

**GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS  
FÍSICOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
RESIDUOS PETROLEROS**



**MARKIC, Lautaro**

**PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del  
Comahue como requisito para la obtención del grado de  
**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

2024

**GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS  
FÍSICOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
RESIDUOS PETROLEROS**

**MARKIC, Lautaro**

Director: Ing. **CAMPOS, Damián**

Co-Director: Ing. **ROJAS, Fabián**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del  
Comahue como requisito para la obtención del título de grado de  
**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

2024

# **GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS FÍSICOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PETROLEROS**

**MARKIC, Lautaro**

Aprobado en fecha 10 de junio de 2024.

Tribunal evaluador:

- Mg. Ing. AUDISIO, Orlando
- Ing. TROFFÉ, Mario
- Ing. RAMOSKA, Leandro

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, deseo expresar mi gratitud a toda mi familia por siempre brindarme el respaldo necesario para impulsarme a comenzar y a finalizar mis estudios universitarios.

También a mis profesores y compañeros de estudio de la Universidad Nacional del Comahue, quienes estuvieron presentes brindándome sus conocimientos y enseñanzas a lo largo de todo mi trayecto académico.

Agradezco profundamente a la Empresa Compañía de Saneamiento y Recuperación de Materiales S.A. (Comarsa) y, en particular, al Ing. Fabián Rojas, por haberme brindado la oportunidad de adquirir la formación inicial en el área de mantenimiento y posteriormente la continuidad de mi labor en la misma organización. Esto me ha permitido llevar a cabo el presente trabajo y concluir de esta manera mi carrera de grado.

Una mención especial para mi Director de PIP el Ing. Damián Campos por brindarme sus enseñanzas como profesor y en esta etapa guiándome en el desarrollo de este trabajo.

# **GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS FÍSICOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PETROLEROS**

Autor: MARKIC, Lautaro

Director: Ing. CAMPOS, Damián

Co-Director: Ing. ROJAS, Fabián

## **Resumen**

Este trabajo presenta la aplicación de una metodología de gestión de activos en una planta de tratamiento de residuos petroleros. Siguiendo las etapas detalladas en la metodología, se efectuó un diagnóstico e identificación de los subsistemas que componen el horno de desorción. Este equipo es de suma importancia para los objetivos estratégicos y las necesidades operativas de la compañía. La jerarquización de activos permitió establecer prioridades, clasificando los subsistemas del horno de acuerdo con su criticidad operativa. El plan de mantenimiento se elaboró adaptándose a las características particulares de los activos y su entorno operativo, aprovechando las recomendaciones derivadas de la jerarquización. Se estableció un sistema de control y seguimiento que utiliza indicadores clave de rendimiento para evaluar tanto la disponibilidad operativa como la confiabilidad del horno. El análisis económico validó los resultados obtenidos, demostrando una disminución significativa de los costos de mantenimiento del horno tras la implementación del plan de mantenimiento. La aplicación de la metodología propuesta no solo mejoró la disponibilidad del horno, sino que también brindó a la organización una base sólida para la gestión integral de los activos en la planta, a través de la implementación de un sistema de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO).

*Palabras clave: desorción térmica, tratamiento de residuos, gestión de activos, mantenimiento.*

# ASSET MAINTENANCE MANAGEMENT OF AN OIL WASTE TREATMENT PLANT

Author: MARKIC, Lautaro

Advisor: Ing. CAMPOS, Damián

Co-Advisor: Ing. ROJAS, Fabián

## Summary

This work presents the application of an asset management methodology in an oil waste treatment plant. Following the stages detailed in the methodology, the subsystems that make up the desorption furnace were diagnosed and identified. This equipment is paramount for the company's strategic objectives and operational needs. Asset prioritization allowed for the establishment of priorities by classifying the furnace subsystems according to their operational criticality. The maintenance plan was developed by adapting to the particular characteristics of the assets and their operational environment, leveraging the recommendations derived from the prioritization. A control and monitoring system was established using key performance indicators to evaluate the furnace's operational availability and reliability. The economic analysis validated the results obtained, demonstrating a significant reduction in the furnace maintenance costs after implementing the maintenance plan. The application of the proposed methodology not only improved the availability of the furnace but also provided the organization with a solid foundation for comprehensive asset management in the plant through the implementation of a Computerized Maintenance Management System (CMMS).

*Keywords: thermal desorption, waste treatment, asset management, maintenance.*

---

## Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>3</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>8</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
4.1. Descripción de los activos . . . . .	9
4.2. Introducción al Mantenimiento Industrial . . . . .	22
4.3. Definición de la Estrategia de Mantenimiento . . . . .	24
4.4. Indicadores de Mantenimiento . . . . .	26
4.5. Tipos de Mantenimiento . . . . .	27
4.5.1. Mantenimiento Preventivo . . . . .	28
4.5.2. Mantenimiento Predictivo . . . . .	30
4.5.3. Mantenimiento Proactivo . . . . .	30
4.6. Plan de Mantenimiento . . . . .	31
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>35</b>
<b>6. DESARROLLO</b>	<b>39</b>
6.1. Definición de la Estrategia de Gestión de Mantenimiento . . . . .	39
6.2. Jerarquización de Activos . . . . .	43
6.2.1. Revisión de la Hoja de Vida . . . . .	43
6.2.2. Análisis de Criticidad . . . . .	43
6.3. Análisis de Causa Raíz . . . . .	48
6.4. Definición del Plan de Mantenimiento . . . . .	56
6.5. Gestión de Mantenimiento . . . . .	62
6.6. Análisis Económico . . . . .	66
6.7. Análisis de los Resultados . . . . .	68
<b>7. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO</b>	<b>70</b>

---

<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>71</b>
<b>9. REFERENCIAS</b>	<b>72</b>

---



---

## Índice de Figuras

1.	Vista panorámica de la planta de tratamiento. . . . .	3
2.	<i>Layout</i> de la planta de tratamiento. . . . .	5
3.	Vista general del horno ( <a href="http://www.vulcandryingsystems.com/">www.vulcandryingsystems.com/</a> ). . . . .	9
4.	Horno instalado en la base de la Empresa. . . . .	10
5.	<i>Layout</i> general del horno. . . . .	11
6.	Taxonomía adoptada. . . . .	12
7.	Sistema de carga. . . . .	13
8.	Unidad de tratamiento primaria. . . . .	15
9.	Sistema de movimiento y enfriamiento de gases. . . . .	17
10.	Sistema de movimiento y enfriamiento de gases (continuación). . . . .	18
11.	Unidad de tratamiento secundaria. . . . .	19
12.	Sistema de medición de emisiones de gas. . . . .	19
13.	Sistema de descarga. . . . .	20
14.	Sistema de generación de nitrógeno. . . . .	21
15.	Cabina de control. . . . .	21
16.	Generador eléctrico. . . . .	22
17.	Modelo para la definición de la estrategia de mantenimiento. . . . .	25
18.	Curva de Davies o de la bañera. . . . .	28
19.	Modelo para la planificación y definición de las tareas de mantenimiento. . . . .	32
20.	Diagrama de Flujo Metodología. . . . .	35
21.	Organigrama del sector mantenimiento. . . . .	39
22.	Sectores asignados como depósito de insumos y repuestos. . . . .	40
23.	Criticidad operativa por subsistema. . . . .	47
24.	Rediseño estructura soporte <i>feed auger</i> . . . . .	52
25.	Mantenimiento inicial sistema alimentación de aire para quemadores. . . . .	53
26.	Rediseño sistema de enfriamiento módulo de control quemador Riello. . . . .	54
27.	Mantenimiento válvula reguladora de gas. . . . .	54
28.	Detalle motoreductor de <i>backup</i> . . . . .	55
29.	Aislación térmica cableado motor eléctrico tornillo <i>by-pass</i> . . . . .	55

---

30.	Carga del subsistema IDF y sus componentes. . . . .	64
31.	Adecuación de los sectores asignados para depósito de insumos y repuestos. . . . .	65
32.	Evolución de la Disponibilidad Global del horno Vulcan. . . . .	69

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2011, el debate energético en Argentina se ha mantenido constante en relación con las expectativas en cuanto al desarrollo del yacimiento no convencional Vaca Muerta, ubicado en el centro-norte de la provincia del Neuquén, uno de los campos de esquisto y gas más grandes del mundo según la Administración de Información de Energía de EEUU ([www.eia.gov](http://www.eia.gov)).

El desarrollo de Vaca Muerta supone un incremento en el número de operaciones de perforación, que requieren dentro de su complejidad: cientos de miles de toneladas de arena, millones de litros de agua (principalmente bombeada de los ríos Neuquén y Negro) y miles de litros de productos químicos. Los altos niveles de intervención generan grandes cantidades de desechos.

Los líquidos que genera la explotación contienen materiales presentes naturalmente en el reservorio y un porcentaje variable de aquellos utilizados para realizar el proceso de fractura hidráulica. Se generan miles de metros cúbicos de residuos líquidos por pozo, que son descartados indefinidamente en las profundidades mediante “pozos sumideros” (Werner et al., 2015). Por otro lado, los residuos sólidos, semisólidos y líquidos son tratados en plantas de tratamiento específicas.

Se consideran “residuos peligrosos” a todos aquellos que puedan causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general. La Ley N° 24.051 regula el tratamiento de los residuos peligrosos, en particular los de industria de la energía, desechos de aceite o de hidrocarburos ([www.infoleg.gob.ar](http://www.infoleg.gob.ar)). Dicha norma define que quien los genera es responsable, como dueño de estos, de todo daño que produzcan. La responsabilidad no desaparece por la transformación, especificación, desarrollo, evolución o tratamiento. A nivel provincial, el Decreto N° 2.263/15 regula los “residuos especiales” de la industria hidrocarburífera ([www.ambiente.neuquen.gov.ar](http://www.ambiente.neuquen.gov.ar)).

En este marco normativo, se les exige a las Empresas encargadas de operar las plantas de tratamiento de residuos, la implementación de un Sistema de Gestión Ambiental (SGA), tendiente a establecer las acciones necesarias en la protección ambiental y los mecanismos para su control y mejoramiento continuo. El SGA se integra a la actividad

---

general de la gestión Empresarial y contempla principalmente:

- El compromiso de la alta dirección, expresado en la política medioambiental.
- Los aspectos organizativos relacionados con el ambiente.
- Procedimientos de control operativo sobre los principales aspectos ambientales.
- Programa de mejora continua con objetivos concretos.

El mantenimiento como acción, desde el punto de vista ambiental, constituye un medio para prevenir impactos negativos, dado que asegura la confiabilidad de los equipos reduciendo el riesgo de ocurrencia de accidentes catastróficos (como incendios, explosiones, emisiones de sustancias tóxicas, derrames, entre otros), y a su vez, es una fuente de contaminación dado que en su ejecución se producen desechos peligrosos.

En este contexto, es el ingeniero quien tiene el relevante desafío de diseñar la visión estratégica del mantenimiento, estableciendo objetivos de corto y largo plazo. Los cambios necesarios para intentar disminuir la diferencia entre la situación actual y la deseada deben avanzar en el sentido de la mejora continua y ajustarse a la estrategia global de la Empresa. El desafío planteado es implementar mejoras respecto de la eficacia y eficiencia de las prácticas de gestión y definir el mantenimiento de manera integral, orientado hacia objetivos alcanzables.

En este sentido se destaca la Norma [ISO 55000 \(2015\)](#) ya que su ciclo es integral y se enfoca en la mejora continua, resultando ser una herramienta muy importante para todos aquellos profesionales que trabajan en la organización de mantenimiento, operaciones, ingeniería y quienes día a día se enfrentan a los problemas desafiantes de la gestión de operaciones y mantenimiento. Por lo expuesto, la gestión de mantenimiento necesita estar alineada con la estrategia de la Empresa debido a que de esto depende la concreción de los objetivos.

En base a esta filosofía de Mantenimiento, en el presente trabajo, se desarrolla el marco metodológico para la gestión integral de los activos que componen una planta de tratamiento de residuos petroleros, que actualmente opera en la ciudad de Añelo, Provincia del Neuquén. Dada su importancia como activo principal dentro del proceso productivo de la planta, se centra la atención en el horno de desorción térmica (modelo Vulcan).

---

## 2. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La propuesta de este proyecto integrador surge conforme a una visualización propia de la necesidad de renovar en general la manera en la que se realiza la gestión del mantenimiento actual y, además, actualizar el plan de mantenimiento del horno Vulcan. Para llegar a esta conclusión es que se necesita resumir la historia y el contexto de la organización, desde sus inicios.

La Empresa Comarsa, en un principio tenía su base de operaciones en Neuquén Capital, pero luego en el año 2017 comenzó el proceso de traslado de la planta y sus procesos activos a la localidad de Añelo, esto debido a que la cercanía de la planta con la población no permitió que la planta de Neuquén siguiera operativa. Partiendo de un proyecto sobre terreno virgen en Añelo, sin ningún tipo de desarrollo industrial y conforme a la implementación de las resoluciones del Decreto N° 2.263/15 de la Provincia de Neuquén, en 2017 dieron inicio al desarrollo de la Planta Industrial Añelo (ver Figura 1), la cual se la denomina Comarsa PIA.



Figura 1. Vista panorámica de la planta de tratamiento.

En esta nueva planta es donde actualmente se desarrollan los procesos que se pueden identificar en la Figura 2, los cuáles se describen en forma sucinta a continuación:

- Proceso de desorción térmica con recuperación de hidrocarburos: cuenta con un horno *Indirect Vulcan System* (TDU, por sus siglas en inglés). Este equipo permite el tratamiento de los recortes de perforación sometidos a calor indirecto en una atmósfera controlada (bajo el 5 % de O<sub>2</sub>), donde la fase líquida del recorte es transformada en fase gaseosa, para luego condensarla y separarla en agua (que se recupera para el proceso de enfriamiento) e hidrocarburo (que ingresa nuevamente a la cadena productiva). Este sistema le permitió a la Empresa mejorar su posición en la Pirámide de Jerarquía Ambiental de la cuenca neuquina.
- Proceso de destrucción térmica (incineración de residuos): cuenta con dos hornos pirolíticos Lareu e Incol de fabricantes nacionales, que se utilizan para la incineración de residuos sólidos contaminados y mantas oleofílicas de la industria petrolera. Ambos funcionan con la más moderna y eficiente tecnología en procesos de termodestrucción controlada. Como residuo de este proceso se obtienen cenizas que continúan siendo un residuo peligroso, por lo cual se le realiza una disposición final en un relleno de seguridad externo a la Empresa.
- Proceso fisicoquímico de fluidos y recuperación de hidrocarburos: proceso con capacidad operativa integral para el tratamiento de aguas contaminadas, reutilizando la totalidad de las aguas residuales en otros procesos industriales de la Empresa, logrando un ciclo completo e integral de tratamiento, y maximizando el cuidado ambiental.

De los tres procesos principales descriptos anteriormente, el desarrollo del presente trabajo se centra en el proceso de desorción térmica con recuperación de hidrocarburos, particularmente en el análisis del horno Vulcan, que se encuentra ubicado en el extremo SE del predio de la planta (ver Figura 2).

La Empresa adquirió el horno Vulcan a un proveedor de Estados Unidos en el año 2010. Éste quedó almacenado por varios años y fue ensamblado e instalado recién en el año 2018, en la nueva planta de Añelo. Su montaje y puesta a punto no fue fácil, requirió de varios meses de arduo trabajo para poder dejar el horno montado y en buenas condiciones para la operación.

---



en marcha, las temperaturas aproximadas, el tiempo de residencia, el enfriamiento, la velocidad de los tornillos, entre otros. Sin embargo, estas variables continuaban ajustándose dependiendo de la composición del material a tratar, que incluía recortes de perforación con diferentes valores de porcentaje de hidrocarburos (HC) y agua (H<sub>2</sub>O).

A lo largo de los primeros meses de operación, surgieron diversos problemas que llevaron a los operadores a realizar ajustes en los parámetros operativos mencionados mediante un proceso de prueba y error. Este proceso implicaba enfrentarse a temperaturas elevadas, eventos de incendios, velocidades altas en las turbinas o sopladores, material sin desorber a la salida del horno, así como piedras y otros elementos que interrumpían el proceso, entre otros desafíos. Además, se encontraron componentes que no cumplían adecuadamente su función, otros de mala calidad, y material a ser tratado que no cumplía con las especificaciones para las cuales fue diseñado el horno. Estas dificultades resultaron en un deterioro más rápido de lo normal para este tipo de equipos, que son complejos y de gran envergadura. Al momento de iniciar este trabajo, después de más de cuatro años de operación, muchos de sus activos principales estaban operando en condiciones subóptimas, y algunos componentes de menor importancia se encontraban averiados.

También es importante señalar que, dado que el horno fue fabricado en Estados Unidos, muchos de sus componentes deben ser importados, lo que conlleva dificultades asociadas al ingreso al país. Como resultado, algunos de estos componentes han sido reemplazados por equivalentes disponibles en proveedores locales, mientras que otros han sido objeto de modificaciones o adaptaciones para facilitar su sustitución.

