujo, lo que facilita la eliminación de parte de la neblina ácida, los cloruros, el vapor de agua y los compuestos fluorados. A causa de la interacción del ácido sulfúrico al 3% con el gas húmedo, se procede a enfriar el líquido en intercambiadores de calor, con el fin de permitir que el ácido continúe circulando a través de la torre posteriormente. En ciertos intervalos de tiempo, una porción de este ácido se combina con una solución de silicato de sodio que es requerida para reaccionar con el

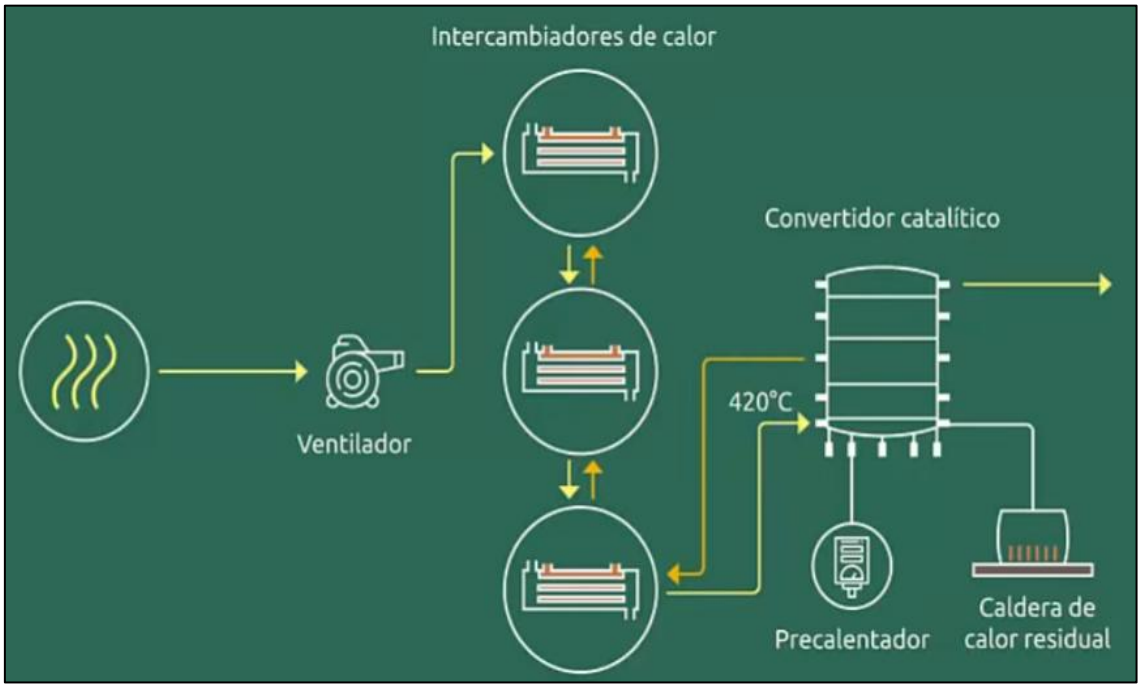
fluoruro de gas y, de esa manera, eliminarlo del sistema. El gas frío parcialmente limpio se dirige hacia los precipitadores electroestáticos húmedos, los cuales funcionan en pares de forma paralela. En estas circunstancias, la mayoría de la neblina ácida y las partículas de suciedad son eliminadas gracias a la precipitación eléctrica. El ácido débil que se recoge en la parte inferior de los precipitadores se envía al estanque de la torre de enfriamiento. Además, este ácido se emplea en la limpieza de las unidades de electro filtros desde la torre mediante toberas colocadas en la parte superior de cada unidad. El propósito de esto es garantizar que los electrodos se mantengan limpios de polvo para mejorar la conexión eléctrica. El transporte de gas a través del tren de limpieza se realiza mediante succión de un ventilador que lleva el gas desde la entrada de la torre de humidificación a la torre de absorción. Posteriormente, el gas se desplaza hacia la etapa de secado.

El gas frío y limpio es transportado a la fase de deshidratación o secado donde se disminuye el nivel de humedad formado por el vapor de agua, y en este procedimiento están involucrados los siguientes dispositivos:



El gas se expone con ácido al 96% de concentración en una torre de secado, que cuenta con un relleno cerámico y un flujo en contracorriente. El ácido se mueve desde el tanque de almacenamiento gracias a una bomba hasta la parte superior de la torre de secado. Además, el gas que sale de la torre lo hace sin humedad. Para prevenir el transporte de niebla en el gas, la torre cuenta con dispositivos para atrapar esta niebla ácida que, en caso contrario, sería llevada al ventilador principal de la planta y después a la siguiente etapa de conversión.

Cuando los gases abandonan la torre de secado. son llevados mediante el soplador a la etapa de conversión, cuyo equipamiento está formado por:



El gas que proviene de la etapa de secado es transportado por un ventilador hacia los intercambiadores de calor de gas a gas frío, intermedio y caliente. El gas entra al convertidor con una temperatura de alrededor de 420 grados Celsius. Durante las cuatro etapas de este convertidor, se produce el calor requerido que será utilizado en los intercambiadores anteriores para calentar o enfriar el gas en proceso, dependiendo de la situación. El gas que es convertido de SO_2 a SO_3 en la etapa pasada, sigue a la siguiente etapa para producir ácido sulfúrico. Los equipos utilizados de esta etapa de absorción son:

El gas que ingresa a la torre de absorción a una temperatura de unos 70 grados Celsius entra en contacto con ácido en contracorriente con una concentración del 98 %. La torre está formada por un relleno cerámico de tipo "Intalox" que facilita la absorción de SO3 del gas en el ácido. El calor que se genera como resultado de esta absorción luego se transfiere desde la torre a un intercambiador de calor de tubos y carcasa. El ácido al 98% es transferido desde un tanque mediante una bomba vertical hasta lo más alto de la torre, donde fluye hacia abajo por acción de la gravedad. El gas sale de la torre a través de un equipo que atrapa el rocío y después pasa por varios eliminadores de neblina tipo vela diseñados para chimeneas de gases que no contienen SO2. El ácido más concentrado se produce después de que el SO3 absorbido se nivele a una concentración del 98,5 %, la cual es la requerida en esta planta. El exceso de volumen de ácido en esta torre se envía al estanque de almacenamiento de producto donde es enfriado por un intercambiador a 35 grados Celsius. De esta manera se concluye el proceso principal. (Cobremar, 2020)

3.3. Área de limpieza de gases

La zona de limpieza de gases de una planta de ácido tiene como objetivo remover las impurezas presentes en el gas y enfriarlo para su ingreso a la zona de contacto de planta de ácido. Además, se debe remover la cantidad de agua necesaria para lograr el balance de agua, con el fin de llegar a la concentración de ácido producto especificada.

Los equipos que se ven afectado por la falta de un plan de mantenimiento predictivo de la zona de limpieza de gas son los siguientes:

- **Torre Quench**

  Es un tipo de lavador de gases industrial diseñado para enfriar de forma rápida los gases de escape que se encuentran a temperaturas extremadamente altas. El término quench proviene del inglés y significa "enfriar, templar o sofocar", lo que describe su función principal.

  Este enfriamiento veloz es crucial en procesos industriales como los de fundición, la producción de cemento o plantas químicas. La necesidad de enfriar estos gases surge porque las altas temperaturas pueden dañar los equipos de procesamiento posteriores, como los filtros de partículas, y reducir la eficiencia de los lavadores de gases.

Método de Funcionamiento

El funcionamiento de una torre quench se basa en el contacto directo entre los gases calientes y un líquido refrigerante, generalmente agua.

Entrada de gases: Los gases calientes de un proceso industrial, como un horno de fundición, entran en la torre quench.

Inyección de líquido: Se inyecta una gran cantidad de agua atomizada (pulverizada) a través de boquillas especiales en la corriente de gas.

Enfriamiento por evaporación: El calor de los gases provoca que el agua se evapore rápidamente. Este cambio de estado absorbe grandes cantidades de energía en forma de calor, enfriando los gases hasta una temperatura cercana a la saturación.

Reducción de volumen: Al bajar la temperatura, el volumen de los gases también se reduce significativamente, lo que permite utilizar equipos de procesamiento de menor tamaño y más económicos en etapas posteriores.

Extracción de partículas: En el proceso, el contacto con el agua también ayuda a separar y arrastrar partículas finas del gas.

Salida de gases fríos: Los gases, ahora más fríos y limpios, salen de la torre para continuar con el tratamiento o ser liberados.

- **Ventilador de tiro Inducido**

  Es un dispositivo mecánico que crea una presión negativa (vacío) en un sistema de combustión para extraer gases, humos y otros subproductos. Se utiliza en aplicaciones industriales y domésticas como calderas, chimeneas y torres de enfriamiento para asegurar un flujo de aire adecuado y una combustión eficiente.

3.4. Política de mantenimiento predictivo

3.4.1. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo implica pronosticar el momento en que un elemento de una máquina o instalación experimentará una avería en el futuro, para así poder reemplazar esa parte según un plan, justo antes de que ocurra el fallo. Se reduce al mínimo el tiempo muerto del equipo y se maximiza la vida útil del componente. Otra definición es que este tipo de mantenimiento implica la implementación de diversas acciones y técnicas para detectar posibles fallas y errores en equipos desde sus etapas iniciales, con el propósito de evitar que estos problemas se conviertan en asuntos más serios durante su funcionamiento, evitando interrupciones inesperadas, pérdidas de tiempo y un impacto económico negativo. Preservar un nivel específico de servicio en los equipos implica planificar inspecciones en el momento más idóneo. Por lo general, sigue un enfoque sistemático, lo que implica que se interviene, aunque el equipo no haya demostrado señales de tener problemas. (Garcia, 2020)

Implementar el mantenimiento predictivo no es barato. Requiere cierto grado de conocimientos técnicos complejos. Depende de la jerarquía del dispositivo en el proceso y del daño que pueda causar una falla inesperada.

El mantenimiento predictivo busca crear una conexión entre la variable elegida y la duración del componente. Esto se logra tomando lecturas en intervalos regulares hasta que el componente presente algún fallo. Este método implica la evaluación de los factores asociados con la duración de vida del equipo o pieza. Mas adelante nombraremos con mayor detalle a las variables tenidas en cuenta a la hora de realizar mantenimiento predictivo, pero algunas son:

- Vibraciones de los rodamientos o elementos de contacto rodante.

- Temperatura de los puntos de conexiones eléctricas.
- Resistencia de los aislamientos en bobinas de motores.
- Desgaste de árboles motrices.
- Modificaciones de la constitución externa de un elemento (oxidación, corrosión, rugosidad).
- Incremento desmedido del consumo, ya sea en carga o en funcionamiento normal, como señal de irregularidades internas.

Los productores de instrumentos de medición y de programas de control para el mantenimiento predictivo pueden ofrecer recomendaciones y restricciones de valores para modificar los elementos de la mayoría de los equipos conforme a dichas mediciones. Esta información del catálogo o del fabricante no reemplaza el análisis histórico que proporciona lo específico de la industria: ubicación (en áreas muy cálidas los motores se calientan, en áreas muy frías algunos lubricantes no funcionan correctamente, etc.), personal encargado, ciclos de programación laboral, cantidad de arranques y paradas (bombas de alta presión, turbinas, etc.), que probablemente pueden alterar e incluso mejorar los valores sugeridos.