El mantenimiento actual del horno se centra principalmente en el mantenimiento correctivo, abordando las fallas a medida que surgen. En cuanto al mantenimiento preventivo, se llevan a cabo rutinas de engrase con diferentes frecuencias para cada equipo específico (entre 3, 10 y 25 días). Además, al principio de cada mes, se detiene la operación del horno durante aproximadamente tres o cuatro días, dependiendo del alcance de las tareas programadas, para realizar el resto del mantenimiento preventivo. Estas tareas incluyen inspecciones, limpieza y reemplazo de componentes según su estado. Durante este período también se implementan mejoras o modificaciones planificadas previamente. Aunque constantemente se busca mejorar la operación del equipo o aumentar su disponibilidad total, en ocasiones los cuatro días que el equipo permanece inactivo no son suficientes y

---



algunas mejoras se posponen.

Durante el año 2022, se observó un aumento significativo en la cantidad de horas de uso de muchos de los equipos que integran el horno, lo que resultó en una mayor frecuencia de averías y fallos. El mantenimiento correctivo a menudo se lleva a cabo con los recursos disponibles en el momento, ya que la operación del horno requiere funcionamiento las 24 horas del día. Esto significa que el horno debe permanecer inactivo el menor tiempo posible, lo que a su vez puede resultar en que las tareas de mantenimiento no se realicen de manera óptima en todas las ocasiones. Además, en algunas ocasiones, el equipo de mantenimiento para toda la planta no es suficiente para cubrir la demanda de tareas que deben llevarse a cabo simultáneamente.

También es importante mencionar que no se mantienen registros exhaustivos de las tareas realizadas en cada equipo. Únicamente se cuenta con un reporte diario en el que el supervisor de mantenimiento describe de forma sucinta las actividades llevadas a cabo por los oficiales. Además, no se registran indicadores de mantenimiento, lo que dificulta evaluar el desempeño del área y tener una idea clara de su eficacia.

Considerando todo lo mencionado anteriormente y tras analizar el plan de mantenimiento actual, el cual solo ofrece descripciones generales de las tareas a realizar durante la parada programada, se ha identificado la necesidad de una renovación del plan. Este nuevo enfoque deberá incluir una planificación más detallada y realista sobre cómo se intervendrá el horno y qué mantenimiento se llevará a cabo en cada uno de sus activos. El objetivo principal será prolongar la vida útil del equipo y aumentar su disponibilidad al reducir la frecuencia de las fallas.

---

### **3. OBJETIVOS**

#### **Objetivo General**

Desarrollar herramientas específicas que permitan aplicar y ampliar los conocimientos adquiridos durante la carrera de grado, integrando la teoría con la práctica profesional en la temática de Mantenimiento Industrial.

#### **Objetivos Específicos**

- Realizar un relevamiento de los equipos y presentar una hoja de vida con datos técnicos y descripción de la función que cumplen los mismos.
  - Realizar un análisis de la gestión de mantenimiento de los componentes del horno de desorción térmica.
  - Realizar un análisis de la criticidad y la jerarquización de los equipos con el fin de aplicar mejoras tendientes a aumentar la disponibilidad operacional del horno.
  - Revisar y actualizar el plan de mantenimiento del horno.
-

## 4. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los fundamentos teóricos considerados esenciales para abordar el proyecto, enfocándose en el tipo de equipos que conforman el sistema bajo estudio y en los principios del Mantenimiento Industrial.

### 4.1. Descripción de los activos

La desorción térmica es un proceso que elimina sustancias químicas dañinas del suelo y otros materiales, como lodo y sedimentos, mediante el uso de calor para convertirlas en gases. Estos gases se recogen utilizando un equipo especial de condensación, separando así el polvo y las sustancias químicas dañinas para su eliminación segura. Es importante destacar que la desorción térmica no es lo mismo que la incineración, ya que en este último proceso se destruyen las sustancias químicas, incluidas las cadenas orgánicas del suelo, mientras que la desorción térmica preserva estas cadenas orgánicas.

Con este propósito, la Empresa ha instalado un horno desarrollado y fabricado por Vulcan, con características similares al que se muestra en la Figura 3. Este equipo se emplea para el tratamiento y la remediación del suelo contaminado con hidrocarburos. En la Figura 4 se puede observar una vista del horno instalado en las instalaciones de la Empresa.

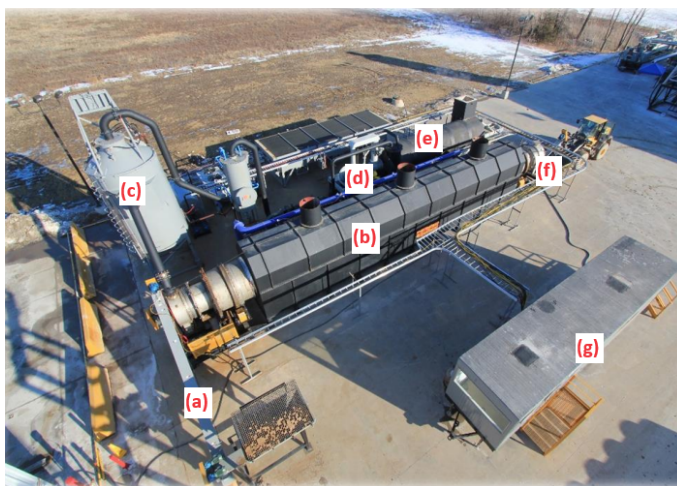


Figura 3. Vista general del horno ([www.vulcandryingystems.com/](http://www.vulcandryingystems.com/)).

Referencias: (a) Sistema de carga, (b) Unidad de tratamiento primaria, (c) Sistema de enfriamiento de gases, (d) Sistema de movimiento de gases, (e) Unidad de tratamiento secundario, (f) Sistema de descarga, (g) Cabina de control.



Figura 4. Horno instalado en la base de la Empresa.

El objetivo principal del tratamiento es separar los hidrocarburos del suelo mediante su vaporización. Una vez vaporizados, los hidrocarburos más pesados se condensan al ser enfriados con agua y se recuperan en un tanque. Aquellos hidrocarburos que no se recuperan en este proceso se queman antes de que los gases resultantes, junto con el aire caliente, sean finalmente liberados a la atmósfera. Para que el suelo tratado se considere seguro para el medio ambiente, debe contener menos del 1 % de hidrocarburos en masa.

La vaporización se logra mediante el lento calentamiento del suelo de manera indirecta, utilizando ocho quemadores distribuidos a lo largo de la cámara rotativa. A medida que la cámara gira, el material avanza gradualmente en su interior. Dentro de los materiales que se pueden tratar se incluyen:

- Recortes de perforación ó *cutting*.
- Lodos de fondo de tanque.
- Suelos contaminados por derrames de hidrocarburos o aceites.

En la Figura 5 se muestra un esquema general del horno, con la identificación de los principales niveles taxonómicos. Cada nivel ha sido asignado con una codificación específica para su referencia en el plan de mantenimiento. La taxonomía del horno se define mediante una clasificación que consta de tres niveles: sistemas, subsistemas y componentes, como se ilustra en la Figura 6.



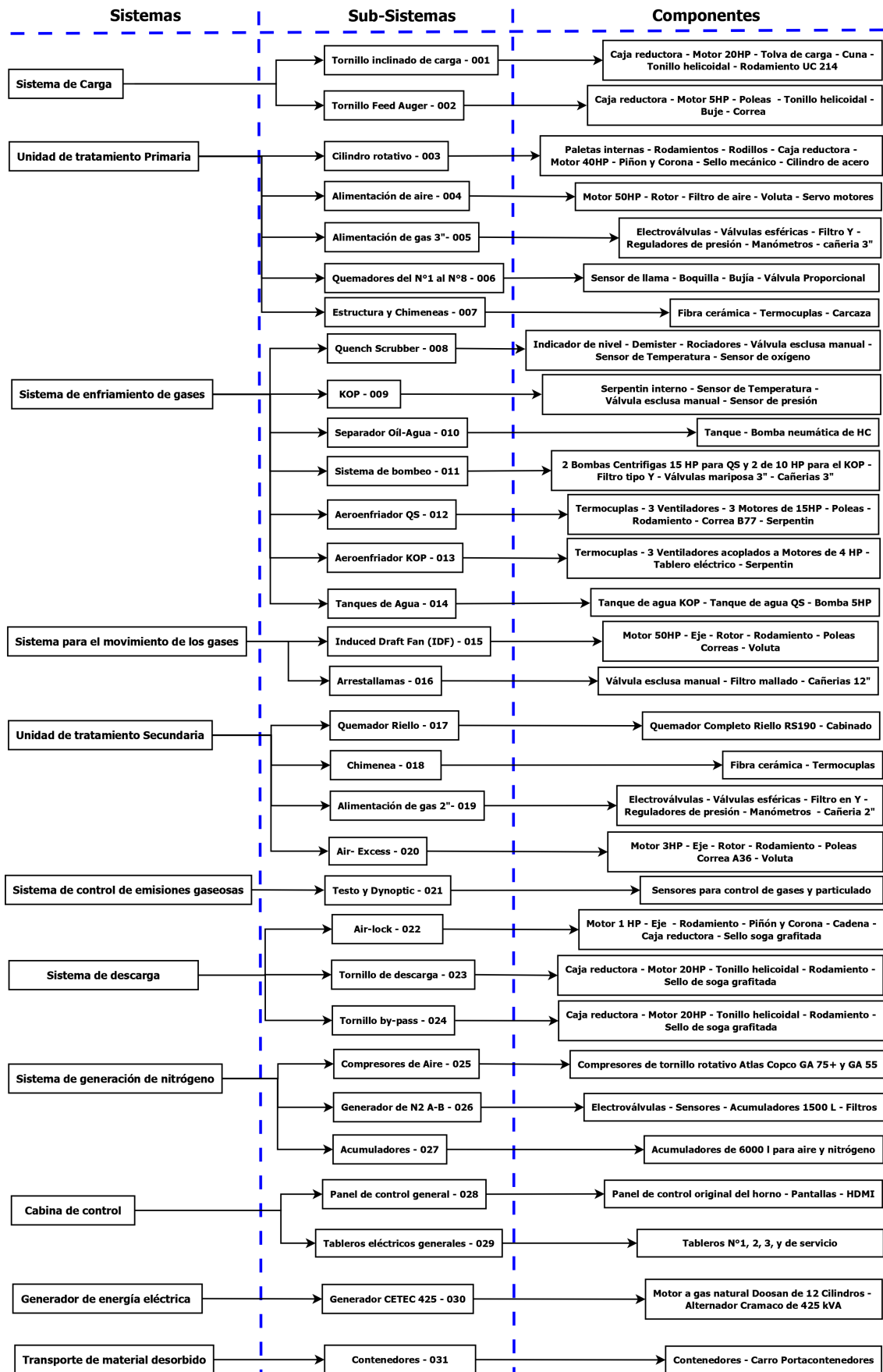


Figura 6. Taxonomía adoptada.

A continuación, se describe el funcionamiento de cada sistema del horno, así como las principales funciones de los subsistemas que los componen, haciendo referencia a los números de identificación [ID] según la taxonomía adoptada en la Figura 6.

### Sistema de carga:

La Figura 7 ilustra el sistema de carga, proporcionando detalles sobre los subsistemas principales.



(a) Vista general.



(b) Tornillo helicoidal inclinado.



(c) Tornillo horizontal (*feed auger*).



(d) Detalle *feed auger*.

Figura 7. Sistema de carga.

La primera parte del sistema de carga consta del tornillo de carga inclinado [001], el cual transporta el material desde la tolva de entrada hasta la tolva de salida a una mayor altura. La tolva de entrada se carga gradualmente mediante una pala de retroexcavadora. El material transportado por el tornillo helicoidal inclinado se deposita en la tolva superior

y luego cae por gravedad hasta el siguiente componente, el tornillo de carga horizontal o *feed auger* [002], ubicado dentro de la cámara rotativa. Para evitar la entrada de oxígeno y prevenir reacciones no deseadas con el hidrocarburo en vaporización, se sella la entrada del cilindro rotativo de forma que el material entre de manera hermética.

### **Unidad de tratamiento primaria:**

Una vez que el material ingresa a la cámara rotativa [003] (ver Figura 8a), comienza a calentarse de manera indirecta. La parte exterior de este cilindro, equipado con paletas interiores, está expuesta a la acción de ocho quemadores [006] (ver Figura 8b), distribuidos a lo largo del mismo y funcionando con gas natural. Se mantiene una atmósfera de oxígeno deficiente dentro de la cámara para prevenir el autoencendido del hidrocarburo vaporizado.

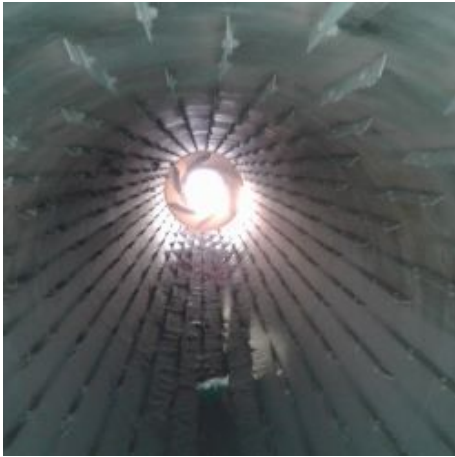
El material avanza por el cilindro en forma de cascada debido a la ligera inclinación de la cámara y al efecto generado por las paletas mientras el cilindro rota lentamente, aproximadamente a 5 rpm. Después de un tiempo de residencia de alrededor de 40 minutos, el suelo tratado sale por el otro extremo del cilindro, pasando primero por una válvula rotativa (*air-lock*) [022] (ver Figura 8c), la cual impide el ingreso de aire.

El aire para los ocho quemadores se suministra a través de una tubería de seis pulgadas por un alimentador de aire (*air combustion*) [004] (ver Figura 8d), mientras que el gas se abastece mediante una tubería de tres pulgadas desde la planta de gas ubicada en otro sector. Los gases calientes resultantes de la combustión circulan entre el hogar del horno y el cilindro en rotación, saliendo por la parte superior, donde se encuentran tres chimeneas [007].

El hidrocarburo vaporizado en el cilindro es succionado contra corriente del material hacia una tubería conectada al condensador vertical (*quench scrubber*) [008] (ver Figura 8e). Esta succión es generada por el ventilador de inducción (*induced draft fan*) [015] (ver Figura 8f), ubicado más adelante en el circuito de gases. En la tubería que conecta el cilindro con el *quench scrubber*, se encuentra un sensor de oxígeno que mide la cantidad de oxígeno en la corriente. Dependiendo de la medición, se inyecta más o menos nitrógeno proveniente de la planta de nitrógeno [026] al interior de la cámara rotativa. Los niveles de oxígeno no deben exceder aproximadamente el 5 %.

---





(a) Cámara rotativa.



(b) Quemadores de gas.



(c) Válvula *air lock*.



(d) Alimentador de aire.



(e) *Quench scrubber*.



(f) *Induced draft fan*.

Figura 8. Unidad de tratamiento primaria.

**Sistema de movimiento y enfriamiento de gases:**

Al vaporizarse la mezcla de hidrocarburos, los gases resultantes circulan por la parte delantera de la cámara rotativa hacia el condensador vertical (*quench scrubber*). En este equipo, se realiza el condensado de los gases mediante un enfriamiento de contacto directo con agua, llevado a cabo por cuatro aspersores. Además de condensar los gases, este equipo también remueve parte del material particulado presente en la corriente gaseosa.

El condensador cuenta con un *demister* en la parte superior, cuya función es ayudar a separar las finas gotas de líquido de la corriente gaseosa, permitiendo que solo los vapores de hidrocarburos no condensados pasen. El condensado de mezcla de hidrocarburos y agua se recoge en la parte inferior del condensador y se dirige a un tanque separador [010] (ver Figura 9a). Este tanque tiene como función separar el agua del hidrocarburo debido a sus diferencias de densidad.

El hidrocarburo se succiona de la parte superior del tanque y se bombea hacia otro depósito mediante una bomba neumática. Por otro lado, el agua se extrae del separador y se dirige hacia un tanque de almacenamiento de agua, que forma parte del circuito abierto del condensador. Desde este tanque, las bombas centrífugas [011] bombean el agua hacia la parte superior del condensador, donde la corriente es rociada nuevamente por los aspersores, completando así el circuito abierto de enfriamiento (Figura 9b).

Antes de volver a ingresar al condensador, el agua debe ser enfriada. Para ello, pasa a través de un aroenfriador de corriente forzada [012], equipado con tres ventiladores (ver Figura 9c).

Dado que parte del agua se evapora durante el proceso de transferencia de masa, es necesario reponerla. Por este motivo, la instalación cuenta con un tanque de reserva de agua adicional [114], equipado con su correspondiente bomba centrífuga (ver Figura 9d). El control de este proceso se realiza manualmente por los operarios, quienes encienden la bomba cuando el nivel de agua alcanza el mínimo requerido.

Los gases no condensados que provienen de la parte superior del *quench scrubber* son dirigidos hacia otro condensador denominado *Knock Out Pot* [009] (ver Figura 10a). Este condensador de menor tamaño cuenta con su propio tanque de almacenamiento de agua, un aroenfriador de corriente inducida [013] equipado con tres ventiladores y un serpentín

---

en su interior, ya que opera mediante contacto indirecto (ver Figura 10b). El agua circula en un circuito cerrado desde el tanque hacia el serpentín mediante bombas centrífugas, condensando los gases debido a la temperatura más baja mantenida en el *Knock Out Pot* en comparación con el *quench scrubber*.

Posteriormente, los gases restantes que no pudieron ser condensados son dirigidos a través del *induced draft fan* mencionado anteriormente, el cual genera una succión suficiente para mover los gases a través de todo el sistema. Luego, esta corriente pasa por los arrestallamas [016] para evitar que las llamas provenientes de la cámara de combustión secundaria retrocedan por la tubería y lleguen al *induced draft fan*.



(a) Tanque separador.



(b) Sistema de bombas.



(c) Aeroenfriador del *quench scrubber*.



(d) Tanque de reserva.

Figura 9. Sistema de movimiento y enfriamiento de gases.

(a) *Knock Out Pot*.(b) Aeroenfriador del *Knock Out Pot*.

Figura 10. Sistema de movimiento y enfriamiento de gases (continuación).

### Unidad de tratamiento secundaria:

En la unidad de tratamiento secundaria, se completa la combustión de la mezcla de hidrocarburos no condensada utilizando un único quemador específico [017] (ver Figura 11a), proporcionado por la firma Riello ([www.riello.com](http://www.riello.com)). Este quemador tiene como objetivo generar la llama necesaria para la combustión dentro de la cámara secundaria, con un tiempo de residencia de aproximadamente dos segundos. Además, se utiliza un ventilador llamado *air-excess* [020] para suministrar la cantidad de aire necesaria para una combustión completa.

Los gases de combustión resultantes son expulsados a través de la chimenea [018], mientras se someten a análisis para garantizar que cumplan con los estándares ambientales requeridos (ver Figura 11b).

### Sistema de medición de emisiones de gas:

El horno está equipado con un sistema de instrumentación de alta tecnología [021] diseñado para el monitoreo continuo de la opacidad, el polvo, las partículas y la composición de la mezcla de gases, incluyendo  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , entre otros. El sensor óptico de partículas, suministrado por la firma DynOptic ([www.dynoptic.com/](http://www.dynoptic.com/)), se coloca en la salida de la chimenea de la unidad de tratamiento secundaria (ver Figura 12).

Además, en el tablero de control se encuentra el equipo específico que realiza mediciones continuas de la calidad de los gases liberados a la atmósfera ([www.testo.com](http://www.testo.com)).

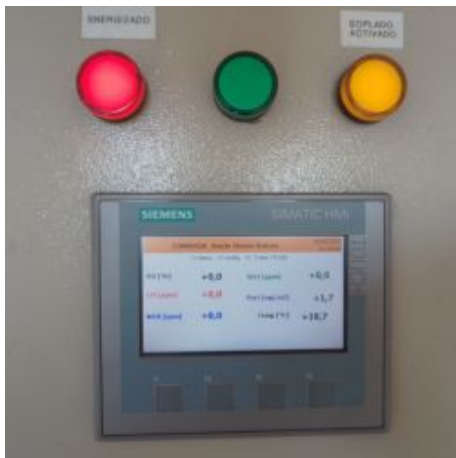


(a) Quemador Riello.



(b) Chimenea.

Figura 11. Unidad de tratamiento secundaria.



(a) Tablero de control.



(b) Medidor óptico de particulado.

Figura 12. Sistema de medición de emisiones de gas.

### Sistema de descarga:

Una vez extraído del cilindro rotativo, el material tratado pasa por la válvula *air-lock* y cae por gravedad hacia el tornillo de descarga [023], que tiene una inclinación específica para elevar y transportar el material hasta un contenedor [031] (ver Figura 13). Este suelo, que tiene una granulometría muy fina, genera polvo en suspensión.

El sistema también incluye otro tornillo de *by-pass* [024] al final del tornillo de descarga, que deposita el material tratado en un contenedor cerrado. Cuando los contenedores alcanzan su capacidad máxima, se reemplazan y se transportan mediante camiones porta-contenedores a una zona de deposición temporal.

Es importante destacar que la cuna del tornillo de descarga está equipada con un sistema de seguridad que rocía agua en caso de que el material que sale del cilindro rotativo se autoencienda.



(a) Tornillo de descarga.



(b) Contenedor de descarga.

Figura 13. Sistema de descarga.

### **Sistema de generación de nitrógeno:**

El horno cuenta con una planta de producción de nitrógeno, proporcionada por Atlas Copco ([www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com)), como parte de las medidas de seguridad implementadas en caso de detectarse niveles de oxígeno por encima del valor de seguridad dentro del cilindro. En tales situaciones, el nitrógeno se inyecta automáticamente a través de la tapa final del cilindro, o bien de forma manual si es necesario.

La planta de nitrógeno se encuentra ubicada en un recinto construido con una estructura metálica para proteger los equipos de las inclemencias del tiempo. Para su funcionamiento, la planta requiere un caudal considerable de aire comprimido, suministrado por los compresores [025]. Tanto el aire comprimido como el nitrógeno están almacenados en acumuladores [027] con una capacidad de hasta 6000 litros (ver Figura 14).



(a) Acumuladores.



(b) Compresor a tornillo.

Figura 14. Sistema de generación de nitrógeno.

**Cabina de control:**

La cabina de control alberga los tableros eléctricos [029] y el panel de control [028], desde donde se supervisa y controla la operación del horno. Esta cabina no solo los protege del medio ambiente, sino que también sirve como espacio principal para el personal de operaciones, que pasa la mayor parte del tiempo allí (ver Figura 15).



(a) Tableros eléctricos.



(b) Panel de control.

Figura 15. Cabina de control.

### **Generador de energía eléctrica:**

Dado que la planta no cuenta con suministro de energía eléctrica de la red, se utiliza un generador a gas natural [030] para alimentar todos los sistemas. En la Figura 16 se presenta el generador instalado (modelo GV222TI de 425 kVA), suministrado por Cetec Sudamericana ([www.cetecsudamericana.com.ar](http://www.cetecsudamericana.com.ar)).



Figura 16. Generador eléctrico.

### **Transporte de material desorbido:**

Una vez retirados los contenedores del sistema de descarga, se colocan en una playa de descarga para permitir el enfriamiento final del material desorbido. Posteriormente, el material tratado se descarga en pilas ubicadas al aire libre, donde espera su análisis por parte de la Autoridad de Aplicación ([www.ambiente.neuquen.gov.ar](http://www.ambiente.neuquen.gov.ar)).

## **4.2. Introducción al Mantenimiento Industrial**

Si bien la ejecución de actividades de mantenimiento es fundamentalmente un proceso operativo, la gestión del mantenimiento se integra dentro de la dirección de operaciones. Su enfoque se centra en la optimización de recursos, con el propósito de preservar y/o restaurar los equipos de producción a condiciones que les permitan cumplir con su función requerida durante un período determinado de tiempo (Márquez et al., 2004).

El mantenimiento industrial se define, habitualmente, como el conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento.



Además, la gestión del mantenimiento dentro de un proceso es más amplia, ya que engloba todas las actividades necesarias para alcanzar los objetivos de mantenimiento. Esto implica la formulación de estrategias, la asignación eficiente de recursos y responsabilidades al personal. Una gestión adecuada facilita la implementación de estas estrategias en la operación diaria, mediante la planificación, programación y control de las actividades de mantenimiento para su ejecución y mejora continua. Todo esto se hace teniendo en cuenta los aspectos económicos relevantes para la organización. Hoy en día, la gestión del mantenimiento se apoya en una variedad de métodos y técnicas específicas para el desarrollo del plan de mantenimiento.

Los cuatro aspectos más importantes a tener en cuenta y en los que se basará el desarrollo del nuevo plan de mantenimiento, que se llevará a cabo durante este trabajo, son los siguientes:

1. Determinación de objetivos o prioridades de mantenimiento en función de las necesidades de la organización.
2. Determinación de estrategias y responsabilidades para cumplir con los objetivos planteados.
3. Implementación a través de la planificación, control y supervisión del mantenimiento de los equipos.
4. Mejora continua de los métodos, incluyendo aspectos económicos en la organización.

Además, es crucial destacar que una correcta gestión del mantenimiento está condicionada por su eficacia y eficiencia:

- **Eficacia:** capacidad para lograr los objetivos y metas programadas con los recursos disponibles en un tiempo predeterminado. En el mantenimiento, la eficacia de la gestión puede entenderse como la satisfacción que la organización experimenta con la capacidad y condición de sus activos ([Wireman, 2001](#)), así como con la mejora general que se experimenta al tener la capacidad de producción disponible cuando se necesita ([Palmer, 2005](#)).
-

- **Eficiencia:** acción o producción con el mínimo esfuerzo, minimizando derroches o desperdicios de recursos, así como los gastos asociados a los mismos. Mejoras en esta área del proceso de gestión permitirán minimizar los costos directos de mantenimiento, es decir, realizar un servicio de mantenimiento de igual o mejor calidad a costos más competitivos.

En primer lugar, se busca una gestión que sea eficaz y luego eficiente. La prioridad del sector de mantenimiento es asegurar que los equipos sigan operando cuando la organización lo requiera, o dicho de otro modo, que los equipos tengan una alta disponibilidad. La búsqueda de la eficiencia se realiza en un plazo mayor de tiempo a medida que se van introduciendo mejoras y modificaciones de manera continua en el plan. El proceso de gestión de mantenimiento se puede dividir en dos partes principales:

1. La definición de la estrategia de mantenimiento: esta primera parte requiere la definición de los objetivos de mantenimiento como *input* del mismo. Estos objetivos dimanar directamente del plan de negocio de la organización en cuestión. Diseñar estrategias de mantenimiento que estén alineadas con los planes de negocio es un aspecto clave y condiciona la consecución de dichos objetivos. Esto, en definitiva, deriva en un plan de mantenimiento específico que a largo plazo lleve a cumplir con las metas propuestas.
2. La implementación de la estrategia de mantenimiento: la segunda parte del proceso tiene que ver con la habilidad para asegurar niveles adecuados de formación del personal, preparación de los trabajos/tareas, utilización adecuada de las horas hombre disponibles, selección de las herramientas correctas y la realización de los programas de mantenimiento en tiempo y forma. Todo lo anterior procurando la mejora continua en dicho plan y en los activos que conforman los procesos productivos.

#### **4.3. Definición de la Estrategia de Mantenimiento**

Para definir la estrategia de mantenimiento, puede emplearse el modelo presentado en la Figura 17, que tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Partiendo de los objetivos corporativos del negocio y políticas de mantenimiento al más alto nivel. Estos objetivos pueden incluir valores estimados y realistas para
-

las siguientes variables: disponibilidad de equipos, confiabilidad, seguridad, riesgo, presupuesto de mantenimiento, etc.

- También se establecen objetivos legales, financieros y técnicos que sean realistas con la situación actual de la organización.
- Determinación del desempeño o rendimiento actual de los equipos e instalaciones productivas.
- Determinación de los indicadores clave a considerar para la evaluación del rendimiento de las instalaciones (KPIs, por sus siglas en inglés).

Un aspecto importante de la gestión es evaluar su desempeño a lo largo del tiempo. Para lograrlo, es fundamental utilizar los indicadores adecuados para cada organización. Los indicadores de rendimiento del mantenimiento deben definirse desde el inicio durante el proceso de establecimiento de la estrategia de mantenimiento. Se pueden seleccionar diversos tipos de indicadores, los cuales pueden estar relacionados con los costos, los tiempos, aspectos técnicos u otros considerados importantes. Estos indicadores ayudan a evaluar la gestión en el mediano y largo plazo.

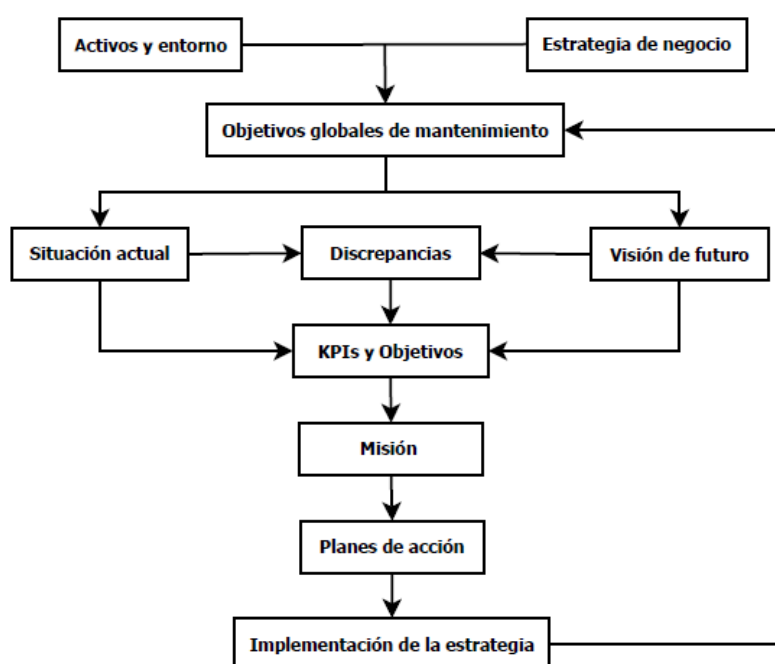


Figura 17. Modelo para la definición de la estrategia de mantenimiento.

#### **4.4. Indicadores de Mantenimiento**

Son medidas relacionadas con equipos específicos o conjuntos de equipos, las cuales pueden incluir algunas de las siguientes:

- Disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.
- Tiempo de inactividad o tiempo en que el activo está detenido.
- Tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) en un activo específico o conjunto.
- Tiempo medio para la reparación de las fallas (MTTR, por sus siglas en inglés) en un activo específico o conjunto.
- Costo de mantenimiento planificado y no planificado.

Por otro lado, la medición relacionada con la gestión general del mantenimiento puede consistir en:

- Cantidad de tareas planificadas realizadas en comparación con las no planificadas.
- Tareas planificadas que no fueron completadas en el tiempo o fecha establecida.
- Disponibilidad de recursos y repuestos al momento de realizar las tareas.
- Mano de obra empleada y su capacidad técnica.

Es importante mencionar, antes de pasar a la implementación de la estrategia de mantenimiento, que una correcta gestión debe lograr alinear las actividades de acuerdo con la estrategia definida en los tres niveles de actividad en la organización:

- Nivel 1: Estratégico o de dirección.
  - Nivel 2: Táctico.
  - Nivel 3: Operativo.
-

Después de haber transformado las prioridades del negocio en prioridades de mantenimiento, los gerentes o jefes de mantenimiento construirán sus estrategias a corto y mediano plazo para abordar potenciales puntos débiles en el mantenimiento de los equipos, de acuerdo con estos objetivos. Esto resultará en un plan de mantenimiento genérico en la empresa que luego se deberá desarrollar. El desarrollo de este plan supondrá, como punto fundamental, concretar una serie de políticas a llevar a cabo para los activos considerados críticos.

Por otro lado, las acciones a nivel táctico deben determinar la correcta asignación de los recursos de mantenimiento disponibles (habilidades, materiales, equipos de pruebas y medida, etc.). Como resultado, se materializará un programa detallado con todas las tareas a desarrollar, su frecuencia y los recursos asignados correspondientes para la realización de las mismas. Estas tareas serán específicas para cada activo, en un lugar idóneo y con un tiempo de comienzo y ejecución predefinido. Todas estas asignaciones se ajustarán en un proceso de mejora continua a medida que pase el tiempo.

Las acciones a nivel operativo deben asegurar que las tareas de mantenimiento se completen adecuadamente por los técnicos seleccionados, en el tiempo acordado, siguiendo los procedimientos y utilizando las herramientas adecuadas. El trabajo se realizará y se recogerán los datos correspondientes para ser introducidos en el sistema de información para la gestión. Los procedimientos a nivel operativo serán necesarios para las actividades correctivas, predictivas, preventivas y de diagnóstico de fallos.

Para poder tener en cuenta e incluir todos los aspectos mencionados anteriormente en los tres niveles de una organización y poder llevar a cabo una correcta gestión, se debe aplicar un modelo de mantenimiento, el cual corresponde a la parte dos de la gestión (implementación de la estrategia de mantenimiento).

#### **4.5. Tipos de Mantenimiento**

Un modelo de mantenimiento incluye diferentes tipos de mantenimiento en proporciones que varían para cada tipo de activo. Por ejemplo, un equipo de mayor importancia para el proceso productivo puede requerir mantenimiento predictivo para prevenir posibles fallas, mientras que otro de menor relevancia solo precisará mantenimiento correctivo cuando la falla ya se haya manifestado. Para determinar esto, se jerarquizan los activos, y

---

para ello se realiza un análisis de criticidad.

#### 4.5.1. Mantenimiento Preventivo

Consiste en reparar un equipo o reemplazar sus componentes en forma periódica, sin importar su estado o condición. En otras palabras, las tareas de mantenimiento se basan en lapsos de tiempo de operación. La Figura 18 muestra un ejemplo de la vida estadística de un sistema, representada comúnmente por la conocida Curva de Davies o de la bañera.