Considerando las metas a lograr mediante la supervisión del estado de trabajo de una máquina, es necesario distinguir entre las diferentes tareas a realizar:

- Vigilancia: La meta principal es verificar e identificar cuándo se presenta una irregularidad en el funcionamiento de una máquina. Es necesario diferenciar entre condiciones normales e incorrectas, y en estas situaciones señalar su nivel de gravedad, o potencial perjuicio.
- Protección: Su meta principal es prevenir fallos catastróficos, o sea, errores que causan paradas o daños de gran valor y que perjudican, en numerosas situaciones, la seguridad. La implementación de sistemas de protección conlleva que, si los valores de la variable de control exceden los parámetros seguros, la máquina se detiene automáticamente.
- Diagnóstico y predicción: Su meta es determinar el problema concreto basándose en las variables controladas. Se busca calcular el tiempo que la máquina podrá operar en condiciones de proporcionar un servicio adecuado o la posibilidad de sufrir una avería.

Para disminuir las averías, es esencial tener una estrategia de mantenimiento adecuada a la industria que comprenda las particularidades de diseño y operación de sus equipos específicos. Además, es imprescindible contar con personal capacitado para el empleo de técnicas de estudio y diagnóstico de fallos.

Los problemas detectados y resueltos aumentarán la durabilidad de las máquinas y su producción, reduciendo así los costos relativos de mantenimiento. (Calvo C. S., 2021) Hay varias técnicas que actualmente se utilizan en el mantenimiento predictivo, que se examinarán en este informe.

3.5. Técnicas de mantenimiento

3.5.1. **"Análisis de vibraciones":** esta metodología de mantenimiento se fundamenta en la investigación del trabajo de las máquinas rotatorias mediante el análisis de su conducta ante las vibraciones. Es sabido que todas las máquinas muestran ciertos grados de vibración, incluso si están funcionando adecuadamente. No obstante, cuando surge alguna anomalía, estos niveles habituales de vibración se modifican, lo que señala la importancia de revisar el equipo correspondiente.

Para que este procedimiento sea efectivo, es necesario tener conocimiento de ciertos datos del dispositivo a examinar, tales como su velocidad de giro, tipo de cojinetes, tipo de transmisión, número de paletas, entre otros. Además, es crucial establecer los lugares donde se realizarán las comprobaciones y el equipo de análisis más apropiado para realizar el estudio. Las vibraciones pueden ser examinadas tanto midiendo su amplitud como descomponiéndolas en función de su frecuencia. Cuando la magnitud de la vibración excede los límites tolerables o cuando el espectro de vibración cambia a lo largo del tiempo, indica que algo negativo está ocurriendo.

Las vibraciones pueden categorizarse en vibraciones libres, generadas por un sistema que vibra debido a una fuerza que ya no está ejerciendo acción sobre él, o vibraciones forzadas, originadas por un sistema que vibra a causa de acciones externas que persisten a lo largo del tiempo. Las vibraciones pueden provocar en los equipos: incremento de esfuerzos y tensiones, deformaciones que superan el margen elástico (límite de recuperación), cansancio en los materiales, deterioro, pérdida de energía y un consumo energético elevado, y ruidos desagradables que provocan condiciones perjudiciales para la seguridad e higiene.

Los componentes responsables de recoger las variables de entrada que facilitarán el seguimiento de las máquinas son los sensores o sondas. Después, un transductor convierte la energía vibratoria en corriente eléctrica. Este parámetro eléctrico es más sencillo de entender para el sistema. (Calvo C. S., 2021).

En resumen, los inconvenientes que se pueden identificar a través de este método incluyen: desalineación, desequilibrio, resonancia, solturas mecánicas, rodamientos deteriorados, problemas en bombas, anomalías en engranes, problemas eléctricos vinculados a motores, problemas en bandas, etc.

3.5.2. "Termografía": esta metodología analiza el comportamiento de la temperatura de los equipos para verificar si están operando de forma adecuada. Promueve el cálculo de las temperaturas de un objeto a distancia, en tiempo real y sin contacto, fundamentado en la energía infrarroja de radiación que este emite, transmite y refleja. Esta metodología es útil en el mantenimiento ya que una gran cantidad de comportamientos inusuales de maquinaria, ya sean eléctricas o mecánicas, suelen estar relacionados con un aumento de la temperatura. Para el estudio termográfico se pueden emplear dos clases de instrumentos: los "spot radiometers", que establece la temperatura en un lugar específico, y los dispositivos de "imágenes de infrarrojos", que registran una amplia variedad de puntos que conforman zonas. Los últimos son los más utilizados hoy en día, mostrando su utilización más habitual viene en las certificaciones de energía de dispositivos y edificaciones. Las principales ventajas de este procedimiento incluyen: permite el estudio sin alterar el funcionamiento de los procesos productivos, su sencillez de manejo y bajo riesgo para el trabajador (no se requiere tocar el dispositivo o el equipo con el medidor), identificación extremadamente exacta de lugares inadecuados en una línea de proceso, examina cuerpos en movimiento, inspecciona extensas áreas del proceso, alcanza sitios inaccesibles,

posibilita el examen de calidad de las reparaciones realizadas, entre otros. (Calvo C. S., 2021).

Las siguientes pueden ser citadas como ejemplos de aplicaciones. Primeramente, en elementos eléctricos y electrónicos, como el aumento o disminución del calentamiento por efecto Joule a causa de irregularidades en circuitos de baja hasta alta tensión, subestaciones, cuadros, conexiones, conexiones de tierra, fusibles, interruptores, motores eléctricos, generadores, bobinados, etc. También tiene aplicación en elementos mecánicos tales como: reductores, frenos, acoplamientos, rodamientos, embragues, motores. Otra aplicación es en instalaciones de frio y calor como ser intercambiadores de calor, calderas, sistemas de climatización, enfriamiento de motores. Además, puede ser de ayuda en pérdidas en cañerías de todo tipo.

3.5.3. "Análisis por ultrasonido": Es un método mecánico no dañino que examina y analiza las ondas sonoras de alta frecuencia (20-100 KHz) que resultan imperceptibles para el ser humano (ultrasonidos). La técnica ofrece dos ediciones distintas. Por un lado, la que se enfoca en el análisis de la propagación (rebotes, reflexiones y en general fenómenos relacionados con las ondas) y que posibilita, a través de métodos parecidos a los utilizados en la geofísica, identificar discontinuidades en el material, lo que resulta en la generación de imágenes en su versión más moderna. El método tiene ciertas semejanzas con el análisis de infrarrojos y se emplea ampliamente en la supervisión de la calidad de las soldaduras (escorias, oquedades, etc.) y también en el control de la calidad de los componentes de acero fundido (oquedades, gases internos, escorias retenidas, etc.). La segunda variante se dedica a identificar los ultrasonidos producidos por las irregularidades en el funcionamiento de los dispositivos: escapes de líquidos, pérdidas de vacío, arcos eléctricos, deterioro de los rodamientos. Esta metodología es complementaria a la investigación de vibraciones, pero con el beneficio de proporcionar datos cuando las máquinas se mueven, rotan y rotan a velocidades bajas. Los ultrasonidos facilitan la identificación de: las fricciones en las máquinas de rotación, emisión de fluidos (gas, vapor, aceites o en general líquidos) en

conductos, válvulas, purgadores, entre otros, perdidas de vacío, arcos eléctricos escondidos de baja intensidad, además de efectos corona. Ausencia o sobreabundancia de lubricación. Conforme la capa de lubricante se reduce, la intensidad del sonido se incrementa (la falta de lubricación puede provocar un incremento del hasta 8 dB). Problemas relacionados con la cavitación. Estos ocurren en las bombas para el impulso de fluidos, sin embargo, el impacto es más significativo (ocurre con mayor facilidad) cuando la densidad del líquido se reduce. Los rodetes se deterioran. También se pueden medir daños en los engranajes. Conforme los dientes se desgastan, no mantienen las superficies con el diseño correcto y en los giros sucesivos se producen alteraciones en el sonido producido, dando lugar a verdaderos golpeteos si la degradación es grave. Por último, se pueden detectar aspectos anómalos y de preservación de los cojinetes (condición que persiste incluso cuando estos se mueven a baja velocidad). Toda máquina que rota u oscila lo realiza sobre rodamientos o cojinetes, que son los componentes que mantienen la carga y los roces. Por esta razón, son los primeros componentes que se degradan y generan oscilaciones, vibraciones, ruidos, calentamientos, degradación del aceite, entre otros, que pueden ser supervisados. Quizás la supervisión de los cojinetes sea una de las aplicaciones más evidentes de este método, ya que se adelanta a otros procedimientos como el estudio de la temperatura o la vibración.

Dentro de los beneficios de tener esta técnica, se pueden mencionar que: Facilitan la identificación precoz de los problemas. Las señales de ultrasonidos se localizan, facilitando a los trabajadores la identificación de su origen. Las señales recolectadas pueden ser procesadas en un ordenador y conectadas a analizadores de vibraciones, lo que simplifica la interpretación de los datos. Es posible utilizarlos en entornos con ruido. Son sencillos, veloces y exactos. Usualmente, su gestión no requiere intervenir ni impactar al equipo. (Calvo C. S., 2021).

3.5.4. El estudio de aceites establece el estado de funcionamiento de las máquinas mediante la investigación de las características físicas y químicas de su aceite de lubricación. El aceite juega un papel crucial en las máquinas ya que las resguarda del deterioro, regula su temperatura y expulsa sus impurezas. Cuando el aceite muestra niveles elevados de contaminación y/o degradación, no satisface estas funciones y el equipo empieza a fallar. El método de análisis de aceites facilita la cuantificación del nivel de contaminación y/o degradación del aceite a través de una serie de pruebas realizadas en laboratorios especializados sobre una muestra recolectada de la máquina durante su funcionamiento o al finalizar su funcionamiento. El nivel de polución en el aceite está vinculado con la existencia de partículas de desgaste y de elementos ajenos. Por lo tanto, es un buen indicador de la condición en la que se halla la máquina. El nivel de degradación del aceite se utiliza para establecer su estado propio, ya que simboliza la disminución en la habilidad de lubricar generada por una modificación de sus características y la de sus aditivos. La determinación de la contaminación en una muestra de aceite se realiza mediante la cuantificación de: partículas de desgaste, combustible, agua, partículas carbonosas, insolubles, etc. El proceso de degradación en una muestra de aceite se establece mediante la cuantificación de las siguientes características: viscosidad, detergencia, basicidad, constante dieléctrica, entre otras.

La información obtenida de las evaluaciones físicas y químicas del aceite facilita la determinación del plan de lubricación y conservación de la máquina. (Garcia, 2020).

Hay varias técnicas para verificar y medir lo previamente expuesto, entre las que podemos mencionar el “Test de Karl Fisher”. Es un análisis colorimétrico que permite determinar la existencia de agua en pequeñas proporciones en el lubricante. Este método es crucial ya que el agua posteriormente degrada el lubricante, además de fomentar la corrosión de los componentes metálicos. Por lo tanto, la presencia de agua sugiere grietas, mal sellado, condensaciones, entre otros. Otro método es el “Análisis ICP”. Es una modalidad de espectrometría comúnmente utilizada para identificar elementos traza, elementos en volúmenes muy reducidos. También está el método “Microscopio electrónico de barrido”. Opera utilizando electrones en vez de fotones. Se extrae el aceite, se filtra y se examina un fragmento reducido de las partículas secas. Este tipo de pruebas proporciona datos no solo acerca de la composición de las partículas (evaluación

EDX con el microscopio), sino también acerca de la morfología y distribución de tamaños de las mimas. Por lo general, a mayor tamaño de las partículas presentes, la condición de funcionamiento del aceite se deteriorará, incluso si estas se encuentran en baja concentración. También se suele hacer "determinación de pH". El pH se utiliza para determinar la acidez o alcalinidad de una disolución. Evalúa la cantidad o actividad de los iones hidrógeno que se encuentran en ciertas disoluciones. Los aceites a altas temperaturas y con presencia de oxígeno pueden rancidificar (los triglicéridos se transforman en ácidos grasos y glicerol). En esta degradación se pierden algunas de sus características y se reduce el pH. Otro ensayo es el "número de acidez". Se trata de los mg exactos de hidróxido de potasio para neutralizar un gramo de aceite. De hecho, este tipo de estudio que está realizando es una evaluación indirecta de los componentes orgánicos ácidos que se encuentran en el aceite. El "ensayo de viscosidad" común, también se realiza a menudo. También se hacen "ferrografías". Implica la ejecución de un pequeño torrente de muestra de aceite sobre una lámina adherida con una acanaladura. El impacto de los imanes provoca la división de las partículas de gran tamaño y pequeño, así como la dirección de estas.