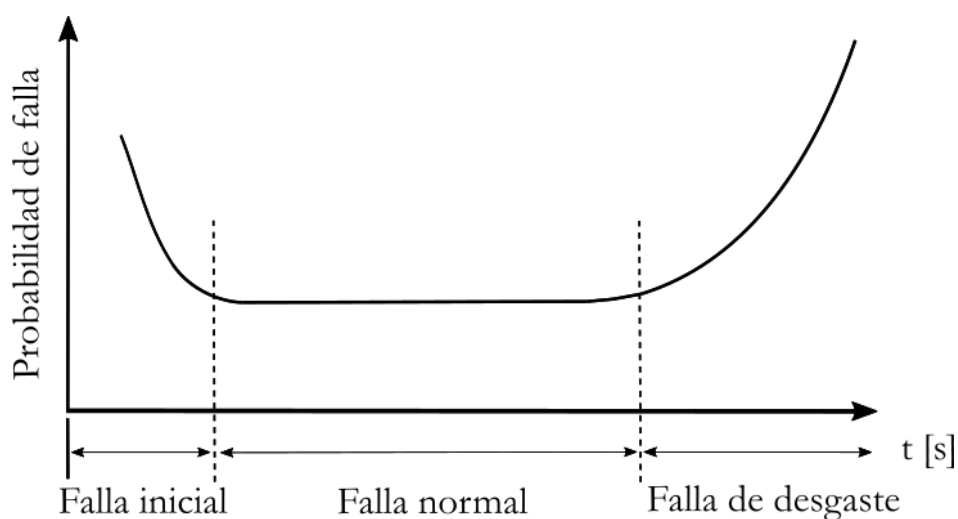


Figura 18. Curva de Davies o de la bañera.

El Tiempo Medio a la Falla (MTTF, por sus siglas en inglés), indica que una máquina nueva tiene una alta probabilidad de falla durante las primeras semanas de operación, debido a problemas de manufactura o de instalación. Después de este período inicial, la probabilidad de falla es relativamente baja por un período de tiempo extendido. Una vez cumplido el período de vida normal de la máquina, la probabilidad de falla se incrementa rápidamente a medida que transcurre el tiempo. En la gestión de mantenimiento preventivo, las reparaciones se programan en base a la estadística del MTTF.

La implementación del mantenimiento preventivo se realiza de diferentes maneras. Algunos programas son más limitados, y consisten en lubricación y ajustes menores. Otros programas de mantenimiento preventivo más completos incluyen lubricación, reparaciones programadas, ajustes y *overhauls*. Todos los programas de gestión de mantenimiento preventivos utilizan la premisa de programar las intervenciones a intervalos predeterminados de tiempo, de acuerdo a criterios preestablecidos, tendientes a reducir la probabilidad

de falla. Dichos programas asumen que las máquinas o equipos sufrirán degradación típica con el paso del tiempo.

Este enfoque presenta un inconveniente, ya que el modo de operación y sus distintas variables afectan directamente la vida operativa normal de la maquinaria. Debido a esto, el Tiempo Medio entre Fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) no será el mismo para dos equipos idénticos, operando bajo condiciones diferentes. El uso de MTBF estadísticos para programar las tareas de mantenimiento puede generar reparaciones innecesarias o fallas catastróficas, lo que da como resultado equipos reemplazados sin ser necesario o equipos que fallan y generan pérdidas de producción, situaciones en ambos casos indeseables. Es por ello que [Pistarelli \(2012\)](#) plantea que para aplicar un modelo de gestión de mantenimiento preventivo eficaz, es necesario que se cumplan algunas condiciones mínimas:

- Los ítems a intervenir tienen un período de vida útil conocido a partir del cual se presenta un rápido crecimiento del MTBF.
- La vida útil para todos los componentes iguales es muy parecida (baja dispersión).
- La mayoría de los elementos probados se mantienen sin fallas durante su vida útil.
- La intervención reestablece totalmente la condición básica del ítem.

Los objetivos fundamentales del mantenimiento preventivo son:

- Aumentar la disponibilidad de los equipos a través de la disminución de detenciones no programadas.
  - Minimizar las averías imprevistas de los equipos.
  - Mejorar el aprovechamiento de mano de obra por medio de la programación de tareas.
  - Mejorar la calidad de productos y servicios.
  - Disminuir el riesgo para el personal en las operaciones de producción y mantenimiento.
  - Minimizar los gastos debido a reparaciones de emergencia.
-

#### **4.5.2. Mantenimiento Predictivo**

La premisa del mantenimiento predictivo es el monitoreo regular de la condición de los equipos para asegurar el máximo intervalo de tiempo entre reparaciones, y minimizar el número y el costo de paradas inesperadas por fallas en los equipos. Se puede decir que el mantenimiento predictivo es una filosofía que, en pocas palabras, utiliza las condiciones operativas reales de los equipos y sistemas de una planta para optimizar la operación total. Un programa de gestión de mantenimiento predictivo completo, utiliza una combinación de las herramientas más rentables de monitoreo de condición (como son, por ejemplo: medición de vibraciones, termografía, tribología, ultrasonido, etc.), para conocer la condición operativa real de los equipos o sistemas de la planta, y basado en esa información real, programa todas las actividades de mantenimiento según sea necesario.

En vez de basarse en estadísticas de vida media de equipos de la industria o de la propia planta para programar las actividades de mantenimiento, el mantenimiento predictivo usa el monitoreo directo de la condición de los equipos para determinar el MTTF real, o la pérdida de eficiencia para cada tren de máquinas y sistema en la planta, con el objetivo de no permitir que la falla sintomática irreversible evolucione en una falla funcional. Esto proporciona la capacidad para optimizar la disponibilidad de la maquinaria y reducir en gran medida los costos de mantenimiento ([Moblely, 2004](#)).

Un programa de mantenimiento predictivo puede minimizar las paradas no programadas de todos los equipos mecánicos en la planta, y asegurar que las reparaciones mecánicas se realicen en condición aceptable. Además, puede identificar problemas en máquinas antes de que se conviertan en problemas serios, permitiendo predecir el tiempo hasta la aparición de la falla funcional. La mayoría de los problemas mecánicos pueden minimizarse si son identificados y reparados a tiempo.

#### **4.5.3. Mantenimiento Proactivo**

Surge como alternativa para anticiparse a una falla sintomática irreversible que luego se transforma en una falla funcional, y lograr revertir la situación. Es un método tendiente a mejorar la disponibilidad de los equipos, con modificaciones y soluciones técnicas diversas.

---



Es muy difícil definir con precisión el límite entre el mantenimiento predictivo, y el mantenimiento proactivo, ya que ambos buscan identificar fallas sintomáticas en forma prematura. La diferencia principal radica en el carácter de reversibilidad o irreversibilidad que le confieren a las fallas sintomáticas. En el caso del mantenimiento proactivo, la detección de la falla sintomática ocurre con mayor anticipación, lo que permite tomar acciones para desviar la tendencia natural hacia la falla funcional, y evitar en muchos casos la ocurrencia de la misma.

El mantenimiento proactivo presenta beneficios en su incorporación, como son la posibilidad de analizar la evolución de una falla sintomática reversible (prácticamente desde la aparición de la causa raíz), provee de información para actuar sobre las causas de las fallas, y reduce los gastos provocados por fallas sintomáticas irreversibles. Además, es importante destacar que las herramientas que incorpora el mantenimiento proactivo ofrecen un panorama muy definido del estado de los componentes de equipos, lo que permite decidir el momento más oportuno para su reemplazo o reparación, optimizando en muchas ocasiones el intervalo entre dos intervenciones preventivas.

Algunas herramientas del mantenimiento proactivo que se destacan son el análisis físico-químico de lubricantes, el recuento de partículas contaminantes, la verificación de metales y aleaciones, alineación y balanceo, seguimiento de niveles térmicos, y estudios de amperaje, entre otros.

#### **4.6. Plan de Mantenimiento**

El plan de mantenimiento que representaría el nivel táctico consiste en un conjunto estructurado de indicaciones que incluyen actividades, procedimientos, recursos a utilizar y tiempo requerido para llevar a cabo dichas tareas. Este plan contiene todas las tareas necesarias para prevenir los principales fallos que puede tener la instalación. El tipo de tareas y su frecuencia serán descriptas para cada activo, que tareas se realizarán depende de varios factores pero básicamente se pueden definir teniendo en cuenta alguno de los siguientes puntos:

- Adoptar las recomendaciones de los fabricantes, las cuales generalmente aparecen en el manual de operación y mantenimiento o documentos similares.
-

- Contar ya con la experiencia de haber realizado mantenimiento a equipos con características similares y por lo tanto definir tareas en base a la propia experiencia.
- Estudiar y analizar la documentación técnica de cada componente, como dibujos, esquemas, y procedimientos técnicos, entre otros.
- Usar técnicas de ingeniería de mantenimiento, como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) basado en un Análisis de Modos de Fallas y Criticidad (FMECA) u otros métodos con este propósito.
- Teniendo en cuenta los requisitos reglamentarios u obligatorios, la seguridad y condiciones de operación del activo, y también regulaciones ambientales para este.

En la Figura 19 se muestra como se recomienda estructurar un plan de mantenimiento básico para un sistema productivo (conjunto de activos):

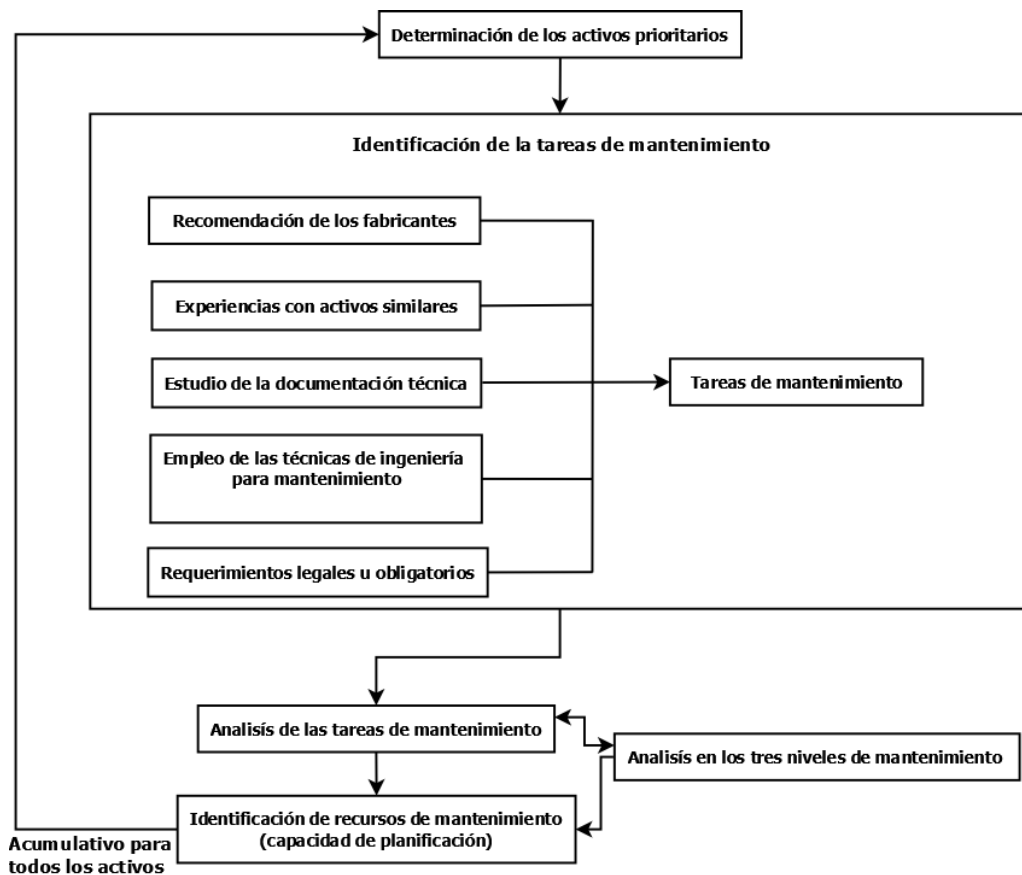


Figura 19. Modelo para la planificación y definición de las tareas de mantenimiento.

El plan de mantenimiento esta dado por diversas tareas, y para que una tarea esté completamente definida se necesita la siguiente información básica:

- Descripción de la tarea (con el nivel de detalle requerido para un técnico calificado).
- Frecuencia de la tarea (basada en una medida relevante como puede ser el tiempo transcurrido, las horas de funcionamiento, el número de ciclos operativos o la distancia).
- Cantidad de técnicos, nivel de habilidad y tiempo aproximado requerido para realizar la tarea.
- Procedimientos para el desmontaje y montaje si se requieren.
- Procedimientos de seguridad a seguir y Elementos de Protección Personal (EPP) a utilizar.
- Aclarar si se necesitan herramientas especiales, equipo de prueba o de apoyo.
- Repuestos, materiales y consumibles a utilizar o reemplazar si son necesarios.
- Observaciones y mediciones a realizar.
- Procedimientos de verificación del funcionamiento adecuado y de la finalización exitosa de la tarea de mantenimiento, quedando el activo disponible para su operación.

Luego de definir las tareas para cada activo, que conformarán el plan de mantenimiento, se debe desarrollar la etapa de planeación y programación de dichas tareas (nivel operativo).

La planeación es el proceso mediante el cual se determinan y preparan todos los elementos requeridos para efectuar una tarea antes de iniciar el trabajo. El proceso de planeación comprende todas las funciones relacionadas con la preparación de la orden de trabajo (OT), lista de materiales, la requisición de compras, los planos y dibujos si son necesarios, los estándares de tiempo y todos los datos necesarios antes de programar y liberar la OT. Esto sumado a la coordinación en conjunto con operaciones para definir

---

el momento en los que se realizarán las tareas de mantenimiento que correspondería a la programación.

La programación del mantenimiento es un proceso mediante el cual se acoplan los trabajos con los recursos y se les asigna una secuencia ordenada para ser ejecutados en un determinado tiempo específico. Básicamente se pueden preparar tres niveles, dependiendo del detalle que se requiera o justifique:

- El plan o programa a largo plazo o maestro, que cubre un período mayor a tres meses de operación, y es donde se enfocará este trabajo.
- El plan semanal.
- El plan diario, que cubre el trabajo que debe ir completándose en el día a día.

La gestión de prioridades en el ámbito industrial es un aspecto importante al momento de garantizar la eficiencia y la efectividad de las operaciones de mantenimiento. Cuando las actividades se programan en base a un sistema de prioridad subóptimo, como suele suceder cuando las tareas correctivas tienen precedencia sobre las preventivas, puede generar desviaciones significativas respecto a la planificación establecida en el plan de mantenimiento.

Las tareas correctivas, si bien son necesarias para abordar problemas inmediatos que surgen durante la operación, no deben eclipsar la importancia de las actividades preventivas. Estas últimas, que incluyen inspecciones regulares, mantenimiento predictivo y acciones proactivas para evitar fallos, son fundamentales para mantener la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos industriales a largo plazo.

---

## 5. METODOLOGÍA

Para la gestión del mantenimiento de los equipos incluidos en la planta de tratamiento se optó por seguir los lineamientos de un modelo definido dentro de la moderna Gestión de Activos (GA), que tiene en cuenta e integra los conceptos teóricos desarrollados en el capítulo anterior.

Específicamente, el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) propuesto tiene como eje los conceptos brindados por la familia de Normas ISO 55000 (2015) y la propuesta desarrollada por los autores Sola Rosique y Crespo Márquez (2016), contemplando las etapas indicadas en la Figura 20.

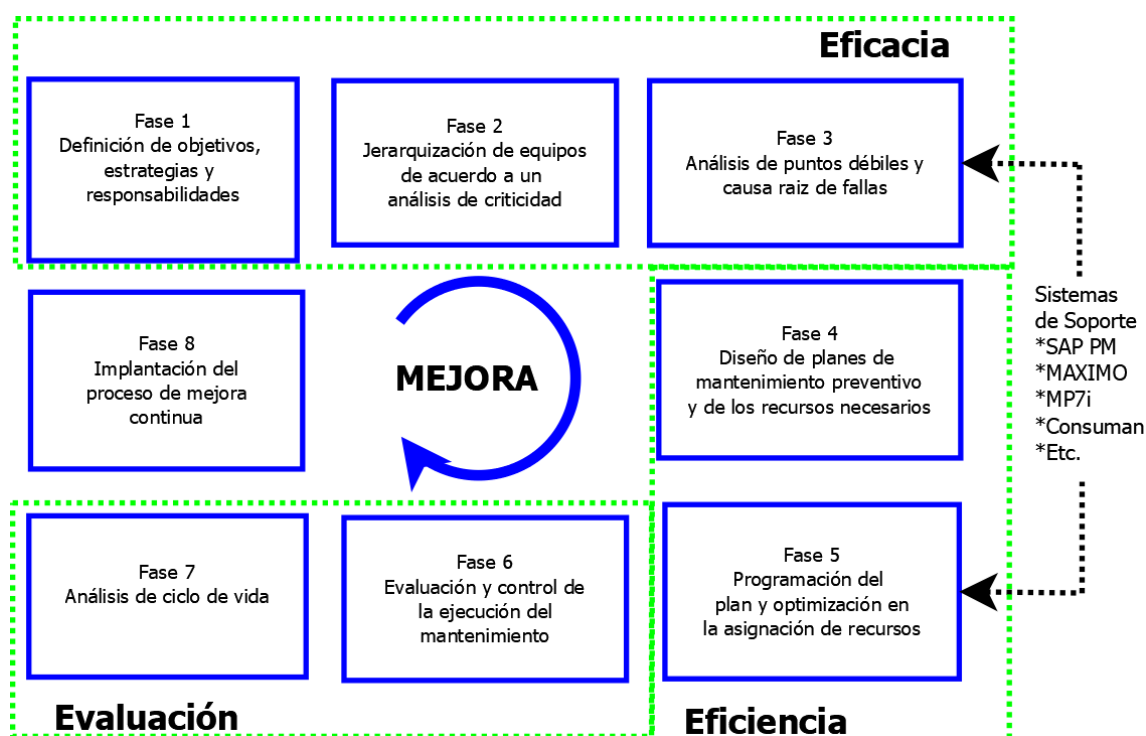


Figura 20. Diagrama de Flujo Metodología.