Con la información recabada y su comparación con muestras de referencia o con los resultados de otras muestras, se establece el nivel de degradación del aceite. (Calvo C. S., 2021).

3.5.5. "Inspecciones baroscopicas": Son revisiones visuales en sitios inaccesibles para la vista humana. Se realizan utilizando un aparato óptico, el baroscopio. Se expandió en el sector industrial tras el éxito de las endoscopias en seres humanos y animales. El baroscopio es un aparato de longitud y grosor que se presenta en forma de barra flexible. Este tubo contiene un sistema telescópico con múltiples lentes, proporcionando una definición excelente a la imagen. Además, cuenta con una potente fuente luminosa.

La imagen generada puede visualizarse en la lente principal del dispositivo, en un monitor, o ser capturada en un grabador de video para su posterior estudio. Indudablemente, el baroscopio es otra de las herramientas esenciales para llevar a cabo labores de inspección en las partes internas de ciertas máquinas sin necesidad de realizar desmontajes considerables, además de ser una de las herramientas más empleadas en el mantenimiento predictivo. Por lo tanto, se emplea extensamente

para examinar las partes internas de motores térmicos (motores alternativos de combustión interna, turbinas de gas y turbinas de vapor), y para examinar ciertos componentes de calderas, como los haces tubulares o los domos.

No solo se aplica en labores de mantenimiento predictivo cotidiano, sino también en auditorías técnicas, para establecer el estado interno del equipo frente a una operación de adquisición, de valoración de una compañía de contratación o del estado de una instalación para realizar una expansión o sustracción de equipos. Entre los beneficios de estas inspecciones se encuentran la sencillez para realizarla sin necesidad de desmontar nada y la opción de almacenar las imágenes para su posterior revisión. (Garcia, 2020)

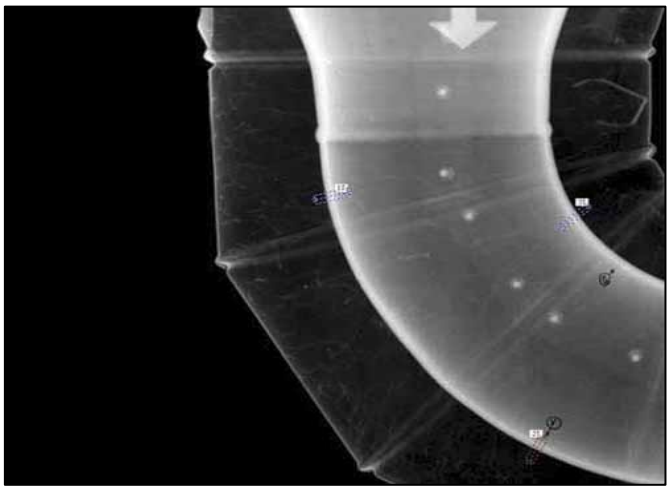
3.5.6. "Análisis eléctrico": esta técnica se puede utilizar en aquellos aparatos que puedan tener fallos de origen electromecánico y cuyo sistema de operación principal es eléctrico. Se basa en la regulación de los parámetros eléctricos (tensión, intensidad, resistencia, capacitancia, etc.) que proporciona energía a un dispositivo. Con este procedimiento se pueden detectar los estados de los circuitos sobre todo en lo referido a la calidad del aislamiento eléctrico. Es habitual realizar un análisis de interés en comparación con los consumos en vacío. Tras la implementación de una instalación o dispositivo, y finalizado el periodo inicial de evaluaciones o errores de la juventud, se registran los consumos y ciertas variables de interés. Estos se registran en su expediente y constituyen una referencia para el control futuro. Cualquier cambio en estos parámetros puede ser resultado de una anomalía y, usualmente, resulta interesante investigar el motivo. Es un indicador de gran relevancia, especialmente cuando las fallas se relacionan con un conjunto de defectos que incrementan las resistencias a ser vencidas por el equipo. Por ejemplo, en la minería en general, resulta crucial regular el uso de las bandas de transporte de mineral en vacío, ya que su incremento sugiere el deterioro de los componentes de apoyo de la banda (rodillos) o la acumulación de materiales adheridos que incrementan el peso muerto (ausencia de limpieza). Las cintas de transporte en la minería suelen tener una gran longitud. Por ejemplo, para una

cinta transportadora en la minería, de 200 metros. Es habitual que esta se deslice en rodillos situados cada 2 o 3 metros (100 unidades), que a su vez se desplazarán sobre cojinetes, usualmente estancos. La degradación de estos últimos incrementa con rapidez la resistencia a la rodadura (además, se debe tener en cuenta su alto número), un hecho que se puede identificar con la comparación del consumo en vacío. El análisis eléctrico también nos sirve para saber el estado de los motores mediante medidas de continuidad, impedancias, etc. El estudio de la corriente de un motor eléctrico facilita un control de calidad, ya sea como indicador de tendencia o como fuente de un diagnóstico inmediato de su condición, en comparación con sus valores nominales o de operación, dependiendo de la carga, más común. Todo tipo de motores, como los de jaula de ardilla, síncronos, rotor bobinado, de corriente continua, entre otros, se pueden utilizar prácticamente en alternadores y variadores de frecuencia. (Calvo C. S., 2021).

3.5.7. "Técnicas de inspección visual": Se lleva a cabo en áreas que se pueden visualizar directamente en la máquina, también es posible utilizar sistemas de observación como microscopios y endoscopios. A través de esta revisión, es posible identificar defectos físicos como fisuras, deterioro, elementos de sujeción sueltos, entre otros. (Rolando, 2020).

3.5.8. "Técnicas de líquidos penetrantes": Son revisiones no dañinas que facilitan la detección de fisuras en la superficie. Esto se logra al poner una tinta especial en una superficie limpia. Tras un periodo de tiempo, se retira la tinta y se introduce un líquido absorbente que libere toda la tinta que se haya adherido a las fisuras superficiales, evidenciando su existencia y forma. (Rolando, 2020).

3.5.9. "Técnica de inspección radiográfica": Se utiliza para identificar anomalías internas como fisuras, burbujas o impurezas, se emplean particularmente en uniones soldadas. Se trata de interponer el elemento que se va a radiografiar entre una fuente radioactiva y una pantalla que emite radiación.



3.5.10. Mantenimiento RCM (Basado en Confiabilidad)

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es un proceso en el que las organizaciones identifican los activos físicos (máquinas y herramientas, es este caso toberas de enfriamiento y ventiladores de tiro) necesarios para producir sus productos y crear una estrategia integral para mantenerlos en línea y operando a un nivel óptimo. El objetivo final es maximizar la disponibilidad de los equipos y al mismo tiempo reducir la necesidad de reemplazar activos. Reduciendo así los costos. Se diferencia de otros procedimientos de mantenimiento por el echo de que trata a cada activo de manera diferente, según sus necesidades específicas, su importancia para el proceso general y como se debe monitorear y mantener.

4. Capitulo IV: Situación actual

Actualmente la planta de ácido específicamente el área de limpieza de gases no cuenta con un plan de mantenimiento predictivo y prácticamente se trabaja a la falla lo que lleva a detenciones inesperadas y realizar mantenciones sin recursos humanos y técnicos debido a que no hay una planificación de la detención ya que no se cuenta con los datos necesarios para realizar una buena programación con recursos y personal idóneo para esta.

Estas detenciones inesperadas se producen por el acumulamiento de suciedad en ventiladores de tiro lo que lleva a un aumento de vibraciones. al producirse este fenómeno se tiene que detener la planta de acido de emergencia ya que no tenemos tiraje para extraer los gases de fundición lo que puede llevar a generar un impacto ambiental.

Otro equipo que nos lleva tener detenciones inesperadas son la obstrucción de toberas de enfriamiento de gases ubicadas en la zona de limpieza (torre quench). Al producirse este fenómeno se debe detener la planta de forma inmediata ya que al no tener riego aumenta la temperatura de la torre quench y sobrepasar la temperatura máxima de la torre (material: FRP) que se puede incendiar producto de este fenómeno.

5. Capitulo V: Propuesta

Pasos para la implementación del mantenimiento predictivo

Para que un plan de mantenimiento sea eficaz, necesita fomentar la confiabilidad y la condición de funcionamiento de los equipos, al mismo tiempo que se disminuyen los gastos de producción, incluyendo los costos asociados al mantenimiento. Jesús Martínez García, en su libro Mantenimiento Predictivo, define a la fiabilidad como*:* "la probabilidad de que un bien funcione adecuadamente durante un periodo determinado bajo condiciones operativas especificas (por ejemplo, condiciones de presión, temperatura, fricción, velocidad, tensión o forma de una onda eléctrica, nivel de vibraciones, etc.)". Para elaborar y poner en marcha un programa eficiente de mantenimiento predictivo, es crucial determinar los equipos que se utilizarán en este mantenimiento, así como los equipos y procesos que respalden la implementación del programa tanto a nivel técnico como financiero. (Garcia, 2020). Para llevar esto a cabo se debe:

- Comprender los diferentes tipos de fallos y las consecuencias perjudiciales que estos generan en la máquina.
- Comprender las ventajas y limitaciones de las diversas técnicas de mantenimiento predictivo para elegir la más adecuada y económicamente rentable.
- Contar con un conjunto de profesionales con alta formación en las técnicas de mantenimiento predictivo.

Con esto buscamos cambiar la cultura de mantenimiento correctivo hacia la cultura de mantenimiento predictivo.

Los pasos esenciales requeridos antes de la puesta en marcha del mantenimiento predictivo son:

1) Establecer las metas y el efecto económico que se busca alcanzar con el mantenimiento predictivo.
2) Selección de los equipos críticos ("análisis de criticidad").
3) Llevar a cabo análisis de "modos y efectos de falla" (AMEF).
4) Establecer los parámetros viables a supervisar.
5) Seleccionar las técnicas del mantenimiento predictivo adecuadas.
6) Definir quien o quienes serán los responsables de realizar el mantenimiento predictivo.

7) Desarrollar la base económica del programa de mantenimiento predictivo.
8) Desarrollar los procesos específicos de las rutinas de mantenimiento predictivo.
9) Formar y capacitar al personal en las técnicas y metodologías del mantenimiento predictivo.
10) Ofrecer el apoyo oficial para la puesta en marcha del programa de mantenimiento predictivo.
11) Análisis de datos y mejoras continuas (indicadores).