A continuación, se describen de forma sucinta los ocho bloques o fases generales de la metodología propuesta.

### Fase 1: Técnicas para definir la estrategia de gestión de mantenimiento.

Para poder asegurar que los objetivos operacionales de mantenimiento y la estrategia no son inconsistentes con los objetivos generales del negocio, se puede introducir e im-

plementar en el área de mantenimiento técnicas como el Cuadro de Mando Integral (BSC, por sus siglas en inglés). El BSC es específico para la organización para la cual es desarrollado y permite la creación de una serie de indicadores claves de rendimiento (KPIs, por sus siglas en inglés) para medir el desempeño de la gestión a lo largo del tiempo. Los objetivos seleccionados deben ser específicos, claramente medibles y realizables (pero exigentes), realistas y en base al tiempo disponible. El tiempo, costos y recursos necesarios para desarrollar, mantener y gestionar los indicadores de rendimiento debe de ser un aspecto a considerar y debe ayudar a determinar el número de indicadores claves de rendimiento utilizados.

### **Fase 2: Técnicas para jerarquizar los activos de producción.**

Cuando los objetivos y estrategias de mantenimiento están definidos, existen un número importante de técnicas cualitativas y cuantitativas que ofrecen una base sistemática sobre la cual basar las decisiones a la hora de clasificar los activos productivos en base a la importancia de su función para la consecución de los objetivos del negocio. Muchas de las técnicas cuantitativas utilizan algún tipo de variación de un concepto clave en esta fase que es la evaluación probabilística del riesgo y la obtención del índice probabilístico de riesgo del activo ([Moubray, 2001](#)). Los activos con mayor índice serán los primeros en ser analizados. En muchas ocasiones no existen datos históricos en base a los cuales obtener estos índices, en estos casos es posible utilizar técnicas de naturaleza más cualitativa para ir así garantizando niveles adecuados iniciales de efectividad en las operaciones de mantenimiento.

### **Fase 3: Herramientas para eliminar los puntos débiles en equipos/sistemas de alto impacto.**

En activos críticos, antes de pasar a desarrollar las acciones a incluir en el plan de mantenimiento, es muy conveniente analizar posibles fallos repetitivos o crónicos, cuya frecuencia de aparición pueda incluso ser excesiva. Si la organización es capaz de encontrar y eliminar, en caso de ser posible, las causas de estos fallos podrá ofrecer un alto retorno inicial a la inversión en el programa de gestión de mantenimiento. Entonces, será mucho más fácil realizar las fases sucesivas de análisis y diseño del plan de manteni-

---

miento. Existen diferentes métodos para realizar este análisis de puntos débiles en activos críticos, uno de los más conocidos es el del Análisis de Causa Raíz de fallos (ACR). Este método consiste en una serie de acciones que son tomadas para encontrar la razón por la cual existe un determinado modo de fallo y formular hipótesis para corregirlo.

#### **Fase 4: Diseño y definición de un plan adecuado de mantenimiento preventivo.**

El diseño del plan de mantenimiento preventivo para un determinado sistema requiere la identificación de sus funciones y de la forma en que estas funciones dejan de cumplirse, además del establecimiento de una serie de tareas efectivas y eficientes de mantenimiento, basadas en consideraciones que tienen que ver con la seguridad y la economía del sistema. Un método formal para la consecución de este objetivo es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) aunque también existen otros que se pueden emplear.

#### **Fase 5: Técnicas de optimización para la mejora de los planes de mantenimiento.**

La optimización de los planes y programas de mantenimiento puede ser realizada para mejorar la eficacia y eficiencia de las políticas de mantenimiento que resultan de un diseño inicial del plan y del programa de tareas. Los modelos a aplicar dependen, por lo general, del horizonte de tiempo elegido para el análisis. Existen diversas formas y modelos para poder optimizar los planes de mantenimiento.

#### **Fase 6: Control y supervisión de las operaciones de mantenimiento.**

La ejecución de las actividades de mantenimiento luego de ser diseñadas, planificadas y programadas tal y como se ha descrito en las fases anteriores, tienen que ser evaluadas y las desviaciones controladas para tratar de alcanzar continuamente los objetivos de negocio y los valores estipulados para los KPIs de mantenimiento seleccionados. Muchos KPIs, son contruidos o se componen a partir de otra serie de indicadores técnicos y económicos de nivel más bajo, por lo tanto, es muy importante asegurarse que la organización captura datos convenientes y de forma correcta.

---

**Fase 7: Instrumentos para el análisis de costos de ciclo de vida del activo.**

Un análisis de costos de ciclo de vida calcula el costo de un activo durante su vida útil. El análisis de un activo típico podría incluir costos de planificación, investigación y desarrollo, producción, operación, mantenimiento y deposición final del equipo. Los costos de adquisición del equipo son por lo general conocidos, pero el análisis de costos del ciclo de vida depende principalmente de valores derivados de la confiabilidad del mismo. Un análisis de costos de ciclo de vida es importante para tomar decisiones sobre la adquisición de nuevos equipos, este análisis proporciona tres ventajas:

1. Todos los costos asociados con un activo se hacen visibles.
2. Permite un análisis entre funciones del negocio. Por ejemplo, comprobar cómo bajos costos de I&D puede conducir a altos costos de operación y mantenimiento en el futuro.
3. Permiten a la gerencia desarrollar predicciones más certeras y tomar mejores decisiones.

Este tipo de análisis se justifican en equipos o activos de gran relevancia para la organización y lo cuales representan un alto valor económico.

**Fase 8: Técnicas para la mejora continua de la gestión mantenimiento.**

La mejora continua de la gestión de mantenimiento será posible utilizando técnicas y tecnologías emergentes en áreas que se consideren de alto impacto como resultados de los estudios realizados en fases anteriores del proceso de gestión. Además de nuevas tecnologías para el mantenimiento, la participación de los oficiales de mantenimiento y operadores dentro del proceso de mejora será un factor crítico para el éxito. También se deben incluir capacitaciones regulares sobre cuestiones relevantes que mejoren el conocimiento general en aspectos técnicos de los equipos, e incorporar un sistema de gestión de mantenimiento asistida por ordenador el cual ayudará en la organización de las tareas si se implementa de forma adecuada.

---



## 6. DESARROLLO

En la presente sección se desarrolla cada una de las fases relacionadas con la metodología propuesta.

### 6.1. Definición de la Estrategia de Gestión de Mantenimiento

En la Figura 21 se muestra el organigrama del sector de mantenimiento de la Empresa. En este organigrama, el autor de este trabajo ocupaba el cargo de Coordinador de Mantenimiento, reportando directamente al Jefe de Mantenimiento. Las tareas operativas, dirigidas por un supervisor con la asistencia de cuatro oficiales (eléctrico, soldadores/montadores y mecánico), se llevan a cabo en la planta mediante un esquema de trabajo de 14 días consecutivos, seguidos de 7 días de descanso, con jornadas laborales de 12 horas. Además de estas funciones, los operadores del horno desempeñan labores significativas relacionadas con el mantenimiento del equipo, como la limpieza exterior de los sistemas y la eliminación de material adherido en el interior de la cámara rotativa del horno.



Figura 21. Organigrama del sector mantenimiento.

La planta dispone de un galpón destinado a funciones de taller de mantenimiento, donde se llevan a cabo algunas tareas y se utilizan como depósito para los repuestos e insumos en *stock*. Durante una inspección inicial, se identificó una deficiencia en el control de inventario de repuestos y consumibles (como lubricantes, electrodos, discos

de corte, cinta aislante, entre otros). Además, se observó que no se habían establecido procedimientos específicos para mantener el orden y la limpieza en el área asignada (ver Figura 22).



(a) Repuestos.



(b) Lubricantes.

Figura 22. Sectores asignados como depósito de insumos y repuestos.

Antes de iniciar la elaboración del plan de mantenimiento, es crucial definir los objetivos e indicadores de rendimiento (KPIs) que guiarán la estrategia futura. Estos objetivos a mediano plazo marcarán las metas a alcanzar con la implementación del nuevo plan. Dentro de los indicadores de mantenimiento más importantes, adoptados por la Organización, se pueden destacar los siguientes:

- **Tiempo Promedio entre Fallas (MTBF):** este parámetro establece el período promedio entre fallas de un elemento. Dicho elemento puede ser un equipo o un sistema complejo, con la condición de que se repara luego de la ocurrencia de la falla. Se expresa como el tiempo establecido para operar  $T_o$ , menos el tiempo por parada no programadas  $T_{np}$ , dividido el número total de fallas  $C_f$  detectadas durante el período de operación. Se define como:

$$MTBF = \frac{T_o - T_{np}}{C_f} \quad (1)$$

- **Tiempo Promedio para la Reparación (MTTR):** se define como la relación entre el tiempo total de intervenciones para la restitución del servicio  $T_{tr}$ , y el número total de reparaciones  $C_r$ . Según la siguiente expresión:

$$MTTR = \frac{T_{tr}}{C_r} \quad (2)$$

- **Disponibilidad Operacional ( $D_o$ ):** representa el porcentaje de tiempo disponible para el proceso de operación en las condiciones de seguridad y calidad establecidas. Establece una relación entre el tiempo operativo y el tiempo de paradas no programadas  $T_{np}$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$D_o = \frac{T_o - T_{np}}{T_o} 100 \% \quad (3)$$

- **Costo de la indisponibilidad por fallas (CT):** este indicador contempla los costos de penalización por tonelada de suelo tratado CP (USD/t) generados durante el *downtime* por eventos de fallas (mantenimientos correctivos, paros de planta, entre otros).

$$CT = C_f \cdot T_{tr} \cdot CP \quad (4)$$

De forma complementaria a estos indicadores, se plantean los siguientes objetivos que se intentarán alcanzar con la nueva gestión y plan de mantenimiento:

1. Aumentar la confiabilidad de los equipos.
2. Mejorar la condición general y desempeño de los equipos.
3. Mejorar la seguridad a la hora de la intervención de los equipos.
4. Reducir el costo por detenciones no programadas (lucro cesante).

En la matriz BSC se detallan los indicadores de rendimiento, las metas u objetivos asociados, y los planes de acción generales para cumplir con dichas metas. En la Tabla 1, se presenta la matriz BSC con los indicadores que se medirán y se considerarán para evaluar la evolución del horno tras la implementación de los lineamientos del nuevo plan.

Tabla 1. Matriz BSC.

<b>Perspectiva</b>	<b>Objetivos</b>	<b>KPI</b>	<b>Metas</b>	<b>Planes de Acción</b>
Financiera	Reducir los costos mensuales totales de mantenimiento de material tratado por tonelada	CT	Reducir un 10 % con respecto al valor actual mensual	- Asegurar la realización de las tareas preventivas específicas para cada equipo.
Operativa	Mejorar el tiempo medio de reparaciones en los correctivos	MTTR	Disminuir el tiempo empleado un 20 %	- Asegurar que se cuente con los repuestos en planta. - Ejecutar las tareas de una manera ordenada priorizando las más críticas.
Operativa	Aumentar la disponibilidad global del horno	D <sub>o</sub>	Alcanzar una disponibilidad superior al 90 % en el horno	- Respetar el plan y ejecutar las tareas cuando corresponda. - Realizar mejoras que impacten en el sector operativo.
Operativa	Mejorar el tiempo medio entre fallas	MTBF	Aumentar el tiempo un 20 %	- Realizar las tareas según indica el plan de mantenimiento.

## **6.2. Jerarquización de Activos**

### **6.2.1. Revisión de la Hoja de Vida**

La recopilación de datos en el ámbito del mantenimiento es fundamental para implementar estrategias efectivas. Durante esta fase, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los registros históricos de datos, los cuales fueron extraídos de los informes diarios proporcionados por los sectores operativo y de mantenimiento. Como resultado de este proceso, se completaron las hojas de vida para cada uno de los subsistemas considerados en este trabajo, detallando y tipificando las principales características técnicas.

En la planilla "Hojas de Vida"<sup>1</sup> se detalla el registro histórico de las últimas intervenciones realizadas en todos los subsistemas durante el año previo al inicio de este trabajo.

### **6.2.2. Análisis de Criticidad**

El análisis de criticidad es una técnica de fácil comprensión y manejo, donde se establecen rangos relativos para representar la probabilidad y/o frecuencia de eventos, así como sus consecuencias asociadas. El estudio de la criticidad de los equipos puede ser ponderado considerando diversos factores clave, entre ellos:

- Costo de tiempo de inactividad de la máquina o pérdida de productividad.
- Índice de fallo y tiempo medio de reparación.
- Daños consecuenciales o secundarios.
- Costo de sustitución de la máquina.
- Costo de mantenimiento o repuestos.
- Costo del ciclo de vida.
- Consideraciones de seguridad e impacto medioambiental.

---

<sup>1</sup><https://www.dropbox.com/scl/fi/vqgluru07hxe73vxfca/Hojas-de-vida.pdf?rlkey=41gzmx73r3818zii31gr60tcz&st=onq30k81&dl=0>

---

La matriz resultante, con la clasificación de criticidad operativa, se convierte en una herramienta invaluable para priorizar la ejecución de análisis de optimización, implementación de planes de mantenimiento y la realización de trabajos correctivos. Se enfoca especialmente en los subsistemas de alta criticidad. Sin embargo, también se presta atención a los de media y baja criticidad, ya que mejoras potenciales o cambios pueden alterar la condición de estos subsistemas. Este enfoque sistémico permite una gestión proactiva y adaptativa de los recursos de mantenimiento, optimizando la eficiencia y la confiabilidad operativa. La fórmula para determinar la Criticidad Operativa (CO) adoptada para este trabajo, viene dada por la siguiente expresión:

$$CO = [(IO \times FO) + CM + SHA] \times FF \quad (5)$$

Donde:

- **IO:** Impacto Operacional. Evalúa la incidencia de la pérdida neta de producción asociada a la falla del módulo funcional.
- **FO:** Impacto por Flexibilidad Operacional. Se determina a partir de las órdenes de trabajo correctivas, considerando el tiempo medio requerido para la reparación y la presencia o ausencia de módulos funcionales en *stand by* en la instalación evaluada.
- **CM:** Impacto en los Costos de Mantenimiento. Se estima considerando los costos de repuestos y mano de obra de la cuadrilla mecánica y eléctrica. Además, se respalda con el costo asociado de las órdenes de trabajo correctivas.
- **SHA:** Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente. Se evalúa el impacto de falla del activo a la seguridad, salud del personal y ambiente.
- **FF:** Frecuencia de Falla. Se obtiene a partir del histórico de mantenimiento de los equipos, analizando la frecuencia de falla de todas las órdenes de trabajo asociadas a mantenimiento correctivo.

En la Tabla 2 se detallan los factores de ponderación de cada una de las variables involucradas en el cálculo de la Criticidad Operativa.

Tabla 2. Factores de ponderación para determinar la Criticidad Operativa (CO).

<b>Frecuencia de Fallas (FF)</b>	<b>Ponderación</b>
Mayor a 4 eventos por año	4
De 2 a 4 eventos por año	3
Entre 1 y 2 eventos por año	2
Menos de 0,5 eventos por año	1
<b>Impacto Operacional (IO)</b>	<b>Ponderación</b>
Pérdidas de producción superiores al 75 %	10
Pérdidas de producción entre el 50 % y 75 %	7
Pérdidas de producción entre el 25 % y 50 %	5
Pérdidas de producción entre el 10 % y 25 %	3
Pérdidas de producción menores al 10 %	1
<b>Impacto por Flexibilidad Operacional (FO)</b>	<b>Ponderación</b>
No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.	4
Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.	2
Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.	1
<b>Impacto en Costos de Mantenimiento (CM)</b>	<b>Ponderación</b>
Costos totales de reparación, materiales y mano de obra superiores a 10.000 dólares.	3
Costos totales de reparación, materiales y mano de obra entre 5000 y 10.000 dólares.	2
Costos totales de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 5000 dólares.	2
<b>Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA)</b>	<b>Ponderación</b>
Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/ó incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos.	8
Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/ó incidente ambiental de difícil restauración.	6
Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor controlable, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.	3
No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales.	1

Dado que cada subsistema se conforma a su vez por sus componentes específicos, el valor final de criticidad para cada uno de estos subsistemas se obtiene como el promedio

de la suma de los valores de criticidad calculado para cada uno de sus componentes. Para mayor detalle se puede consultar la planilla de Excel “Matriz de Criticidad”<sup>2</sup>.

En la Tabla 3 se presentan los valores promedios calculados para cada uno de los subsistemas. Se incorpora la siguiente valoración de la criticidad: Alta (rojo), Media (amarillo) y Baja (verde). En la Figura 23 se presentan cada uno de los subsistemas incluidos en el análisis, ordenados de mayor a menor criticidad.

Tabla 3. Criticidad de los subsistemas.

ID	SubSistema	CO
001	Tornillo inclinado de carga	74,4
002	Tornillo Feed Auger	55,38
003	Cilindro Rotativo	66,67
004	Alimentación de aire para quemadores	65,33
005	Alimentación de gas 3"	21,83
006	Quemadores del N°1 al N°8	18,83
007	Estructura y chimenea	45,94
008	<i>Quench Scrubber</i>	35,14
009	KOP	26
010	Separador Oil-Agua	19,5
011	Sistema de bombeo	33,2
012	Aeroenfriador QS	47,43
013	Aeroenfriador KOP	27,8
014	Tanques de agua	13
015	IDF	68,88
016	Arrestallamas	13,67
017	Quemador Riello	66
018	Chimenea	22
019	Alimentación de gas	18,67
020	<i>Air-Excess</i>	12
021	Testo (gases) y Dynoptic (Particulado)	57
022	<i>Air-lock</i>	70,14
023	Tornillo de descarga	73
024	Tornillo <i>by-pass</i>	45
025	Compresores de aire	176
026	Generador de N <sub>2</sub> A-B	44,6
027	Acumuladores	40
028	Panel de control general	46
029	Tableros eléctricos sala de control	60
030	Generador CETEC 425kVA	176
031	Contenedores	34

<sup>2</sup><https://www.dropbox.com/scl/fi/zelf4k1dxhfx8f49clbs0/Matriz-de-Criticidad.xlsx?rlkey=mpos9nrtolatcf7hg5v9fm7ew&st=lvamavaw&dl=0>



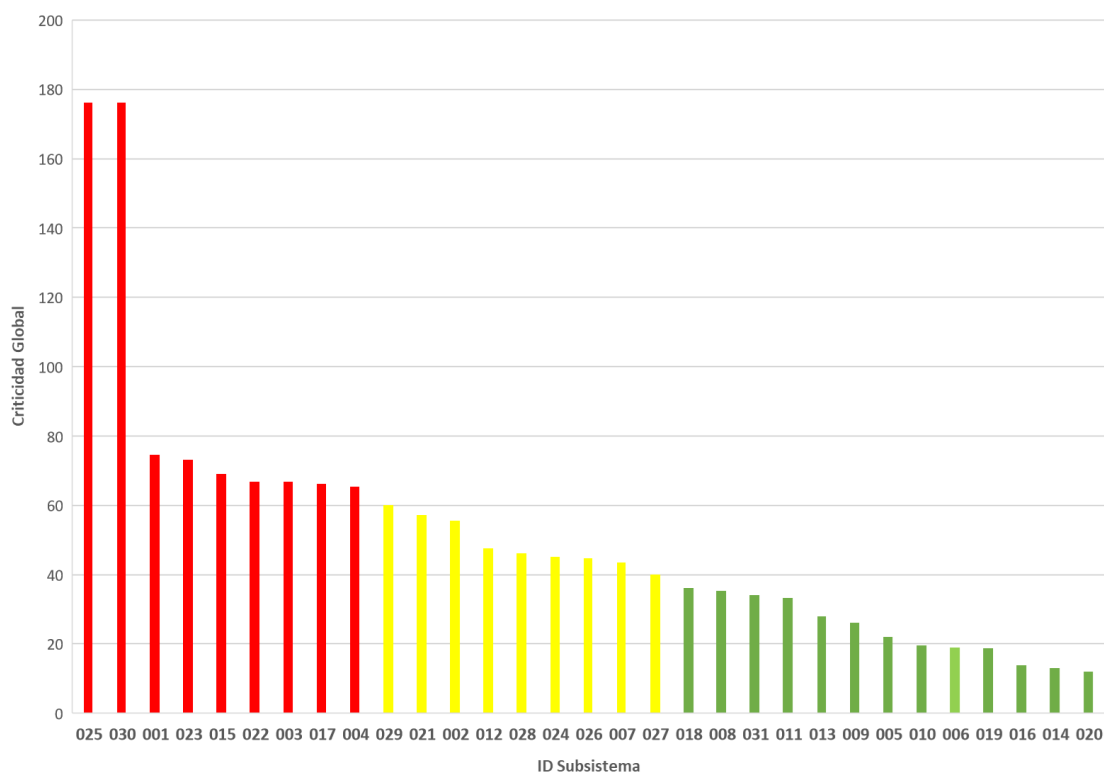


Figura 23. Crítica operativa por subsistema.

Como puede observarse en la Figura 23, los tres subsistemas que resultaron ser más críticos para el proceso productivo son los siguientes:

1. Compresores de aire Atlas Copco GA 75+ y GA 55 [025].
2. Generador eléctrico CETEC de 425kVA [030].
3. Tornillo de carga inclinado [001].

Estos tres equipos comparten una característica crucial: si alguno de ellos falla o presenta problemas, el horno deja de operar por completo. Esto puede deberse a la falta de energía eléctrica, escasez de aire comprimido (lo que impide la producción del nitrógeno necesario) o la imposibilidad de cargar material en el cilindro del horno para continuar con la desorción normal.

Los dos primeros equipos cuentan con respaldo por razones de seguridad, tanto para las personas como para la instalación en sí. Si el horno está funcionando normalmente y surge una falla en el generador, es crucial contar con una forma de continuar operando y poder enfriar el equipo.

En cuanto al aire comprimido y el nitrógeno, además de disponer de un compresor de respaldo en caso de falla del principal, se cuenta con dos tanques de almacenamiento de 6000 litros para cada uno. En caso de una falla en el compresor o el generador, se puede seguir inyectando nitrógeno a baja presión en el cilindro desde el tanque correspondiente. Esto previene una posible autoignición de los vapores de hidrocarburos y una explosión dentro del cilindro.

### **6.3. Análisis de Causa Raíz**

Después de obtener los resultados de criticidad, se llevó a cabo un Análisis de Causa Raíz (ACR) centrado en los tres subsistemas más críticos. El objetivo era identificar posibles causas de fallos repetitivos para tenerlas en cuenta al definir las tareas correctivas iniciales o posibles mejoras (ver Tablas 4 a 6).

Algunas acciones pueden ser soluciones para diversas causas que, en principio, parecen aisladas pero que comparten un origen común. También es importante considerar el estado actual de los subsistemas, por lo que se deben realizar actividades para restaurar su condición, como reparaciones iniciales, reemplazos de componentes, limpieza, reajustes, entre otras.

En algunas ocasiones, reducir la criticidad y aumentar la confiabilidad de ciertos activos implica agregar un respaldo que pueda cumplir la misma función en caso de desperfecto del activo principal.

Con el objetivo de reducir la criticidad de los equipos y aumentar su confiabilidad, se han realizado mejoras mínimas en el horno en los últimos seis meses. Aunque parezcan pequeñas, estas mejoras son de gran importancia para lograr una mayor disponibilidad del sistema.

---

Tabla 4. Análisis de Causa Raíz para los compresores de aire [025].

Tipo de Falla	Posibles Causas	Acción Inmediata	Acción Correctiva
Se detiene compresor por alta temperatura del aceite.	Filtro de aire tapado con exceso de particulado, compresor trabaja de manera forzada.	Sacar el filtro de aire y limpiar mediante soplado con aire comprimido. Si ya está deteriorado, reemplazarlo por uno nuevo.	Establecer frecuencia de limpieza y reemplazo del filtro de aire.
	Altas temperaturas exteriores, mayores a 38°C.	Establecer rango de trabajos en las presiones de carga y descarga que permitan aliviar la carga sobre el compresor.	Mejorar estanqueidad en la sala de compresores e instalar un aire acondicionado que permita disminuir la T° ambiente.
	Funcionamiento inadecuado de la válvula termostática.	Verificar el flujo de aceite hacia el radiador controlando la temperatura de las mangueras.	Si la válvula se encuentra en falla deberá ser reemplazada.
	Aceite degradado y con muchas horas de operación.	Sacar una muestra de aceite y verificar visualmente su estado.	Evaluar reemplazo del aceite según nivel de degradación. También respetar los cambios de aceite cada 1200 h de operación.
Se detiene o no arranca el compresor por falla en el botón de parada de emergencia.	Operarios presionan el botón de parada de emergencia para detener el compresor. El circuito queda abierto y no permite arrancar el equipo hasta no ser reiniciado.	Reiniciar el alerta desde el panel de control y volver a encender el compresor.	Instruir a los operarios sobre la forma correcta de encender y apagar el equipo. Al presionar el botón de parada normal el compresor sigue operando por un tiempo más hasta que finalmente libera la presión y se apaga.
	El botón de parada de emergencia no vuelve a la condición de operación normal para habilitar el circuito, y por lo tanto no permite el arranque del compresor. Esto se debe a la suciedad generada por material particulado y por humedad.	Utilizar limpia contactos en el botón para que desprege la parte de control y se cierre el circuito.	Limpiar de manera periódica todos los sistemas electrónicos del compresor.

Tabla 5. Análisis de Causa Raíz para el generador eléctrico [030].

Tipo de Falla	Posibles Causas	Acción Inmediata	Acción Correctiva
Falla en válvula de regulación de entrada de gas interna del motor.	El gas natural reseca el diafragma y evita su correcta regulación.	Reemplazar diafragma deteriorado por uno nuevo.	Reemplazar diafragma según indique el procedimiento.
	El ambiente contiene una gran cantidad de particulado fino (material desorbido del horno).	Limpieza interna del motor, desarmar la válvula de ser necesario.	Realizar limpieza interna con aire cada dos semanas al generador y cada un mes limpiar el motor.
	No está estipulado cada cuanto tiempo se debe reemplazar el diafragma de 2".	Investigar cada cuanto tiempo se recomienda cambiar el diafragma en este tipo de aplicación.	Formular un procedimiento de reemplazo que indique el período de reemplazo del diafragma.
Falla en uno de los transformadores de intensidad (TI), lo cual impide leer una de las corrientes de las fases.	Un pico de corriente dañó el TI.	Reemplazar TI.	Verificar correcto funcionamiento de los equipos aguas abajo del generador. Balancear las tres fases según consumos.
	El ambiente contiene una gran cantidad de particulado fino (material desorbido del horno).	Realizar limpieza en la zona de generación. Incluye limpieza con aire y aspirado de particulado.	Formular un procedimiento de limpieza efectiva para el generador.
	No se realiza limpieza de los componentes eléctricos del generador.		Mejorar la estanqueidad en la sala de generadores para disminuir la entrada de particulado.

Tabla 6. Análisis de Causa Raíz para el tornillo de carga inclinado [001].

Tipo de Falla	Posibles Causas	Acción Inmediata	Acción Correctiva
El tornillo presenta desgaste en helicoides y fisuras en el eje.	La carga del material es muy brusca, lo que provoca que el eje del tornillo sufra una gran carga de torsión.	Indicar al operario de la retroexcavadora que controle la dosificación de la carga del material sobre la tolva.	Disminuir la altura de la tolva, o elevar el nivel del suelo para que se pueda utilizar una máquina con un balde más pequeño para la carga.
	El tornillo es demasiado largo para la altura a la que se eleva el material crudo, las fisuras se producen en la parte central del mismo.	Reforzar la parte central del eje con un encamisado de mayor diámetro.	Rediseñar el método de carga, donde se utilicen dos o más tornillos de forma concatenada. Cada tornillo tendrá un largo e inclinación menores a las actuales.
	El material erosiona y desgasta la parte exterior de la hélice. Esto genera una reducción del diámetro y provoca que se acumule material entre la cuna y la hélice, lo cual tiende a elevar aún más la fuerza que realiza el tornillo.	Reemplazar el tornillo por uno nuevo dado el desgaste registrado.	Evaluar frecuencia de reemplazo del tornillo y la cuna de apoyo. Se puede utilizar algún tipo de recubrimiento sobre la cuna de este para disminuir el rozamiento.
	Los climas fríos favorecen el congelamiento del material, esto hace que el tornillo sufra cargas excesivas.	Mover y romper los bloques de material crudo compactados antes de la carga.	Evitar que se trate material por encima de la capacidad operativa del equipo.

A continuación, se proporcionará una breve explicación de las tareas correctivas iniciales y mejoras realizadas, acompañada de detalles fotográficos, para los siguientes ocho subsistemas:

1. Tornillo inclinado de carga [001]: se realizó el cambio del tornillo completo debido a que presentaba un gran desgaste y fisuras evidentes. También se incluyó el cambio del reten en caja reductora Tramec TA 180 y del rodamiento UC 214.
2. Tornillo horizontal (*feed auger*) [002]: se modificó la boca de entrada al horno (aumento de diámetro) y la disposición del tornillo. Por lo que se reemplazaron los rodamientos UCF 211 por los de denominación UCP 211. Además, se sustituyó el buje de bronce y se fabricó un nuevo porta buje que facilita las tareas de montaje desde el interior del horno cuando se requiere cambiar el buje (ver Figura 24a). Esta modificación facilita la operación, dado que no se requiere desmontar el tornillo completo. Se contempló la instalación de dos perfiles IPN 160, como puede observarse en la Figura 24b. Este cambio proporcionó una mayor rigidez a la estructura soporte.



(a) Detalle nuevo portabuje.



(b) Detalle soporte.

Figura 24. Rediseño estructura soporte *feed auger*.

3. Cilindro rotativo: se realizó el cambio de aceite de la caja reductora según la recomendación del fabricante. Se colocaron nuevos puntos de engrase para facilitar

la lubricación de los rodamientos que soportan el cilindro. También, se repararon algunas de las paletas internas y se retiraron otras que se encontraban en mal estado. Finalmente, se reemplazaron los rodillos tipo levas de 3" incluidos en los sellos mecánicos.

4. Alimentación de aire para quemadores [004]: se realizó el cambio de rodamientos del motor Toshiba 50HP y se balanceó la turbina dado que presentaba una vibración excesiva. También, se colocó una brida flexible (tipo fuelle) en el ducto de entrada para evitar que las vibraciones de la turbina se trasmitan de forma directa a la estructura que soporta los cuatro filtros rectangulares de entrada de aire.



(a) Brida flexible.



(b) Detalle turbina.

Figura 25. Mantenimiento inicial sistema alimentación de aire para quemadores.

5. Quemador Riello [017]: dado que, en épocas de verano con registros de altas temperaturas, se apagaba el quemador por sobrecalentamiento localizado en su módulo de control. Se decidió instalar una tubería de aire comprimido (tipo politubo) para refrigeración por soplado constante del módulo, de esta manera se solucionó de forma efectiva el problema (ver Figura 26).
6. Cañería de gas de 2" [019]: este subsistema tiene como componente crítico una válvula reguladora de gas de entrada principal (ver Figura 27). Se procedió a su limpieza, debido a que este componente presentaba fallas y se bloqueaba apagándose así el quemador Riello. A tal fin, se utilizó un lija fina para repasar el interior

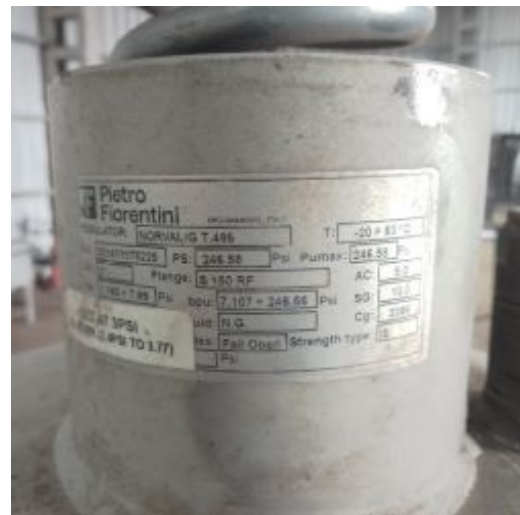
del cilindro, asegurando de esta manera que el resorte pueda trabajar de manera correcta sobre el diafragma permitiendo una adecuada regulación de la presión de gas en la cañería aguas abajo.



Figura 26. Rediseño sistema de enfriamiento módulo de control quemador Riello.



(a) Cilindro interno.



(b) Detalle especificaciones técnicas.

Figura 27. Mantenimiento válvula reguladora de gas.

7. Válvula rotativa *air-lock* [022]: se realizó el cambio del sello y rodamiento de la caja reductora Winsmith 926. Previamente, se tuvo que rectificar el eje para asegurar un montaje correcto. Además se colocó un motoreductor adicional como equipo de



*backup* (ver Figura 28), de esta forma se asegura el sistema de redundancia necesario para que el horno pueda seguir operando en caso de que se presenta alguna falla en el sistema de accionamiento de la válvula.



Figura 28. Detalle motoreductor de *backup*.

8. Tornillo by-pass [024]: las intervenciones en este subsistema fueron motivadas en virtud de que en diversas ocasiones la aislación del cable de alimentación del motor eléctrico se degradaba térmicamente, produciendo fugas a tierra. Esta falla se debía a que el material desorbido almacenado dentro del tornillo transfería lentamente el calor al cable. Para resolver esto se incorporó al cable una aislación térmica adicional compuesta de una fibra o manta cerámica (ver Figura 29).



Figura 29. Aislación térmica cableado motor eléctrico tornillo *by-pass*.

#### 6.4. Definición del Plan de Mantenimiento

Después de realizar el análisis de criticidad y proponer correcciones iniciales, así como posibles mejoras para los equipos, se desarrolló un plan de mantenimiento completo que abarca inspecciones, tareas preventivas y predictivas. El propósito fundamental de este plan es garantizar la confiabilidad a largo plazo de los equipos, asegurando que cumplan de manera efectiva con su función asignada.

Para cada subsistema, se han elaborado tablas detalladas que enumeran las tareas necesarias y su frecuencia para cada uno de los componentes principales. En ciertos casos debidamente justificados, se puede optar por esperar un tiempo antes de intervenir, prefiriendo abordar la falla cuando se manifieste.