Paso 1: Definir objetivos y metas financieras precisas desde el comienzo es un paso crucial para llevar a cabo un exitoso programa de mantenimiento predictivo en cualquier sector. Esto nos facilita mantener una orientación precisa hacia los objetivos para prevenir desviaciones y posibilita hacer estos objetivos palpables para el equipo laboral. Desde una perspectiva económica, este procedimiento facilitará la demostración del valor del mantenimiento predictivo a la dirección superior. Algunos ejemplos de objetivos y metas pueden ser la disminución del tiempo de parada, la reducción de los gastos de mantenimiento, prolongar la durabilidad de los equipos, incrementar la seguridad y mejorar la producción. Para el caso de una planta de ácido sulfúrico podría ser reducir el tiempo de inactividad no planificado de la línea de producción de ácido sulfúrico en un 15% en los próximos 12 meses o aumentar la disponibilidad de los equipos críticos en un 5% en el próximo trimestre (Garcia, 2020).

Paso 2: El análisis de criticidad es un paso fundamental, por lo que le dedicaremos más texto a continuación.

La evaluación de la criticidad es un método que simplifica la toma de decisiones, dando prioridad a sistemas, instalaciones y equipos según su efecto a nivel mundial. Efectuar un análisis de materialidad implica determinar el ámbito y las metas del análisis, fijar criterios de valoración y elegir un método para dar prioridad a la elección de sistemas a examinar. El propósito del análisis de criticidad es actuar como instrumento para establecer el rango de procesos, sistemas y equipos en infraestructuras complejas, definiendo un procedimiento a través del cual los componentes pueden ser segmentados en secciones que puedan ser administradas de manera controlada y verificada. Con una mirada matemática, la criticidad se puede calcular como:

“Criticidad = Frecuencia X Consecuencia”.

En este caso, la frecuencia está vinculada al número de sucesos o averías que muestra el sistema o proceso valorado y, la repercusión se relaciona con el efecto, la adaptabilidad operacional, los gastos de reparación y los efectos en seguridad y medio ambiente. (Sevilla, 2021)

Para las variables se usan los valores prestablecidos como “categorías”, de las tablas “Categoría de las Frecuencias” de ocurrencia y “Categoría de los Impactos”, respectivamente.

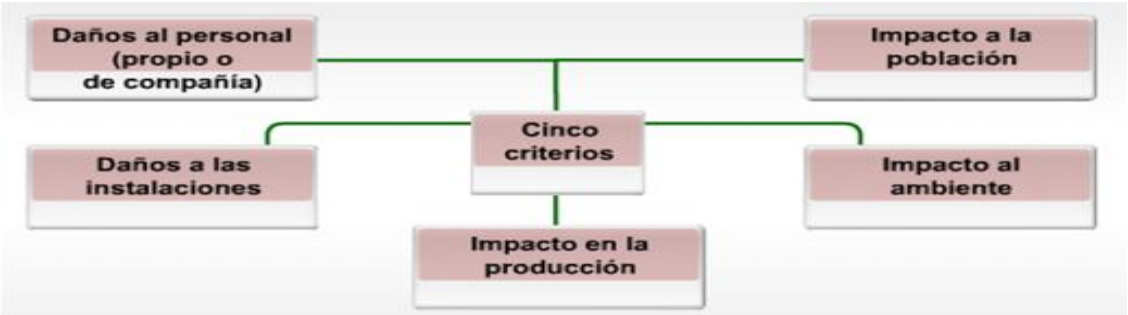
Para evaluar la importancia de una unidad o equipo, se emplea una tabla que considera la frecuencia y las consecuencias de la falla. En un eje se muestra la frecuencia de fallos y en otro los impactos o resultados que la unidad o equipo en análisis experimentará si sufre una falla. (Sevilla, 2021)

La matriz tiene una serie de colores que ayuda a identificar la menor o mayor intensidad de riesgo asociada con el valor de criticidad de la instalación, sistema o dispositivo que se está analizando.

Primero, necesitamos establecer los niveles en los que se llevará a cabo el análisis: instalación, sistema, dispositivo o elemento, conforme a las necesidades o requerimientos de jerarquización de activos.

Para llevar a cabo la evaluación de la frecuencia de fallos y el impacto total o resultado de las fallas, se pueden emplear criterios y condiciones previamente establecidos. Para cada equipo puede haber varios modos de fallo, siendo el más significativo el que más afecta al proceso o línea de la fábrica. La frecuencia de aparición del evento se establece por la cantidad de sucesos anuales.

Para calcular las repercusiones o efectos de la falla, se utilizan los criterios siguientes mostrados en la imagen:



Criterios y rasgos para estimar las consecuencias de las fallas. Fuente: "Análisis de criticidad y estudio RCM del equipo de máxima criticidad de una planta desmotadora de algodón". Universidad de Sevilla.

Los "Impactos en la Producción" (**IP**) miden las repercusiones de los incidentes no planificados en la empresa. Se evaluará este criterio teniendo en cuenta los "factores" siguientes: "Tiempo Promedio para Reparar (TPPR)", "Producción Diferida" y los "Costos de Producción".

"IP = (Producción Diferida x TPPR x Costo Unitario del Producto)"

El valor de esta ecuación permitirá categorizar el IP de acuerdo con los criterios de la tabla "Categoría de los Impactos" que se mostrará más adelante.

Los impactos ligados a "Daños de las Instalaciones" (**DI**) se valorarán considerando los siguientes factores:

"DI = (Costos de Reparación + Costos de Reposición de Equipos)"

El valor que de esta ecuación permitirá categorizar el **DI** de acuerdo con los criterios de la tabla "Categoría de los Impactos".

Categoría	Daños al personal	Efecto en la población	Impacto ambiental	Pérdida de producción (USD)	Daños a la instalación (USD)
5	Muerte o incapacidad total permanente, daños severos o enfermedades en uno o más miembros de la empresa.	Muerte o incapacidad total permanente, daños severos o enfermedades en uno o más miembros de la comunidad.	Daños irreversibles al ambiente y que violen regulaciones y leyes ambientales.	Mayor de 50 MM	Mayor de 50 MM
4	Incapacidad parcial, permanente, heridas severas o enfermedades en uno o más miembros de la empresa.	Incapacidad parcial, permanente, daños o enfermedades en al menos un miembro de la población.	Daños irreversibles al ambiente pero que violan regulaciones y leyes ambientales.	De 15 a 50 MM	De 15 a 50 MM
3	Daños o enfermedades severas de varias personas de la instalación. Requiere suspensión laboral.	Puede resultar en la hospitalización de al menos 3 personas.	Daños ambientales regables sin violación de leyes y regularizaciones, la restauración puede ser acumulada.	De 5 a 15 MM	De 5 a 15 MM
2	El personal de la planta requiere tratamiento médico o primeros auxilios.	Puede resultar en heridas o enfermedades que requieran tratamiento médico o primeros auxilios.	Mínimos daños ambientales sin violación de leyes y regulaciones.	De 500 mil a 5 MM	De 500 mil a 5 MM
1	Sin impacto en el personal de la planta.	Sin efecto en la población	Sin daños ambientales ni violación de leyes y regulaciones.	Hasta 500 mil	Hasta 500 mil

De la tabla “Categoría de los Impactos”, el valor situado en la columna "Categoría" se atribuirá a las consecuencias, utilizando este para efectuar el cálculo del nivel de criticidad. La repercusión o efecto general de una falla se calcula al sumar los valores de las categorías vinculadas a cada columna o criterio y multiplicarlos por el valor de la categoría adquirida de la tabla que establece la frecuencia de aparición de la falla.

Una vez determinado el valor crítico, se procede a buscarlo en la "Matriz de Criticidad", creada para establecer el grado de criticidad en función de los valores y la jerarquía definidos. El cálculo de la frecuencia de aparición del impacto facilita la "organización" de los inconvenientes, elementos, equipos, sistemas o líneas, basándose en la criticidad. La determinación del grado de importancia y la detección de los activos más esenciales facilitará la asignación de recursos a las áreas que más lo requieran, además de administrar las labores de reducción del riesgo en componentes subsistemas, teniendo en cuenta su efecto en el proceso. (Garcia, 2020)

Paso 3: El “Análisis de Modos de Fallas y Efectos” (FMEA) es un instrumento para llevar a cabo un estudio sistemático y proactivo de un proceso donde pueden surgir perjuicios. En un FMEA, un grupo, que simboliza todas las áreas del proceso que están bajo evaluación, se congrega para anticipar y documentar dónde, cómo y en qué grado el sistema podría cometer errores. Después, los integrantes del equipo con la experiencia apropiada colaboran para concebir mejoras y así evitar tales fallos, en particular aquellos que puedan suceder o provocar daños severos. Hay una variedad de herramientas y programas disponibles para llevar a cabo un AMEF, tales como hojas de cálculo, programas especializados o plataformas digitales. La selección del instrumento estará condicionada por la complejidad del análisis y por los recursos existentes. Un ejemplo de aplicación de FMEA puede ser sobre un motor eléctrico. Se identifica primero que un modo de falla posible es el sobrecalentamiento del motor. Las causas podrían ser una alineación incorrecta, una sobrecarga o una falla en el sistema de refrigeración. Los efectos podrían ser la reducción de la vida útil del motor, una parada no programada y posibles daños en otros equipos. Las acciones de detección podrían incluir la instalación de termopares y el monitoreo de la temperatura a través de un sistema de supervisión. (Improvement, 2021)

Paso 4: Es esencial la elección de los parámetros a monitorear para asegurar la eficacia de este método. La elección de los parámetros a monitorear debe fundamentarse en un análisis de riesgo que tome en cuenta la importancia del equipo (como se ha mencionado

previamente), el historial de averías, el costo de estas y la complejidad y el costo de la medición. (Calvo C. S., 2021). En el próximo paso enlistaremos las diferentes técnicas para medir estos parámetros, pero podemos clasificarlos de la siguiente forma:

Parámetros de proceso

- Temperatura: Este indicador puede ser medido en diversos dispositivos (hornos, convertidores, torres de absorción), donde las temperaturas extremadamente bajas o elevadas pueden señalar problemas de corrosión, incrustaciones o errores en los sistemas de control.
- Presiones: Las anomalías en la presión de diseño en dispositivos como sopladores, ventiladores y bombas pueden indicar bloqueos, escapes o deterioro de elementos.
- Caudal: La circulación de los distintos fluidos (aire, gases, ácido) debe permanecer dentro de las fronteras definidas. Las desviaciones notables pueden señalar bloqueos, fugas o dificultades en las bombas.
- Composición química: El estudio constante de gases y líquidos facilita la identificación de alteraciones en la composición que podrían señalar problemas de corrosión, polución o ineficiencia en el procedimiento.
- Niveles: Es esencial supervisar los niveles en tanques y recipientes para prevenir derrames y asegurar un correcto funcionamiento de los equipos.

Parámetros de vibración:

- Aceleración: El incremento de la vibración en dispositivos rotativos (como bombas, ventiladores, compresores) puede señalar desequilibrio, desalineación, deterioro de los rodamientos o dificultades en los acoplamientos.
- Velocidad: La frecuencia de vibración puede ofrecer datos acerca del tipo de problema (desequilibrio, resonancia, etc.).
- Fase: La comparación de la fase de vibración en diferentes puntos de un equipo puede ayudar a identificar la fuente de la vibración.

Parámetros de lubricantes:

- Contaminación: La existencia de partículas de metal, agua o residuos de desgaste en el aceite lubricante señala dificultades en los elementos lubricados.
- Degradación: El análisis de los productos de degradación del aceite permite evaluar su condición y predecir su vida útil.

Parámetros acústicos:

- Ruido: El aumento del ruido en equipos puede indicar problemas mecánicos, como el desgaste de rodamientos o el desequilibrio de las máquinas.

Parámetros Eléctricos.

- Corriente: El monitoreo de la corriente en motores eléctricos permite detectar sobrecargas, desbalances y otras anomalías.
- Temperatura: La temperatura de los devanados de los motores eléctricos es un indicador importante de su condición.
- Descargas parciales: La detección de descargas parciales en equipos eléctricos puede indicar problemas de aislamiento y prevenir fallas catastróficas.

Parámetros mecánicos:

- Fricción: La detección de fricción interna en equipos rotativos puede indicar desgaste prematuro de componentes.
- Corrosión: Es esencial tanto medir el grosor de las paredes de los equipos como observar visualmente la corrosión para evitar averías estructurales.
- Alineación: La alineación de los equipos rotativos debe verificarse periódicamente para evitar vibraciones excesivas y desgaste prematuro.
- Balance: El balance de los rotores es esencial para minimizar las vibraciones y prolongar la vida útil de los equipos.

Paso 5: Nos adentraremos ahora en uno de los puntos más importantes que es la selección de las técnicas de mantenimiento predictivo. A continuación, describiremos cada una para que el lector tenga una idea más clara sobre si aplicarla o no a su proceso. Aunque, en la realidad, se trata de aplicar todas las posibles, sobre todo en plantas como las de ácido sulfúrico donde conviven sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos, neumáticos, automatismos, químicos, etc.

“Análisis de vibraciones”: esta metodología de mantenimiento se fundamenta en la investigación del trabajo de las máquinas rotatorias mediante el análisis de su conducta ante las vibraciones. Es sabido que todas las máquinas muestran ciertos grados de vibración, incluso si están funcionando adecuadamente. No obstante, cuando surge alguna anomalía, estos niveles habituales de vibración se modifican, lo que señala la importancia de revisar el equipo correspondiente.

Para que este procedimiento sea efectivo, es necesario tener conocimiento de ciertos datos del dispositivo a examinar, tales como su velocidad de giro, tipo de cojinetes, tipo de transmisión, número de paletas, entre otros. Además, es crucial establecer los lugares donde se realizarán las comprobaciones y el equipo de análisis más apropiado para realizar el estudio. Las vibraciones pueden ser examinadas tanto midiendo su amplitud como descomponiéndolas en función de su frecuencia. Cuando la magnitud de la vibración excede los límites tolerables o cuando el espectro de vibración cambia a lo largo del tiempo, indica que algo negativo está ocurriendo.

Las vibraciones pueden categorizarse en vibraciones libres, generadas por un sistema que vibra debido a una fuerza que ya no está ejerciendo acción sobre él, o vibraciones forzadas, originadas por un sistema que vibra a causa de acciones externas que persisten a lo largo del tiempo. Las vibraciones pueden provocar en los equipos: incremento de esfuerzos y tensiones, deformaciones que superan el margen elástico (límite de recuperación), cansancio en los materiales, deterioro, pérdida de energía y un consumo energético elevado, y ruidos desagradables que provocan condiciones perjudiciales para la seguridad e higiene.

Los componentes responsables de recoger las variables de entrada que facilitarán el seguimiento de las máquinas son los sensores o sondas. Después, un transductor convierte la energía vibratoria en corriente eléctrica. Este parámetro eléctrico es más sencillo de entender para el sistema. (Calvo C. S., 2021).

En resumen, los inconvenientes que se pueden identificar a través de este método incluyen: desalineación, desequilibrio, resonancia, solturas mecánicas, rodamientos deteriorados, problemas en bombas, anomalías en engranes, problemas eléctricos vinculados a motores, problemas en bandas, etc.

Paso 6: La selección de los individuos encargados de llevar a cabo el mantenimiento predictivo es una decisión estratégica que impactará directamente en el éxito de su implementación. Al seleccionar a las personas adecuadas, se garantiza que el programa se desarrolle de manera efectiva y eficiente, aumentando de esta manera las ventajas para la organización. Un perfil ideal de responsable de llevar a cabo la implementación del mantenimiento predictivo es alguien que, primeramente, tenga conocimientos técnicos sólidos. Esto significa una profunda comprensión de los equipos y procesos industriales,

especialmente aquellos relacionados con la producción de ácido sulfúrico. Además, se necesita dominio de las tecnologías de monitoreo y análisis de datos, como sensores, software de análisis de vibraciones, termografía, etc. Y, por último, debe tener conocimiento de los principios de confiabilidad y los métodos para evaluar la salud de los equipos. Mas allá de tener conocimientos técnicos adecuados, también son importantes las habilidades analíticas. Estas habilidades son la capacidad para interpretar grandes volúmenes de datos y extraer información relevante, la habilidad para identificar patrones, tendencias y anomalías en los datos y dominio de herramientas de análisis de datos y estadística. Todos los integrantes, pero en particular los lideres, deben tener capacidad para comunicar de manera clara y concisa los resultados de los análisis a diferentes niveles de la organización, tanto a técnicos como a directivos. Obviamente son importantes las habilidades para trabajar en equipo y colaborar con diferentes áreas de la empresa. Una última habilidad importante, sobre todo cuando recién se empieza con la implementación del mantenimiento predictivo, es la capacidad para adaptarse a los cambios en los procesos y las prioridades de la empresa, y la disposición a aprender nuevas tecnologías y herramientas.

Si tenemos que definir roles y responsabilidades seguramente encontraremos, a la cabeza del proceso, a un ingeniero especialista en mantenimiento. Este deberá liderar el programa de mantenimiento predictivo, desarrollar e implementar la estrategia de mantenimiento, configurar y gestionar los sistemas de monitoreo, analizar los datos y generar reportes, y coordinar las actividades de mantenimiento con otros departamentos. Por debajo se ubican los técnicos especialistas en mantenimiento que realizan las tareas de mantenimiento basadas en las recomendaciones del ingeniero, instalan y calibran sensores, recolectan datos y realizan las inspecciones visuales. Para este tipo de mantenimiento es importante un analista de datos, ellos desarrollan los modelos predictivos y visualizan los datos para generar reportes personalizados. En ocasiones se necesita un especialista en confiabilidad que identifica los modos de falla y sus efectos. De todas maneras, la estructura organizacional y la cantidad de personas involucradas depende del tamaño de la empresa y de la complejidad del proceso productivo. Una opción es un equipo dedicado exclusivamente al mantenimiento predictivo, otra sería que los responsables del mantenimiento predictivo forman parte del equipo de mantenimiento existente. Una última alternativa es contratar a un centro tercerizado especializado que brinda soporte a toda la organización en temas de mantenimiento predictivo.

Paso 7: Es importante saber cuánto dinero puede ahorrarnos el mantenimiento predictivo para poder decidir si vale la pena invertir en ello y garantizar que funcione bien. Primeramente, debemos identificar los costos actuales de los demás tipos de mantenimiento que estemos aplicando. En el mantenimiento correctivo debemos cuantificar los gastos asociados a reparaciones de emergencia, incluyendo mano de obra, repuestos, tiempo de inactividad y pérdidas de producción. Para el mantenimiento preventivo hay que evaluar los costos de inspecciones, lubricaciones y otros trabajos programados. También hay que tener en cuenta las perdidas producidas a raíz de fallas, calcular el impacto de estas en la producción, calidad del producto, seguridad y reputación de la empresa.

Un segundo paso es estimar los beneficios potenciales como la reducción del tiempo de inactividad. Calcular el ahorro en producción y ventas al minimizar las paradas no programadas. Estimar el ahorro en costos de reemplazo de equipos y componentes ya que un mantenimiento predictivo aumenta la vida útil de los equipos. Hay que identificar oportunidades para reducir el consumo de energía a través de un mantenimiento óptimo. Y, por último, tener en cuenta que a la larga se reducirán los costos de mantenimiento globales.

Una vez hechos los pasos anteriores hay que construir el modelo financiero. En esta parte nos encontramos con los ingresos adicionales que se pueden generar gracias a una mayor disponibilidad de los equipos y una mejor calidad del producto. Por otro lado, tenemos los costos de implementación, considerando los costos de hardware, software, capacitación, consultoría y otros gastos iniciales. Debemos estimar os costos continuos de operación del sistema de mantenimiento predictivo, como el mantenimiento de los equipos de monitoreo y el análisis de datos. A estos se los denomina “costos operativos”. El equipo económico tendrá la tarea de crear un flujo de caja proyectado para evaluar la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo.

El último paso es hacer la justificación económica de la implementación de esta metodología de mantenimiento. Se hace un “cálculo del retorno de la inversión (ROI)”, donde se comparan los beneficios económicos esperados con la inversión inicial para determinar el tiempo de recuperación de la inversión. Luego se hace un análisis “costo-beneficio” para evaluar los beneficios cualitativos y cuantitativos del programa, como la mejora de la seguridad y la satisfacción del cliente. Una vez concluida esta parte se hace una presentación de resultados, que consiste en elaborar un informe conciso y claro que

presente los resultados del análisis financiero y justifique la inversión en el programa de mantenimiento predictivo.

Para realizar estas tareas se pueden utilizar diferentes softwares de gestión de mantenimiento para recopilar y analizar datos, generar reportes y programar tareas de mantenimiento. También se puede acceder a simulaciones para modelar diferentes escenarios y evaluar el impacto de las decisiones de mantenimiento.

Cuando estamos en este paso hay que tener ciertas consideraciones, como, por ejemplo, que debemos reconocer que existen incertidumbres en las estimaciones y utilizar análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de diferentes escenarios. Hay que tener en cuenta también a los beneficios intangibles del programa, como la mejora de la imagen de la empresa y la satisfacción de los empleados. Como ya se nombró al principio de este trabajo, el mantenimiento predictivo es una inversión a largo plazo. Los beneficios pueden no ser evidentes de inmediato, pero a largo plazo pueden generar importantes ahorros y mejoras en la eficiencia global de la fábrica.

Paso 8: Después de haber planeado cómo mantener las máquinas y de organizar quién hará qué, ahora es importante crear los pasos concretos que se deben seguir para mantener todo en buen estado. Estos pasos asegurarán que el programa funcione bien, sea siempre igual y dé buenos resultados.

En resumidas palabras el camino es identificar a los equipos críticos, seleccionar la técnica de monitoreo adecuada y, a partir de ello desarrollar un plan de mantenimiento específico para ese equipo. Hay que definir los valores límite para cada parámetro, así sabremos cuándo se debe realizar una acción correctiva. Luego, se determina la frecuencia con la que se deben recolectar los datos y realizar las inspecciones. Y es muy importante desarrollar y estandarizar procedimientos detallados para cada tarea de mantenimiento, incluyendo la recopilación de datos, el análisis de resultados y la generación de reportes.

Un ejemplo general de procedimiento aplicable a cualquier tipo de industria es el siguiente:

1) Recolectar datos: Los sensores instalados en las diferentes maquinas e instalaciones recolectan datos de vibración y temperatura cada hora.

2) Análisis de datos: Los datos son enviados a un software de análisis profesional que compara los valores actuales con los valores históricos y los umbrales que se han prestablecidos.
3) Generación de alerta: Si los valores superan los umbrales, se genera una alerta para el técnico de mantenimiento.
4) Inspección: El técnico realiza una inspección visual de la maquina o instalación y verifica las condiciones de los componentes.
5) Acción correctiva: Si se identifica un problema, se programa una orden de trabajo para realizar la reparación o intervención necesaria.

Pasaremos a nombrar varios ejemplos de rutinas aplicables a plantas de ácido sulfúrico:

Ejemplo 1: Para este primer ejemplo nombraremos a las torres de absorción. Una rutina debería basarse en análisis de vibración, corrosión y temperatura. Para las vibraciones es necesario monitorear las vibraciones de las bombas y ventiladores para detectar desbalances, desalineaciones o problemas en los rodamientos. Para la corrosión hay que realizar inspecciones visuales periódicas y análisis de muestras de los materiales de construcción para detectar corrosión. Por último, para la temperatura, se puede monitorear la temperatura de los gases de entrada y salida para detectar posibles obstrucciones o problemas en el proceso.