Es relevante destacar que muchas de las tareas se repetirán entre subsistemas, dado que poseen componentes similares, tal como ocurre con los motores eléctricos y las cajas reductoras. Si bien las diferencias serán mínimas, se ajustarán a las particularidades de cada caso, incorporando tareas adicionales según sea necesario.

En otros casos específicos, como en el mantenimiento de generadores y compresores, las tareas se basarán en recomendaciones bibliográficas y especificaciones de los fabricantes. Además, la frecuencia de las intervenciones se adaptará a las variaciones del entorno operativo. También se ha diseñado un plan de lubricación específico para cada equipo.

El plan de mantenimiento, presentado en formato Excel para cada subsistema, está disponible en la planilla Excel “Plan de Mantenimiento Vulcan”<sup>3</sup>. A continuación, se detallan las consideraciones principales que se tuvieron en cuenta al definir las tareas de mantenimiento para cada subsistema:

001 Tornillo inclinado de carga (CO = Alta): es un activo sumamente crítico para el proceso del horno, por lo cual se aplicarán tareas tanto preventivas como predictivas. Algunas de estas tareas ya se realizan habitualmente debido al entorno en donde opera el equipo. Es importante controlar habitualmente el desgaste que se va produciendo en la periferia del tornillo, producto del normal funcionamiento. Se recomienda el uso de lubricante SAE 80-90 para la caja reductora y grasa de litio grado NLGI 2.

---

<sup>3</sup><https://www.dropbox.com/scl/fi/y4875iagr6i7hhjl930t/Plan-de-Mantenimiento.xlsx?rlkey=r2sa8ryfbhxua6h9l2up562z&st=3qjq4zia&dl=0>

---

- 002 Tornillo *feed auger* (CO = Media): este equipo es muy importante, ya que al igual que el anterior, representa la alimentación del horno. Por ello, se justifica realizarle tareas tanto preventivas como predictivas, además de las inspecciones de rutina. Se recomienda el mismo tipo de lubricante que para el tornillo inclinado de carga.
- 003 Cilindro rotativo (CO = Alta): requiere tareas predictivas, preventivas e inspecciones de rutina. Es importante aclarar que las tareas dentro del cilindro se realizan durante las paradas operativas. Es un equipo compuesto por varios componentes y que requiere una alta diversidad de tareas. En muchas ocasiones, se deben realizar correcciones y reparaciones de soldaduras por fuera del cilindro debido a que, en su momento, fue sometido a un exceso de temperatura, lo cual provocó fisuras en el extremo final del mismo. Se recomienda el uso de lubricante ISO VG 150 para la caja reductora y grasa de litio grado NLGI 2.
- 004 Alimentación de aire para quemadores (CO = Alta): La importancia de este sistema radica en que, si no funciona, los quemadores se apagarían, por lo cual requiere de tareas que puedan anticipar su falla y asegurar su disponibilidad. Es importante mantener limpia la turbina para evitar vibraciones excesivas.
- 005 Alimentación de gas 3" (CO = Baja): Constituye un subsistema sin mayores complejidades, por lo que solo se deben realizar limpiezas periódicas y reajustes en los sensores. Si alguno falla, no se realiza correctamente el lazo de control y el encendido de los quemadores. Es importante controlar que las válvulas reguladoras de presión de gas funcionen correctamente.
- 006 Quemadores del N°1 al N°8 (CO = Baja): se recomienda realizar una limpieza mensual en cada parada operativa para evitar problemas durante la operación.
- 007 Estructura y chimenea (CO = Media): se deben realizar inspecciones visuales para verificar la integridad estructural y realizar correcciones según sea necesario.
- 008 *Quench Scrubber* (CO = Baja): este equipo no requiere mayores tareas de mantenimiento, solo controles y tareas de limpieza periódicas. El desmontaje y limpieza del *demister* y boquillas se realiza en cada detención del horno. Esta limpieza con-
-

tribuye a la correcta operación del equipo para condensar los gases y en el mantenimiento del mismo.

- 009 KOP (CO = Baja): al igual que el anterior, requiere inspecciones y tareas preventivas de limpieza para mantener el equipo en buenas condiciones. En función del estado de las válvulas esféricas, se deberá prever el reemplazo de las mismas a medida que se desgasten.
- 010 Separador *Oil*-agua (CO = Baja): en este caso, se debe tener en cuenta reemplazar oportunamente los elementos sometidos a desgaste en la bomba neumática, además de una limpieza periódica de la pileta separadora.
- 011 Sistema de bombeo (CO = Baja): este equipo requiere los mantenimientos normales de un sistema de bombeo, centrando la atención en las cuatro bombas instaladas.
- 012 Aeroenfriador QS (CO = Media): este equipo posee una complejidad intermedia debido a sus elementos rotativos, lo que requiere tareas de monitoreo de su condición. Es fundamental, al finalizar el ciclo operativo, circular agua limpia por el interior del aeroenfriador para evitar la acumulación excesiva de sedimentos. Estos sedimentos, al secarse durante los períodos de inactividad, pueden ocasionar una reducción en el rendimiento debido a la obstrucción de los conductos. Se debe prestar especial atención al estado de las correas y poleas, así como realizar el engrase adecuado de los rodamientos. Además, se recomienda una limpieza periódica de las aletas exteriores para mantener el rendimiento óptimo del equipo. Se recomienda el uso de grasa de litio grado NLGI 2.
- 013 Aeroenfriador KOP (CO = Baja): este aeroenfriador es más sencillo que el anterior, dado que los motores y ventiladores están acoplados directamente, lo que resulta en menos componentes sujetos a desgaste. Sin embargo, al realizar el mantenimiento de los motores eléctricos, es necesario desmontar una gran parte del equipo, por lo que se propone llevar a cabo estas tareas cada dos años. Es crucial mantener limpio el serpentín de enfriamiento.
- 014 Tanques de agua (CO = Baja): para los tanques de agua, es importante realizar inspecciones en busca de fugas, ya sea en los propios tanques o en las válvulas esféricas.
-

cas. Además, se incluyen los mantenimientos necesarios para las bombas pequeñas utilizadas en el trasvase de agua.

- 015 IDF (CO = Alta): esta turbina de extracción de gases es un componente crítico para el proceso, por lo que se justifica la realización tanto de tareas predictivas como preventivas para garantizar su disponibilidad. Es importante mantenerla limpia para evitar desequilibrios y vibraciones no deseadas. Se recomienda tener en *stock* los rodamientos 22213 EK, ya que su adquisición no es inmediata en la zona. Además, se recomienda utilizar grasa Complex de aluminio de alta temperatura para su lubricación.
- 016 Arrestallamas (CO = Baja): este equipo, aunque es sencillo, requiere tareas de limpieza periódicas debido a su tendencia a ensuciarse fácilmente por el papel que desempeña dentro del proceso del horno.
- 017 Quemador Riello (CO = Alta): a pesar de ser similar a otros quemadores, este equipo es más compacto y requiere un poco más de tiempo para completar las tareas de mantenimiento.
- 018 Chimenea (CO = Baja): esta chimenea, al igual que las que se ubican encima del cilindro rotativo, requiere principalmente inspecciones periódicas para verificar su integridad estructural. Además, se debe verificar el funcionamiento de la termocupla de monitoreo con regularidad.
- 019 Alimentación de gas 2" (CO = Baja): este equipo comparte tareas similares con la cañería de 3", previamente especificada. La distinción radica en que esta cañería alimenta al quemador Riello.
- 020 *Air-excess* (CO = Baja): se trata de una turbina pequeña de baja complejidad que no requiere controles exhaustivos como los detallados en la tabla del plan. Es importante destacar que su funcionamiento no es continuo, sino que se enciende o se apaga según las necesidades operativas. Se recomienda utilizar grasa de litio grado NLGI 2.
-

- 021 Testo (gases) y Dynoptic (Particulado) (CO = Media): estos equipos son altamente sensibles a la suciedad, por lo que es crucial mantenerlos limpios y en óptimas condiciones. Los mantenimientos más exhaustivos son realizados por una empresa externa, que se encarga del cambio de componentes, calibración, entre otros.
- 022 *Air-lock* (CO = Alta): este equipo es crítico, ya que su mal funcionamiento detiene el proceso de desorción. Además, al estar en constante contacto con material caliente, experimenta un desgaste significativo y condiciones severas de trabajo. Con frecuencia, se detiene debido a atascos de pequeñas piedras, lo que afecta la cadena, piñón, caja reductora o motor. Es vital contar con los insumos necesarios para reparar rápidamente ambos componentes. Se recomienda el uso de lubricante SAE 80-90 para la caja reductora y grasa *Complex* de aluminio de alta temperatura.
- 023 Tornillo de descarga (CO = Alta): este equipo, al igual que el anterior, está constantemente en contacto con el material desorbido caliente, por lo que es crucial controlar el desgaste de los componentes, especialmente el helicoide del tornillo. Se recomienda verificar el correcto funcionamiento de la caja y realizar limpiezas en cada parada del horno. Se sugiere el uso de lubricante SAE 80-90 para la caja reductora y grasa *Complex* de aluminio de alta temperatura.
- 024 Tornillo *by-pass* (CO = Media): este equipo también sufre un desgaste significativo y requiere un control cuidadoso. Dado que opera en un ambiente cerrado, es importante limpiar el motor en cada parada mensual del horno. Se recomienda el uso de lubricante SAE 80-90 para la caja reductora y grasa *Complex* de aluminio de alta temperatura.
- 025 Compresores de aire (CO = Alta): los compresores son equipos complejos y vitales para el proceso. Se deben seguir las recomendaciones del fabricante y realizar mantenimientos periódicos adecuados. Además, se deben llevar a cabo mantenimientos mayores según las horas específicas de funcionamiento, que se registran mediante un horómetro. Es importante destacar que el mantenimiento de las válvulas, que se realiza cada 9000 horas, implica el reemplazo de *kits* que incluyen asientos y resortes. Estos *kits* deben ser solicitados directamente al fabricante del equipo o a
-

su representante en la zona. Se recomienda el uso de lubricante ISO VG 48 (Shell Corena) para los compresores y grasa *Complex* de aluminio de alta temperatura.

- 026 Generador de N<sub>2</sub> A-B (CO = Media): la criticidad de este equipo no es alta, pero los técnicos de la planta no poseen el conocimiento necesario para realizar los cambios preventivos recomendados por el fabricante. Por esta razón, se optará por tercerizar el mantenimiento mayor para este equipo. Además, se requiere una certificación legal debido a que son recipientes sometidos a presión, la cual se realiza con un proveedor externo.
- 027 Acumuladores (CO = Media): requieren tareas de limpieza y purga, y también necesitan una certificación legal debido a que son recipientes sometidos a presión, la cual se realiza con un proveedor externo.
- 028 Panel de control general (CO = Media): el panel de control original del horno es un equipo importante que no requiere tareas adicionales más allá de las detalladas en la tabla. Además, al estar dentro de la sala de control, está aislado del ambiente exterior.
- 029 Tableros eléctricos sala de control (CO = Media): estos activos ubicados dentro de la sala de control, requieren limpieza y reajustes de conexiones. Además, se debe contar con un *stock* de todos los componentes eléctricos que puedan fallar de manera imprevista.
- 030 Generador CETEC 425kVA (CO = Alta): este equipo se valora con una criticidad alta dentro del proceso debido a que afecta de forma directa a la disponibilidad del horno. Por lo tanto, se deben seguir las recomendaciones del fabricante y realizar correctamente los mantenimientos periódicos estipulados. Además, se deben incluir otras tareas que surgen de la experiencia de trabajar con este equipo en la planta. El control de tareas se rige tanto por una frecuencia de horas como por inspecciones semanales.
- 031 Contenedores (CO = Baja): este equipo no es crítico por lo cual se interviene principalmente de manera correctiva a medida que surgen las fallas.
-

## 6.5. Gestión de Mantenimiento

Para implementar la mejora continua en el proceso de mantenimiento es posible utilizar una variedad de herramientas y metodologías que, en el día a día, permiten optimizar la gestión del mantenimiento en la Empresa. En este caso, el enfoque se centra, por un lado, en la implementación del mantenimiento autónomo por parte de los operadores, un pilar fundamental del Mantenimiento Productivo Total (TPM, por sus siglas en inglés), y por otro lado, en la incorporación de un *software* GMAO (acrónimo de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador) para facilitar la administración del mantenimiento.

El TPM es una técnica que busca involucrar a los trabajadores responsables de operar los equipos de producción en el mantenimiento de los mismos (Suzuki, 1994). De esta manera, se estabilizan las condiciones y se ralentiza el proceso normal de deterioro. La base y el punto de partida de este tipo de mantenimiento es la limpieza profunda de los equipos, colocándolos en las mejores condiciones de operación posibles. La limpieza regular del equipo permite detectar fallos ocultos que afectan al rendimiento del mismo. Después de la limpieza, se continúa con tareas sencillas de inspección, engrase y lubricación rutinarias. De esta manera, se alivia la carga de trabajo del área de mantenimiento y se transfiere parte de esta carga al área operativa.

A partir de este punto, la eficiencia de la producción depende tanto de las actividades de producción como de mantenimiento. Por lo tanto, ambos departamentos deben colaborar estrechamente para alcanzar este objetivo. Tanto la prevención del deterioro de los equipos como las tareas de mantenimiento deben llevarse a cabo de forma simultánea.

El Departamento de Producción (con un enfoque de gestión autónoma), tiene asignadas las siguientes responsabilidades y tareas:

### 1. Prevención del deterioro:

- Operación adecuada del equipo.
  - Mantenimiento de las condiciones básicas de operación (limpieza, lubricación y engrase).
  - Reajustes apropiados.
  - Registro de datos de averías y defectos de funcionamiento.
-



- Búsqueda de mejoras.

2. Verificación del deterioro:

- Realizar inspecciones diarias y otras periódicas más exhaustivas.

Mientras que el Área de Mantenimiento (con un enfoque de mantenimiento preventivo planificado), se encarga de:

1. Mantenimiento periódico.
2. Mantenimiento predictivo.
3. Mejora de la mantenibilidad.
4. Verificación del deterioro.
5. Restablecimiento de las condiciones de los equipos.
6. Apoyo a los operarios para el mantenimiento autónomo.
7. Creación de estándares de mantenimiento.
8. Investigación y desarrollo en mantenimiento.

El objetivo general de los sistemas de información para la gestión del mantenimiento es proporcionar el medio de análisis para optimizar la gestión y facilitar la toma de decisiones estratégicas, tácticas y operativas. Entre los objetivos particulares se destacan cuatro básicos:

1. Ayudar a cumplir con la programación de las tareas de mantenimiento al recordar las fechas en las que corresponde realizar cada tarea.
  2. Planificar el aprovisionamiento de los recursos necesarios para completar las tareas, facilitando el control de *stock*.
  3. Facilitar la mejor utilización posible de los recursos.
  4. Optimizar y priorizar en base a históricos de los equipos.
-

Para llevar a cabo la implementación adecuada del *software* GMAO, resulta imperativo involucrar a toda la organización y estimular su participación, ya que de lo contrario, lo considerarán como un obstáculo más que como una herramienta. En este trabajo, se implementó el GMAO Consuman ([www.consuman.com](http://www.consuman.com)) comenzando por la carga del horno Vulcan. En la Figura 30 se presenta una captura de la pantalla del sistema, en la que se puede observar un ejemplo de la carga de un subsistema del horno.

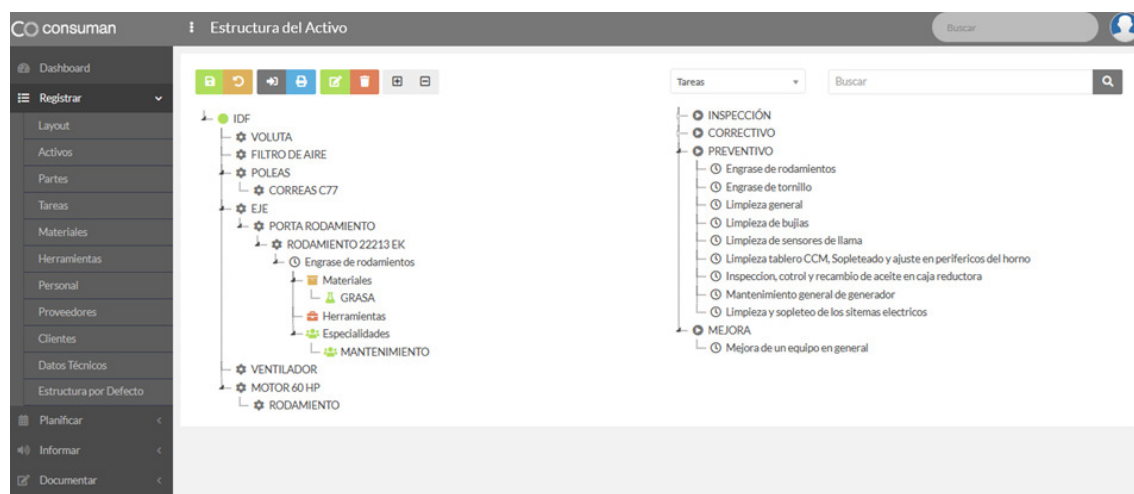


Figura 30. Carga del subsistema IDF y sus componentes.