Ejemplo 2: Otros dispositivos importantes son los intercambiadores de calor. Para analizar vibraciones se pueden medir las vibraciones de las bombas y de los propios intercambiadores para detectar problemas mecánicos. Las incrustaciones biológicas se denominan “fouling” y para determinar el grado de incrustaciones se puede medir la caída de presión para evaluar la acumulación de depósitos y programar limpiezas. Para el caso de corrosión se puede utilizar el mismo método que para el primer ejemplo.

Ejemplo 3: En el caso de las bombas, en general, se suele medir vibraciones, monitoreándolas para detectar desbalances, desalineaciones, problemas en los rodamientos o cavitación. Se puede medir temperatura del aceite lubricante y de los rodamientos para detectar sobrecalentamiento. Se recomienda monitorear la corriente eléctrica para detectar sobrecarga o fallas en el motor.

Ejemplo 4: Para los instrumentos de medición es muy importante su calibración. Realizar calibraciones periódicas de los instrumentos de medición (presión, temperatura, flujo) para asegurar la precisión de los datos.

Ejemplo 5: En los sistemas de tuberías una buena técnica aplicable es el ultrasonido, con esto se detectan fugas, corrosión interna y espesores de pared en tuberías. Aunque la técnica de ultrasonido se puede aplicar cada cierto periodo de tiempo más largo, cada semana o quincena se puede realizar una inspección visual que sirva para la detección de corrosión externa, daños mecánicos y fugas. Otro método es el de análisis de partículas. Esto es mas de laboratorio y sirve para para detectar desgaste de bombas y válvulas por presencia de material ferroso en el fluido transportado.

Ejemplo 6: En cualquier industria existen gran cantidad de estructuras metálicas. El mantenimiento predictivo de estas consiste, principalmente, en una buena inspección visual para detectar problemas de corrosión, grietas, deformaciones y daños en las estructuras de soporte. También se pueden aplicar ensayos no destructivos como ultrasonido, rayos X o corrientes inducidas para evaluar la integridad estructural.

Ejemplo 7: Para los sistemas de ventilación, se puede hacer mantenimiento predictivo mediante medición de flujo para verificar el caudal de aire y asegurar una adecuada ventilación y extracción de gases. Se recomienda la medición de la presión estática y dinámica para detectar obstrucciones o fugas. También es importante, como casi todos los casos vistos, la inspección visual, que en este caso nos sirve para la detección de corrosión, desgaste y daños en los componentes del sistema.

Vamos ahora con el paso a paso de un mantenimiento predictivo para el caso de una bomba centrifuga:

1- Recolección de datos: Medición de vibraciones, temperatura, corriente y presión diferencial de forma diaria.
2- Análisis de datos: Comparación de los datos con los valores históricos y los umbrales establecidos.
3- Generación de alertas: Si se detectan anomalías, se genera una alerta para el equipo de mantenimiento.
4- Inspección visual: Se realiza una inspección visual de la bomba, buscando fugas, desgaste, desalineación o daños en el acoplamiento.
5- Análisis de aceite: Se toma una muestra de aceite para analizar su condición y detectar desgaste de los componentes internos.
6- Planificación de mantenimiento: Se programa una intervención de mantenimiento correctivo o preventivo según los resultados del análisis.

Paso 9: La formación y capacitación del personal en las técnicas y metodologías del mantenimiento predictivo es fundamental para garantizar el éxito de un programa de mantenimiento predictivo. La capacitación es importante para darle eficacia al programa de mantenimiento. Un personal capacitado puede identificar de manera temprana las señales de desgaste o falla en los equipos, lo que permite realizar intervenciones preventivas y reducir el tiempo de inactividad. Lo principal de la formación, más allá de hablar de las técnicas de mantenimiento y como aplicarlas, es hablar de seguridad, ya que, al detectar y corregir condiciones peligrosas de manera proactiva, se reduce el riesgo de accidentes laborales.

En una capacitación habitual, primeramente, se repasan los conceptos básicos del mantenimiento predictivo, como son las definiciones que hemos dado a lo largo de este informe, los objetivos, beneficios y la comparación con los otros métodos de mantenimiento. Luego se pasan a detallar en que consisten, como hacerlas y con que equipos a las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo que hemos visto. Se pueden formar técnicos especialistas en cada técnica o hacer que todos sepan como aplicar todas las técnicas. Esto siempre depende del tamaño de la empresa y de como esta armado el grupo de mantenimiento.

El paso a paso para implementar un programa de capacitación efectivo, en general, es el siguiente:

1- Necesidades de capacitación: Identificar las necesidades específicas de cada puesto de trabajo.
2- Diseño del programa: Elaborar un plan de capacitación que incluya objetivos claros, contenidos, metodología y evaluación.
3- Selección de instructores: Escoger instructores con experiencia en mantenimiento predictivo y habilidades pedagógicas.
4- Modalidades de capacitación: Ofrecer una combinación de capacitación teórica y práctica, utilizando simuladores, talleres y casos reales.
5- Evaluación del aprendizaje: Evaluar los conocimientos adquiridos por los participantes a través de pruebas y evaluaciones prácticas.
6- Seguimiento y mejora continua: Realizar un seguimiento de la efectividad del programa y realizar ajustes según sea necesario.

Una buena capacitación inicial y un plan de mejora continua genera, a futuro, una mayor autonomía del personal, un mayor compromiso con la empresa y con los objetivos del programa de mantenimiento, y la reducción de errores humanos durante la ejecución de las tareas de mantenimiento.

Paso 10: La implementación exitosa de un plan de mantenimiento predictivo en cualquier empresa industrial depende en gran medida del apoyo de los directivos y gerentes de los diferentes sectores. Sin esto, es imposible que el programa sea efectivo. Este apoyo es crucial por varios motivos:

1- Aseguramiento de Recursos:
- Financieros: Los directivos deben asignar los recursos financieros necesarios para adquirir el software, hardware, herramientas y equipos especializados, así como para capacitar al personal.
- Humanos: Es fundamental contar con el personal adecuado y asignarles las responsabilidades necesarias para llevar a cabo el plan.

2- Definición de Objetivos Claros:
- Alineación con los objetivos estratégicos: Los directivos deben asegurar que los objetivos del programa de mantenimiento predictivo estén alineados con los objetivos generales de la empresa.
- Establecimiento de indicadores clave de desempeño (KPI): Los KPI permitirán medir el progreso del programa y evaluar su impacto en la eficiencia y la productividad. (Analizaremos esto con mas profundidad en el próximo paso).

3- Comunicación y Visibilidad:
- Comunicación efectiva: Los directivos deben comunicar de manera clara los beneficios del programa a todos los niveles de la organización.
- Visibilidad del programa: El programa debe tener la visibilidad necesaria para garantizar el compromiso de todos los empleados.

4- Fomento de una Cultura de Mejora Continua:
- Apoyo a la innovación: Los directivos deben fomentar una cultura de mejora continua, incentivando la búsqueda de nuevas tecnologías y mejores prácticas.
- Reconocimiento de los logros: Es importante reconocer y recompensar los logros del equipo de mantenimiento para mantener la motivación.

5- Gestión del cambio:

- Liderazgo en el cambio: Los directivos deben liderar el proceso de cambio y comunicar los beneficios del programa de manera efectiva.
- Superación de resistencias: Es probable que se encuentren resistencias al cambio, por lo que los directivos deben estar preparados para abordarlas y gestionarlas de manera adecuada.

Si el apoyo directivo se concreta habrá mayor compromiso del personal porque percibirán el apoyo de la dirección, estarán más dispuestos a participar en el programa y a aportar sus ideas. Un programa de mantenimiento predictivo con el respaldo de la dirección tiene mayores posibilidades de alcanzar sus objetivos.

Paso 11: Los indicadores de mantenimiento, también conocidos como KPIs (Key Performance Indicators), son métricas que nos permiten evaluar el desempeño de las actividades del mantenimiento. Son como un “termómetro” que nos indica la salud de nuestros equipos y la eficiencia de nuestras operaciones de mantenimiento. En el contexto del mantenimiento predictivo, los indicadores nos ayudan a evaluar, a efectividad del programa, identificar áreas de mejora, tomar decisiones basadas en datos y comunicar el valor del programa.

La elección de los indicadores dependerá de los objetivos específicos del programa de mantenimiento predictivo y de las características de la planta. Algunos factores para considerar son:

- Los objetivos estratégicos de la empresa: Los indicadores deben alinearse con los objetivos generales de la organización.
- La criticidad de los equipos: Se deben priorizar los indicadores que miden el desempeño de los equipos más críticos.
- La disponibilidad de datos: Es necesario contar con los datos necesarios para calcular los indicadores.
- La facilidad de medición: Los indicadores deben ser fáciles de medir y calcular.

A continuación, se detallarán los principales indicadores que se aplican en la mayoría de las industrias para el mantenimiento. De todas maneras, cada industria puede crear sus propios indicadores según su propia necesidad, siempre y cuando este sea perfectamente medible y comparable a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en una planta de ácido sulfúrico, un indicador clave podría ser el "Número de fugas detectadas por termografía". Este indicador nos permitiría evaluar la efectividad del programa de mantenimiento predictivo

en la detección temprana de fugas en los equipos, lo que a su vez reduciría el riesgo de corrosión, contaminación y paradas no programadas.

Es posible cuantificar y examinar cualquier acción que produzca números o valores en el ámbito del mantenimiento. El problema radica en determinar cuáles son los indicadores de rendimiento más relevantes para no desperdiciar tiempo con aquellos de menor relevancia.

Los indicadores clave de rendimiento en mantenimiento tienen algunas particularidades esenciales como ser la objetividad y la característica de perseguir metas concretas. Deben ser medibles, es decir, utilizan data numérica para valorar el desempeño presente y cotejarlo con el estándar fijado. Los indicadores clave de rendimiento en el mantenimiento están en sintonía con las metas estratégicas de la entidad. Contribuyen a asegurar que las tareas de mantenimiento aporten directamente a los objetivos generales de la compañía. Con estos KPI's se hacen más fáciles las tomas de decisiones informadas al proporcionar datos cuantificables que respaldan la selección de estrategias y prioridades.

Indicador 1: Disponibilidad Operativa (OA – Operational Availability): Este indicador evalúa el período en el que un sistema o equipo particular se encuentra disponible y operativo para llevar a cabo sus funciones programadas. Se manifiesta en forma de porcentaje y es esencial para medir la eficacia operacional.

Indicador 2: Tiempo medio entre fallas (MTBF – Mean Time Between Failures): Determina el tiempo medio que espere entre las fallas de un sistema. Cuanto más alto sea el MTBF, más confiable será la percepción de fiabilidad del sistema. El MTBF es una medida del tiempo medio entre fallas sucesivas de un sistema o componente reparable, y tal como su nombre indica, se calcula desde que ocurre una falla hasta que ocurre la siguiente, lo que abarca los periodos de uptime y downtime. El MTBF se determina utilizando la fórmula siguiente:

MTBF = MTTF + MTTR

Indicador 3: Tiempo medio de reparación (MTTR – Mean Time to Repair): Indica el tiempo promedio necesario para reparar un sistema después de una falla. Un MTTR bajo es deseable, ya que implica una rápida recuperación y menor tiempo de inactividad.

Indicador 4: Tiempo medio hasta la falla (MTTF – Mean Time to Failure): representa una estimación del tiempo medio que se anticipa que un sistema o componente no reparable pueda funcionar antes de fallar. La normativa dicta que se aplica a componentes o sistemas que, al fallar, no pueden ser sustituidos y requieren ser sustituidos. No obstante, este indicador suele ser sustituido o malinterpretado por el MTBF. Lo que es totalmente erróneo. Para equipos reparables como los presentes en todas las industrias, el MTTF representa el intervalo medio entre que el equipo se reinicia debido a una avería previa, hasta que el activo se restringe nuevamente para su mantenimiento. En otras palabras, se refiere al tiempo que el equipo permaneció en funcionamiento continuo (Uptime).

Indicador 5: La disponibilidad se refiere a la posibilidad de que un sistema, dispositivo o elemento ejecute la función planificada cuando sea necesario. Se manifiesta en términos porcentuales y considera tanto la fiabilidad como la viabilidad del sistema. La disponibilidad de un equipo puede determinarse mediante la fórmula siguiente:

Disponibilidad = (Horas totales de funcionamiento planeadas - Horas en paradas) / Horas totales de funcionamiento planeadas.

Indicador 6: Se entiende por confiabilidad a la misión concreta asignada a un activo. En vez de enfocarse exclusivamente en prevenir fallos, es un indicador que se centra en garantizar que el equipo pueda desempeñar de manera constante su tarea asignada, durante un periodo determinado y bajo condiciones preestablecidas. Así, se destaca la capacidad de un equipo o elemento para seguir realizando las tareas previstas sin interrupciones o inconvenientes, es decir, sin mostrar fallos.

La confiabilidad se puede determinar mediante el uso de la función de confiabilidad exponencial, la cual se fundamenta en la suposición de que las fallas se reparten de manera aleatoria a través del tiempo. La siguiente es la fórmula:

Confiabilidad (R) = e^(-λt).

Donde:

- R es la confiabilidad del sistema.
- λ (lambda) es la tasa de fallas del sistema, normalmente expresada como fallas por unidad de tiempo.
- “t” es el periodo de tiempo para el que se calcula la confiabilidad.

- “e” es la base del logaritmo natural.

En primer lugar, necesitamos determinar la tasa de fallos (λ), para lo cual se requieren ciertos datos históricos acerca del desempeño de la máquina. Imaginemos que contamos con información acerca del número de averías y el tiempo total de operación de la bomba en un periodo previo, por ejemplo, que en el último trimestre esta tuvo un tiempo total de funcionamiento de 1116 horas, y se presentaron un total de 4 fallas. Y se calcula el λ:

λ = N° de fallas / Tiempo total de funcionamiento

Indicador 7: OEE (Overall Equipment Effectiveness): Es el parámetro de referencia para evaluar la productividad en el proceso de producción. En resumen, determina el porcentaje de tiempo de producción que resulta verdaderamente productivo. Una calificación de OEE del 100% implica que solo se producen componentes de alta calidad, lo más rápido posible y sin periodos de inactividad. En el contexto de la OEE, esto implica un 100% de calidad (únicamente componentes de alta calidad), un 100% de desempeño (el más rápido posible) y un 100% de disponibilidad (sin interrupciones). El OEE se calcula utilizando una fórmula simple:

OEE = Disponibilidad x Rendimiento x Calidad.

La disponibilidad se calcula como la relación entre el Tiempo de Funcionamiento y el Tiempo de Producción Planificado:

Disponibilidad = Tiempo de Funcionamiento / Tiempo de Producción Planificado

Teniendo en cuenta que:

Tiempo de Funcionamiento = Tiempo de Producción Planificado - Tiempo de Parada

El rendimiento considera cualquier factor que permita que el proceso de producción opere a una velocidad inferior a la máxima posible durante su funcionamiento (incluyendo tanto Ciclos Lentos como Pequeñas Paradas). El rendimiento es la relación entre el Tiempo de Funcionamiento Neto y el Tiempo de Funcionamiento. Se calcula como:

Rendimiento = (Tiempo de Ciclo Ideal × Total de piezas) / Tiempo de Funcionamiento.

El Tiempo de Ciclo Ideal se refiere al tiempo de ciclo más rápido que tu proceso puede alcanzar en situaciones ideales. Así, al multiplicar por el total de piezas fabricadas, se

obtiene el Tiempo de Funcionamiento Neto (el periodo más corto posible para la producción de las piezas).

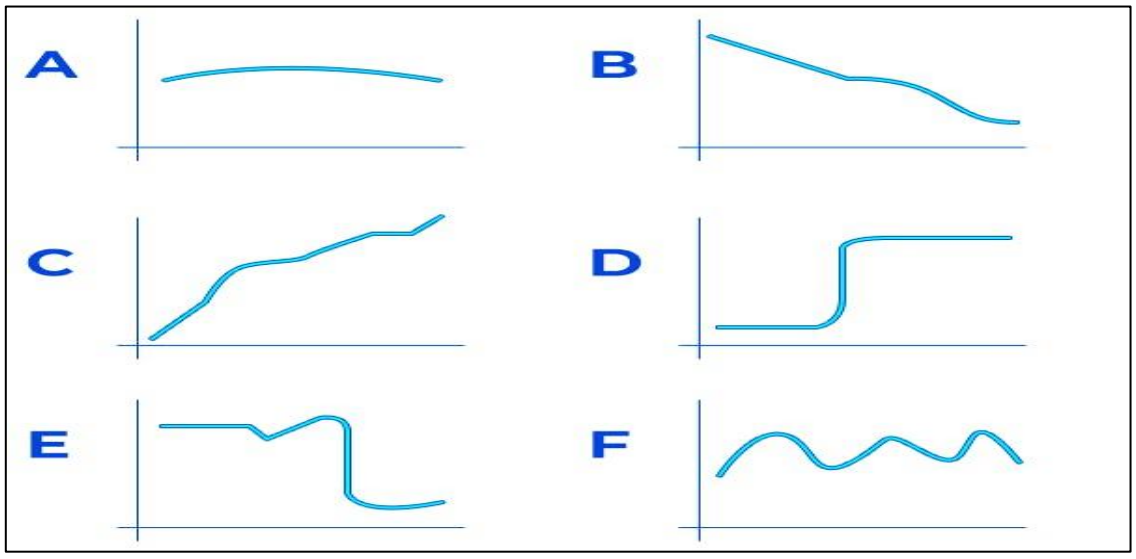
La calidad considera las piezas producidas que no satisfacen los criterios de calidad, incluyendo las que requieren reconstrucción. La Calidad OEE evalúa el Rendimiento al Primer Paso, dado que establece las Partes Buenas como aquellas que transitan exitosamente por el proceso de producción en la primera etapa sin requerir ningún trabajo adicional. La calidad se calcula como:

Calidad = Piezas con buena calidad / Total de piezas

Indicador 8: Backlog. Este es un marcador de mantenimiento que indica el tiempo requerido por un equipo de mantenimiento para completar todas las labores pendientes. Este indicador vincula las necesidades de servicio presentes con la habilidad para satisfacerlas, y su resultado se manifiesta en semanas de backlog.

Backlog = Tiempo total de tareas pendientes / Capacidad de trabajo disponible.

También es crucial el "gráfico de backlog" en la toma de decisiones a nivel ejecutivo. Esencialmente existen 6 clases de curvas. Crea que el eje vertical representa los valores de backlog y el eje horizontal representa los meses del año.



Curva A: Estable. Es necesario analizar si está en un valor aceptable para tomar una decisión.

Curva B: Disminución de la demanda de trabajo. Puede generar que el personal tenga tiempo libre debido a la disminución de trabajo.

Curva C: Backlog con tendencia de alta constante. Puede acarrear problemas debido a la baja calidad de mantenimiento.

Curva D: Subida brusca. Puede ocurrir cuando hay mantenimiento correctivo en un tiempo de ejecución muy alto.

Curva E: Caída brusca. En este caso puede haber ocurrido contratación de servicios externos, movilización interna para reducción, entre otros.

Curva F: Oscilación. Puede ser justificable en Industrias que tengan una fuerte característica de estacionalidad, por ejemplo, ligadas a la agricultura.

Indicador 9: Costo de Mantenimiento sobre la Facturación (CMF). Los indicadores vinculados a los costos son magníficos ya que demuestran la influencia del mantenimiento en el rendimiento de la compañía. lo que los transforma en un instrumento seguro a nivel de dirección. Es posible determinar si el sector de mantenimiento está realizando una adecuada administración financiera de los recursos con ellos. Los costos de mantenimiento engloban al personal, a los materiales, la contratación de servicios externos, la depreciación y la perdida de facturación por detenciones por fallas. Uno de los principales factores que hacen destacar este indicador es que el gasto de mantenimiento puede influir directamente en el costo del producto. Así, si la compañía invierte gran cantidad de dinero en mantenimiento, el costo del producto se incrementará y de esta manera, la compañía pierde competitividad ante sus rivales. El CMF es el indicador que mejor se ajusta a ese contexto, ya que realiza una comparación directa entre el costo de facturación y el costo de mantenimiento. Se calcula así:

CMF = (Coste total de mantenimiento / Facturación en bruto) x 100

Indicador 10: Costo de mantenimiento sobre valor de reposición (CPMV): este indicador examina el gasto de mantenimiento utilizado en cada dispositivo para determinar si sería más beneficioso conservar el activo o adquirir uno nuevo. Es aconsejable emplear ese indicador para equipos de gran importancia. Su cálculo es:

CPMV = (Coste total de mantenimiento / Valor Estimado de Reemplazo) x 100

El “Valor Estimado de Reemplazo”, como el propio nombre lo indica, es la cantidad de capital de que vamos a tener que disponer para comprar un nuevo equipo.

Estos son solamente los principales indicadores que se pueden aplicar en el mantenimiento, pero, como se ha dicho, cada industria deberá elegir cuales son los que mejor se adapten cumpliendo con las características que hemos nombrado. (Suazo, 2018).

6. Capitulo VI: Costo veneficio

- Personal y Equipos necesarios

Personal Nuevo			
Cantidad	Personal	Costo Mensual	Costo Anual
1	Analista de mantencion	$ 1.600.000	$ 19.200.000
2	Tecnicos sintomaticos	$ 2.400.000	$ 28.800.000
Equipos			
Cantidad	Equipo	Costo mensula implementacion	Costo anual de Implementacioón
1	Cámara termográfica FLUKE	$ 341.667	$ 4.100.000
1	Analizador de vibraciones FLUKE	$ 1.666.667	$ 20.000.000
		Mensual	Anual
Costos		$ 6.008.333	$ 72.100.000

NOTA: el costo total de la implementación es de $72.100.000, lo que representa un 8 % de lo ahorrado posterior a la implementación

6.1 Análisis de costos sin la implementación del programa preventivo

El costo anual por fundición detenida el año 2024 por conceptos de obstrucción de toberas de enfriamiento y desbalanceo de ventiladores de tiro fue de $904.819.200. Por lo que es fundamental implementar un plan de mantenimiento predictivo.