Tras un lapso de tres meses, la carga de los activos y partes del horno en el sistema informático se encuentra prácticamente concluida, siendo necesarios realizar tareas adicionales en el corto plazo. En cuanto a la implementación, se ha notado un avance en el uso del *software* en el día a día de la planta, pero aún se requiere trabajar más con los supervisores de mantenimiento y de planta para que se acostumbren a esta nueva modalidad de trabajo.

Existen algunas dificultades en la planificación, dado que al no disponer de todos los equipos de la planta cargados, no se pueden formular solicitudes u órdenes de trabajo para activos que aún no se encuentran en el sistema, lo cual dificulta de manera parcial la implementación y uso del *software*.

Para mejorar los tiempos que se tardan en llevar a cabo las tareas de mantenimiento, es esencial disponer de un buen control y una adecuada gestión de reposición del *stock*. La implementación del control de *stock* a través de la plataforma GMAO posibilita la determinación de cuántos repuestos serán necesarios en un período temporal, puede ser

un año o menos, dependiendo de cada subsistema. En consecuencia, se debe considerar la duración de las demoras internas o del proveedor para efectuar estas compras.

Asimismo, como un primer paso para la administración adecuada del *stock*, se ordenó el depósito con el fin de que los insumos y repuestos puedan ser identificados de forma rápida. En la Figura 31 se presentan los sectores asignados para el almacenamiento de repuestos e insumos (ver el contraste con la Figura 22).

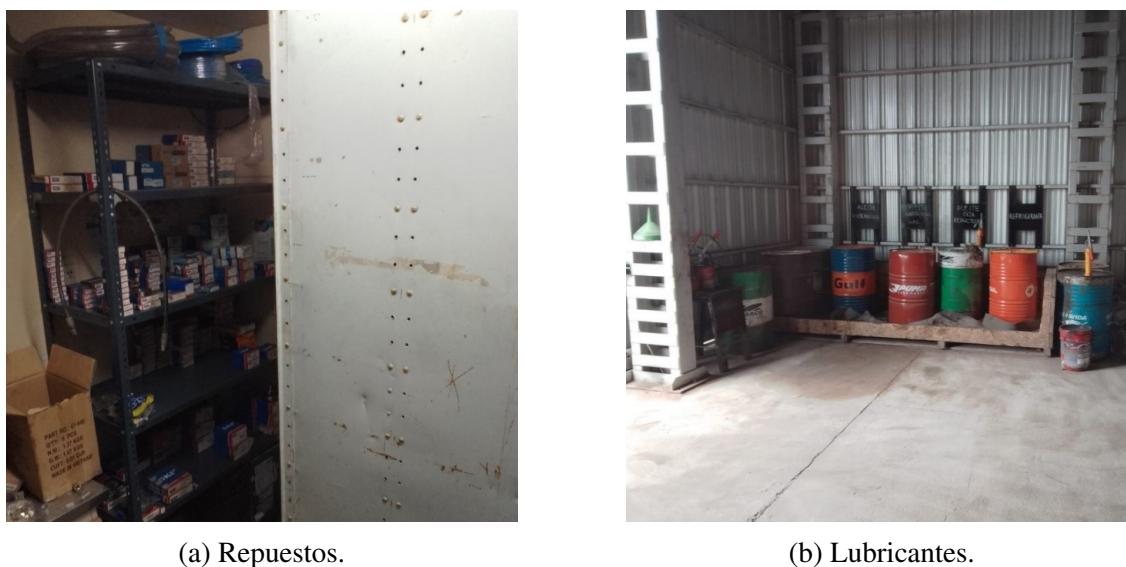


Figura 31. Adecuación de los sectores asignados para depósito de insumos y repuestos.

En el futuro, el trabajo en la planta debe continuar asegurando la inclusión de todos los sectores, sin perder de vista el objetivo a corto plazo de completar la implementación del horno Vulcan. Para lograr esto, se requiere lo siguiente:

- Supervisor de Operaciones: debe generar las solicitudes de trabajo a través de la plataforma.
- Supervisores de Mantenimiento: deben crear las órdenes de trabajo diarias, ya sean preventivas o correctivas.
- Personal de Mantenimiento: debe actualizar las órdenes de trabajo utilizando la aplicación móvil.
- Jefe de Mantenimiento: debe planificar y programar los mantenimientos preventivos para cada activo del horno.

Además, el personal de mantenimiento debe comenzar a realizar los *checklists* semanales directamente en la plataforma. También es importante continuar registrando el *stock* de materiales y repuestos en la base de datos.

## 6.6. Análisis Económico

El Análisis de Costos de Ciclo de Vida (ACCV) es una metodología integral que evalúa el costo total asociado con un producto o proyecto a lo largo de su vida útil. Este análisis incluye no solo los costos iniciales de adquisición o fabricación, sino también los costos de operación, mantenimiento, y disposición final.

### 1. Costos Iniciales:

- Adquisición: compra, instalación, diseño y desarrollo.
- Capitalización: financiamiento y seguros iniciales.

### 2. Costos Operativos:

- Energía y recursos: uso de electricidad, agua, gas, entre otros.
- Operación: mano de obra y otros gastos operativos.

### 3. Costos de Mantenimiento:

- Mantenimiento Preventivo: inspecciones y tareas rutinarias para evitar fallos.
- Mantenimiento Correctivo: reparaciones necesarias después de una falla.
- Actualizaciones y Mejoras: mejoras tecnológicas y de eficiencia.

### 4. Costos de Fin de Vida:

- Desmantelamiento: retiro y eliminación del activo.
- Reciclaje y disposición: procesos para desechar o reciclar materiales.

Una parte crucial de este análisis son los costos de mantenimiento, que pueden tener un impacto significativo en el costo total de adquisición y operación. A continuación, se explora en detalle el ACCV y la importancia de los costos de mantenimiento.

---

---

En mantenimiento, el análisis de costos que se deberá realizar, luego de implementar el plan de mantenimiento desarrollado, consiste en comparar el costo de la pérdida de producción cuando ocurre una falla (lucro cesante) contra los costos que implica realizar un mantenimiento más exhaustivo y emplear más recursos.

Se debe buscar el punto de equilibrio donde se igualen los costos de tiempo perdido por falta de producción (*downtime*) con los costos totales implicados en mantenimiento. En teoría, a mayor inversión en mantenimiento, menor será la cantidad de fallas en los equipos y viceversa. Un indicador útil para evaluar los equipos en estos términos es la Confiabilidad.

Para el área de mantenimiento, son de particular interés aquellas decisiones relacionadas con el proceso de mejoramiento del factor Confiabilidad, asociado a: calidad del diseño, tecnología utilizada, complejidad técnica, frecuencia de fallos, costos de mantenimiento preventivo/correctivo, niveles de mantenibilidad y accesibilidad. Estos aspectos tienen una gran influencia sobre el costo total del ciclo de vida del activo e influyen en gran medida sobre las posibles expectativas para extender la vida útil de los sistemas de producción a costos razonables.

Con el objetivo de cuantificar la mejora respecto a los costos de mantenimiento, se realizó un cálculo de los Costos de Indisponibilidad por Fallos (CIF). Este indicador mide el impacto económico causado por los efectos de un modo de fallo en un período de tiempo específico, y viene dada por la siguiente expresión:

$$\text{CIF} = \text{FF} \times \text{MDT} \times (\text{CD} + \text{CP}) \quad (6)$$

Donde:

- **FF**: frecuencia de fallas en un determinado período de tiempo.
  - **MDT**: tiempo promedio fuera de servicio.
  - **CD**: costos directos de corrección por fallo por hora (incluye mano de obra y materiales).
  - **CP**: costos de penalización por hora (costo de pérdida por lucro cesante).
-

Este índice fue cuantificado en dólares, aunque en una primera iteración se aproximó debido a la falta de valores específicos para algunos componentes, así como la falta de exactitud en el valor del MTBF para cada una de las fallas.

Durante los últimos meses de trabajo, con la implementación de mejoras y tareas de mantenimiento adicionales en el horno, se observó una disminución en la frecuencia de fallas de los diferentes sistemas. Como consecuencia, se registró un aumento en la disponibilidad global del horno. Este aumento en la disponibilidad ha llevado a una reducción en las pérdidas por lucro cesante.

El cálculo del CIF para un período semestral antes de aplicar el MGM y para el mismo período posterior a la aplicación del modelo se puede consultar en la plantilla de Excel “Análisis Económico”<sup>4</sup>. Para poder realizar este cálculo se estimaron algunos valores de materiales y tiempos de reparación para fallas habituales, ya que no existen datos precisos de donde obtener la información. Luego de la implementación del nuevo plan se pudo alcanzar un ahorro del 44 %.

## **6.7. Análisis de los Resultados**

Mediante el desarrollo de este trabajo, se pudo corroborar que la gestión efectiva de prioridades es un factor crucial para asegurar la eficiencia y la seguridad en las operaciones. Una estrategia que ha demostrado ser efectiva es la adopción de un enfoque basado en la criticidad y el riesgo. Este método implica una evaluación meticulosa del potencial impacto de cada tarea en aspectos críticos como la seguridad, la producción y la calidad del producto final. Aquellas tareas que representan un riesgo mayor o tienen un impacto significativo en estos aspectos deben ser priorizadas, independientemente de si son correctivas o preventivas.

Sin embargo, la implementación exitosa de esta estrategia requiere más que simplemente asignar prioridades según la criticidad. La cultura organizacional y la comunicación efectiva entre los diferentes departamentos involucrados en el proceso de mantenimiento son igualmente importantes. Es fundamental que exista una comprensión compartida sobre la importancia de las actividades preventivas y que se fomente una mentalidad de

---

<sup>4</sup><https://www.dropbox.com/scl/fi/a8gf1p0k6a3wu1qnkfm4j/An-lisis-Econ-mico.xlsx?rlkey=7k39wlgpa2gv1qnkeb0blihf&st=jet28in9&dl=0>

---

trabajo en equipo orientada hacia la consecución de los objetivos de mantenimiento y producción.

Durante los últimos meses del año 2022 y principios del 2023, se observaron mejoras significativas en la planificación de las detenciones programadas del horno. Esto permitió la implementación e inclusión de varias tareas del plan de mantenimiento, así como una aplicación más rigurosa de las tareas de mantenimiento autónomo por parte de los operadores. Estas mejoras se tradujeron en resultados tangibles, como se refleja en la Figura 32, donde se muestra la disponibilidad global del horno. Durante la mayoría de estos seis meses, se superó el objetivo principal del 90 % de disponibilidad establecido por la gerencia, lo que demuestra el éxito de la estrategia implementada.

En resumen, para evitar desviaciones en la planificación de mantenimiento y optimizar la gestión de prioridades en el ámbito industrial, es esencial adoptar un enfoque integral que considere tanto la criticidad de las tareas como la eficiencia operativa. Esto requiere el apoyo de herramientas tecnológicas y la promoción de una cultura organizacional orientada hacia la excelencia en el mantenimiento. Los resultados obtenidos durante el período mencionado son un testimonio del impacto positivo que puede tener esta estrategia cuando se implementa de manera efectiva y se integra en la cultura y en las prácticas operativas de la Empresa.

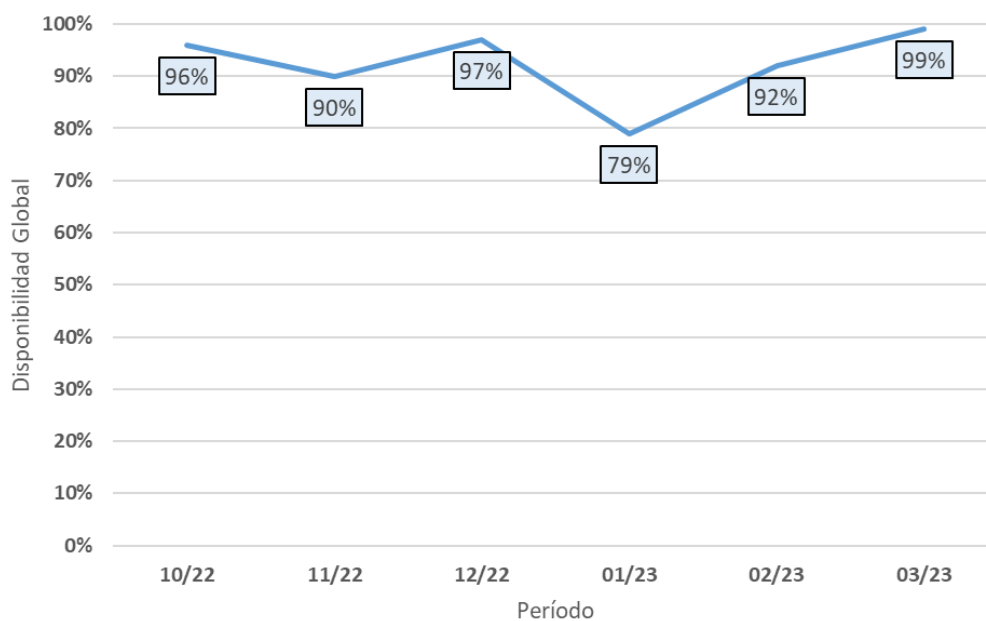


Figura 32. Evolución de la Disponibilidad Global del horno Vulcan.

## 7. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Para continuar avanzando en la mejora continua de la gestión del mantenimiento y optimizar la operación del horno a lo largo del tiempo, se pueden considerar las siguientes líneas de trabajo:

1. Es importante optimizar el indicador de disponibilidad, pasando de un valor global a uno por sistema, además de incluir otros KPIs relevantes para la toma de decisiones.
  2. Desarrollar un programa de capacitaciones dirigido al personal de mantenimiento y operadores en aspectos clave de mantenimiento industrial, como indicadores de gestión, control de *stock*, análisis de causa raíz de fallas, entre otros, para mejorar sus capacidades y conocimientos.
  3. Realizar una evaluación del tiempo requerido para cada tarea y programarlas a lo largo del año de manera inteligente, evitando superposiciones durante las detenciones operativas del horno.
  4. Realizar un análisis de costos detallado para evaluar la eficiencia en el uso de los recursos destinados al mantenimiento de los equipos.
  5. Finalizar la implementación del sistema GMAO para optimizar la gestión del mantenimiento.
  6. Mantener actualizado los planes de mantenimiento, dado que no son estáticos y deben ajustarse continuamente a medida que se implementan, considerando el tiempo real que llevan las tareas y optimizando su eficacia.
  7. Considerar la implementación de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en los equipos más críticos para obtener tareas de mantenimiento más detalladas y efectivas.
  8. Anticiparse, con un enfoque proactivo a los futuros requerimientos de mantenimiento a medida que los equipos alcancen horas de uso más elevadas, contemplando un desgaste natural de los componentes y asegurando su correcta operación y uso.
-



## 8. CONCLUSIONES

El Proyecto Integrador Profesional (PIP) se completó con éxito, logrando los objetivos generales y específicos establecidos inicialmente. Lo que comenzó como una pasantía centrada en la implementación de un *software* GMAO se convirtió en un profundo desarrollo personal en el ámbito del mantenimiento industrial de una planta de tratamiento de residuos petroleros. Durante este proceso, se evidenció la complejidad de gestionar el mantenimiento en un entorno operativo real, donde a menudo se deben administrar recursos limitados.

Las directrices del Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM) se aplicaron de manera satisfactoria, aunque algunas de ellas no pudieron completarse totalmente debido a la falta de información y datos detallados para análisis más exhaustivos. Sin embargo, los resultados de la gestión se reflejaron en un aumento significativo de la disponibilidad general del horno y, como consecuencia, en una reducción de las pérdidas por lucro cesante.

El relevamiento de datos y análisis de los equipos resultó crucial, y se enfrentó a la dificultad de la falta de documentación en la empresa. La participación activa del personal directamente involucrado en el proceso productivo fue fundamental para recopilar el historial de cada subsistema. Asimismo, la disposición y apoyo de la gerencia fueron clave para disponer del tiempo y recursos necesarios para desarrollar el PIP en el contexto laboral, incluyendo el plan de mantenimiento.

Además de los logros técnicos, este trabajo me permitió el desarrollo y consolidación de habilidades personales como comunicación, trabajo en equipo, planificación, resolución de problemas, liderazgo y flexibilidad, fundamentales para una interacción efectiva en un entorno laboral desafiante.

---

## 9. REFERENCIAS

- ISO 55000. (2015). *Asset Management*. International Organization for Standardization.
- Márquez, A., de León, P., & Herguedas, A. (2004). *Ingeniería de mantenimiento. Técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. AENOR.
- Mobley, R. K. (2004). *Maintenance fundamentals*. Elsevier Butterworth Heinemann.
- Moubray, J. (2001). *Reliability-centered Maintenance*. Industrial Press.
- Palmer, R. (2005). *Maintenance Planning and Scheduling Handbook*. Mcgraw-hill.
- Pistarelli, A. (2012). *Manual de Mantenimiento, Ingeniería, Gestión y Organización*. Buenos Aires.
- Sola Rosique, A., & Crespo Márquez, A. (2016). *Principios y marcos de referencia de la gestión de activos*. AENOR INTERNACIONAL, S.A.U.
- Suzuki, T. (1994). *TPM in Process Industries*. Taylor & Francis.
- Werner, A. K., Vink, S., Watt, K., & Jagals, P. (2015). Environmental health impacts of unconventional natural gas development: A review of the current strength of evidence. *Science of The Total Environment*, 505, 1127-1141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.084>
- Wireman, T. (2001). *Desarrollo de indicadores de desempeño para administración de mantenimiento*. Rojas Eberhard Editores.
-