Valoración de fallas mensual 2024				
Mes	**Horas de detencion**	**Valor Hora detenida (US)**	**Costo Mantencion US**	**Costo Mantencion Pesos**
Enero	10	$ 10.000	$ 100.000	$ 94.252.000
Febrero	12	$ 10.000	$ 120.000	$ 113.102.400
Marzo	8	$ 10.000	$ 80.000	$ 75.401.600
Abril	12	$ 10.000	$ 120.000	$ 113.102.400
Mayo	7	$ 10.000	$ 70.000	$ 65.976.400
Junio		$ 10.000	$ -	$ -
Julio	6	$ 10.000	$ 60.000	$ 56.551.200
Agosto	6	$ 10.000	$ 60.000	$ 56.551.200
Septiembre	9	$ 10.000	$ 90.000	$ 84.826.800
Octubre	11	$ 10.000	$ 110.000	$ 103.677.200
Noviembre	7	$ 10.000	$ 70.000	$ 65.976.400
Diciembre	8	$ 10.000	$ 80.000	$ 75.401.600
Costo anual 2024			**$ 960.000**	**$ 904.819.200**

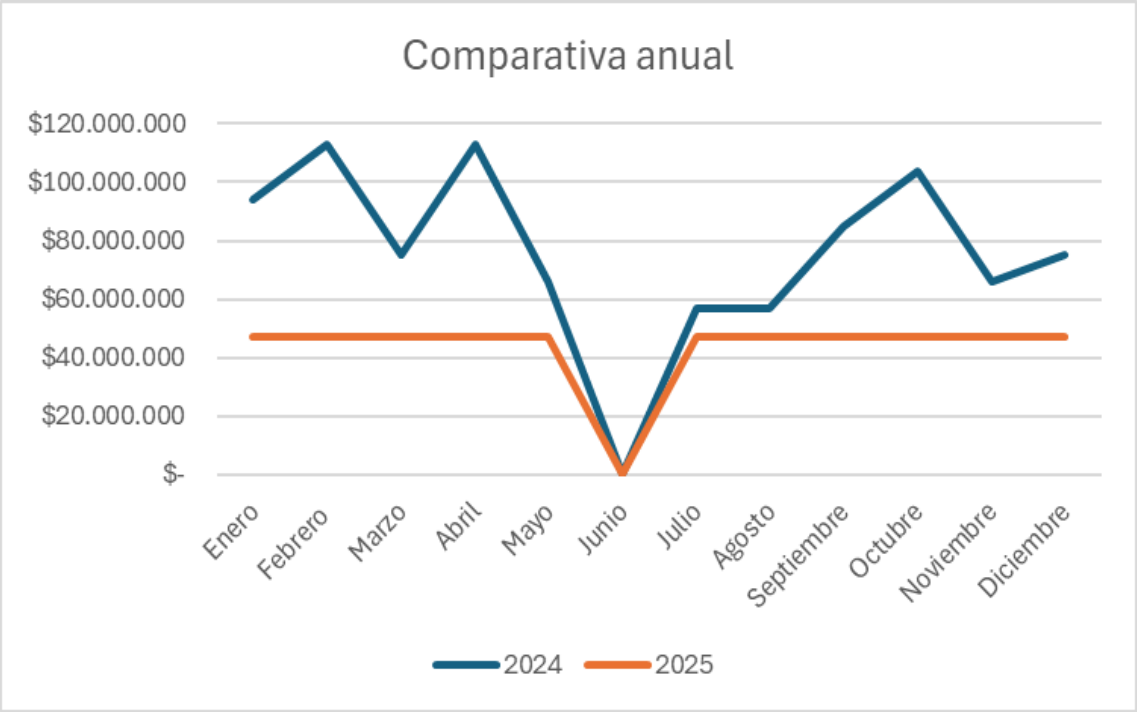
6.2 Análisis de costo de implementación de plan de mantenimiento predictivo.

Valoración de fallas mensual 2025 Proyectado				
Mes	**Horas de detencion**	**Valor Hora detenida (US)**	**Costo Mantencion US**	**Costo Mantencion Pesos**
Enero	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Febrero	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Marzo	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Abril	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Mayo	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Junio	0	$ 10.000	$ -	$ -
Julio	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Agosto	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Septiembre	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Octubre	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Noviembre	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Diciembre	5	$ 10.000	$ 50.000	$ 47.126.000
Costo anual 2025			**$ 550.000**	**$ 518.386.000**

6.3 Comparativa de ahorro sin implementación vs la proyección con implementación para 2025

Comparativa Anual				
Mes	**2024**	**2025**	Ahorrado	%Ahorrado
Enero	$ 94.252.000	$ 47.126.000	$ 47.126.000	50%
Febrero	$ 113.102.400	$ 47.126.000	$ 65.976.400	58%
Marzo	$ 75.401.600	$ 47.126.000	$ 28.275.600	38%
Abril	$ 113.102.400	$ 47.126.000	$ 65.976.400	58%
Mayo	$ 65.976.400	$ 47.126.000	$ 18.850.400	29%
Junio	$ -	$ -	$ -	0%
Julio	$ 56.551.200	$ 47.126.000	$ 9.425.200	17%
Agosto	$ 56.551.200	$ 47.126.000	$ 9.425.200	17%
Septiembre	$ 84.826.800	$ 47.126.000	$ 37.700.800	44%
Octubre	$ 103.677.200	$ 47.126.000	$ 56.551.200	55%
Noviembre	$ 65.976.400	$ 47.126.000	$ 18.850.400	29%
Diciembre	$ 75.401.600	$ 47.126.000	$ 28.275.600	38%

6.4 Grafica de ahorro anual comparativa



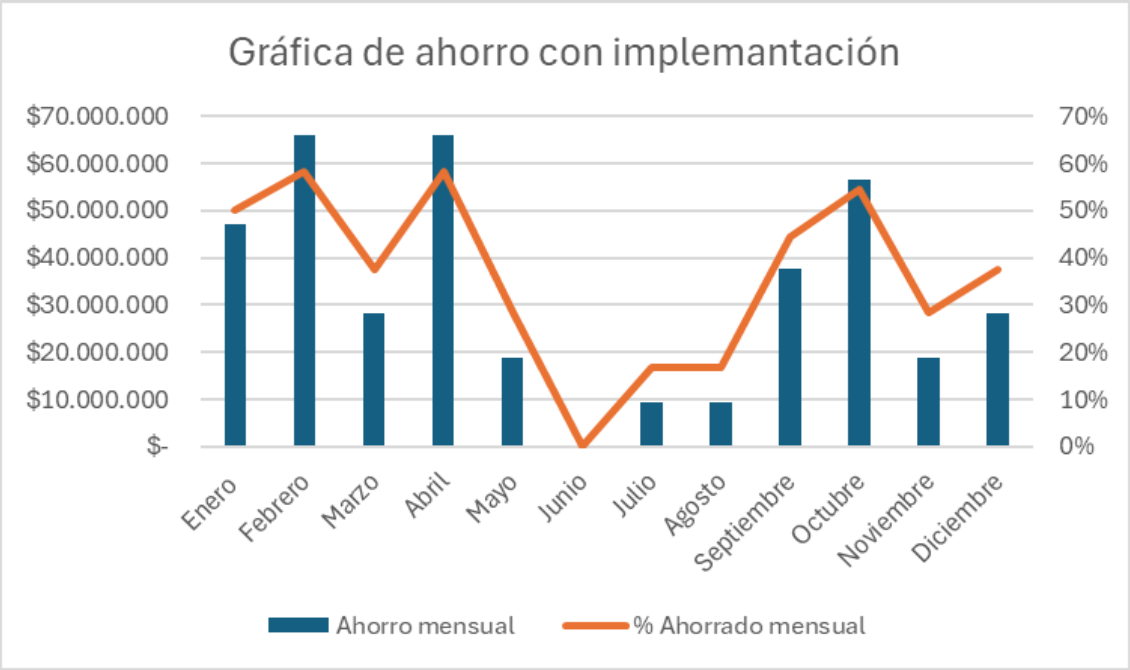
Ahorro con implemantación

Mes	Ahorro mensula	% Ahorrado mensual
Enero	$ 47.126.000	50%
Febrero	$ 65.976.400	58%
Marzo	$ 28.275.600	38%
Abril	$ 65.976.400	58%
Mayo	$ 18.850.400	29%
Junio	$ -	0%
Julio	$ 9.425.200	17%
Agosto	$ 9.425.200	17%
Septiembre	$ 37.700.800	44%
Octubre	$ 56.551.200	55%
Noviembre	$ 18.850.400	29%
Diciembre	$ 28.275.600	38%
Ahorro anual	**$ 386.433.200**	**43%**

Al implementar este plan de mantenimiento predictivo bajaremos los costos por fundición detenida un 43% lo que en dinero es $386.433.200. Esta baja de costo la conseguiremos realizando un monitoreo continuo y proyectando los datos entregados por los equipos de

medición, esto nos llevara a programar nuestras detenciones y manejar los tiempos de estas.

6.5 Grafica de ahorro Mensual en Pesos y Porcentaje



7. Capitulo VII: Conclusión

A lo largo del informe pude describir los distintos tipos de mantenimiento y abocarnos, especialmente, al mantenimiento predictivo. Vimos sus principales características, técnicas y pasos para una implementación correcta del mismo. Esperamos que esto sirva como guía para que cualquier industria, especialmente las abocadas a la producción de ácido sulfúrico, puedan adoptar este tipo de mantenimiento y comprender los múltiples beneficios de su implementación. Como se plasmó, es importante aclarar nuevamente que cualquier nueva implementación de un plan de mantenimiento (en este caso del tipo predictivo), debe estar acompañada globalmente por la empresa, es decir, no debe surgir solamente de una idea del grupo de mantenimiento, sino que debe estar planificada desde los directivos y gerentes de la empresa, y relacionar al grupo de mantenimiento con todos los sectores de la fábrica. Si esto no es así, seguramente la implementación de cualquier plan falle, se generen dudas entre las personas abocadas a llevarlo a cabo y se gaste mucho dinero sin un fin especifico. Por último, vimos que es muy importante medir mediante indicadores cómo evoluciona la industria a partir de la aplicación de este plan, ya que si

no tenemos indicadores nadie sabrá si las técnicas de mantenimiento y las formas de realizarlas son las correctas y desde las personas que realizan el mantenimiento hasta los directivos no podrán corregir desvíos en busca de una mejora continua dentro de la industria.

Para finalizar, la puesta en marcha de un programa de mantenimiento predictivo en una industria de ácido sulfúrico es una elección estratégica que brinda ventajas considerables en aspectos de eficacia, seguridad, fiabilidad y sostenibilidad. Al destinar recursos a tecnologías e instrumentos de seguimiento, y al formar al personal, las compañías pueden incrementar al máximo el rendimiento de su inversión y garantizar la continuidad de sus operaciones.

8. Capitulo VIII: Bibliografía

Trabajos citados

Calvo, C. S. (2021). Técnicas de Mantenimiento Predictivo. Universidad de Cantabria.

Calvo, C. S. (2021). Técnicas de Mantenimiento Predictivo. Universidad de Cantabria.

Cobremar. (13 de Junio de 2020). Proceso productivo Acido Sulfurico. Peru.

Codelco, E. (13 de Octubre de 2024). codelcoeduca. Obtenido de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso_productivo.html

Garcia, J. M. (2020). Mantenimiento predictivo. Barcelona: Universitat Oberta de Catalunya.

Group, P. (09 de Mayo de 2020). PCC Group. Obtenido de https://www.products.pcc.eu/es/blog/acido-sulfurico-sangre-corrosiva-de-la-industria/

Improvement, I. f. (2021). Análisis de Modos de Fallas y Efectos (FMEA). ihi.org.

Rolando, L. Ñ. (2020). DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EL ÁREA DE ABASTECIMIENTO CORTE TÉRMICO DE LA EMPRESA SEDEMI. Quito: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMERICANA.

Sevilla, U. (2021). Análisis de criticidad y estudio RCM del equipo de máxima criticidad de una planta de algodon. Sevilla.

Suazo, L. (2018). Tractian. Obtenido de https://tractian.com/es/blog/8-indicadores-indispensables-para-la-gestion-del-mantenimiento