



Universidad Nacional de San Luis
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

***“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN
DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO A TURBINA
TAURUS 70”***

María Macarena Rodrigo

Trabajo final de Ingeniería Electromecánica

Director:

Ing. Sanjurjo, Waldo

Co-director Técnico:

Ing. Chiecher, Nahuel.

Empresa:

Cargill, Villa Mercedes (San Luis)

2024



Universidad Nacional de San Luis
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

DERECHO DE AUTOR

© 2024 María Macarena Rodrigo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento



RESUMEN

El trabajo final de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Nacional de San Luis se centra en diseñar una estrategia de mejora del plan de mantenimiento preventivo, motivada por la inesperada rotura de una turbina de gas en la planta de Cargill Villa Mercedes, lo que generó altos costos de reparación y compra de energía. La experiencia en mantenimiento mecánico en planificación y confiabilidad fue crucial para este trabajo, especialmente en el sector de Servicios Auxiliares que incluye turbinas generadoras de electricidad. Estas turbinas son vitales para la producción de energía eléctrica, por lo que es esencial un plan de mantenimiento adecuado para asegurar su funcionamiento y prolongar su vida útil.

El mantenimiento preventivo, realizado de manera programada, incluye inspecciones, limpieza, lubricación y ajustes para detectar y solucionar problemas antes de que se conviertan en fallas graves. Un análisis exhaustivo de las condiciones operativas, incluyendo vibración, temperatura y presión, junto con inspecciones visuales y revisiones de los sistemas de control y protección, es fundamental. La limpieza regular para eliminar suciedad y residuos, así como la lubricación adecuada, son esenciales para mantener la eficiencia de la turbina. Además, la capacitación del personal en técnicas y normas de seguridad es muy importante.

En resumen, un plan de mantenimiento preventivo efectivo es vital para garantizar el óptimo funcionamiento y prolongar la vida útil de las turbinas generadoras de electricidad, asegurando eficiencia y confiabilidad en la generación de energía.

Palabras claves: Turbina – Mantenimiento – Preventivo



ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	3
Índice de contenido.....	4
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	7
1. CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Glucovil Argentina S.A.....	9
1.2 Historia de la Molienda Húmeda.....	10
1.3 La Molienda Húmeda en la Argentina.....	11
1.4 Experiencia personal en Cargill.....	13
1.5 Objetivos	14
1.6 Alcances	14
1.7 Limitaciones.....	15
2. CAPÍTULO 2: INFORMACIÓN OBTENIDA.....	16
2.1 Conceptos básicos.....	16
2.2 El Proceso Productivo.	19
2.2.1 El grano de Maíz.....	19
2.2.2 Estructura y Composición.....	19
2.2.3 La molienda Húmeda de Maíz.....	23
2.2.4 Maceración.....	29
3 CAPÍTULO 3: CONCEPTOS TEÓRICOS	31
3.1.1 Descripción de la turbina	31
3.1.2 Partes de la turbina	34
3.2 Mantenimiento de turbina	36
3.2.1 Mantenimiento preventivo.....	37
3.3 Descripción del problema	38



4 CAPÍTULO 4: DESARROLLO	43
4.1 Desarrollo del plan preventivo.....	43
4.1.1 Objetivo General	43
4.2 Metodología.....	43
4.3 Plan de trabajo	44
4.4 Consideraciones y recursos requeridos	47
4.5 Insumos, horas hombre y equipos necesarios.....	50
4.5.1 Insumos requeridos	50
4.5.2 Horas Hombre requeridas	51
4.5.3 Equipos necesarios	53
4.6 Cronograma y tiempos de ejecución.....	54
4.7 Costos detallados	56
5 CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	59
Anexo.....	61
Bibliografía	63



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig1 Glucovil Argentina S.A.....	9
Fig. 2 Cadena de valores del maíz en Argentina 2019.....	12
Fig. 3 Producción de la industria del maíz por sector.....	12
Fig. 4 Interfaz gráfica módulo PM SAP	17
Fig. 5 Organización del mantenimiento	17
Fig. 6 Sección transversal del grano de maíz.....	20
Fig. 7 Principales componentes del maíz	22
Fig. 8 Proceso de molienda humana	23
Fig. 9 Molino de disco.....	24
Fig. 10 Diagrama de un hidrociclón.....	24
Fig. 11 Tamiz para separación de fibra.....	25
Fig. 12 Prensa de germen	25
Fig. 13 Molino fino de pernos	26
Fig. 14 Separadora centrífuga.....	27
Fig. 15 Filtro de vacío rotativo	27
Fig. 16 Molienda húmeda	27
Fig. 17 Diagrama de turbina.....	33
Fig. 18 Fotografía de boroscopia	37
Fig. 19 Partes de turbina Taurus 70.....	38
Fig. 20 Línea temporal	40



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1 Costos.....	40
-----------------------	----



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El siguiente informe corresponde al trabajo final de grado del plan de estudios de la carrera Ingeniería Electromecánica CD 019/12 de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agronómicas (FICA) de la Universidad Nacional de San Luis (UNSL).

El objetivo del presente es diseñar una estrategia de mejora de plan de mantenimiento preventivo, motivado por la inesperada rotura de una de las turbinas en la planta de Glucovil. Incluyendo también un análisis de costos ocasionados por la inoportuna rotura versus el costo de implementación del nuevo plan de mantenimiento, así como el costo de la energía comprada debido a la imposibilidad de generar electricidad y vapor.

La experiencia personal en mantenimiento mecánico en el área de planificación, programación y confiabilidad tuvo mucha incumbencia en el sector de Servicios Auxiliares el cual comprende las turbinas generadoras de electricidad, donde desempeñé tareas de planificación y supervisión en dicha área.

Las turbinas son piezas clave en la producción de energía eléctrica, por lo que es fundamental tener un plan de mantenimiento adecuado para asegurar su correcto funcionamiento y prolongar su vida útil. El mantenimiento preventivo es esencial para evitar posibles fallas y averías en todos los equipos. Consiste en realizar inspecciones periódicas, limpieza, lubricación y ajustes necesarios para mantenerlas en óptimas condiciones. Este tipo de mantenimiento se lleva a cabo de manera programada, siguiendo un calendario establecido, y tiene como objetivo detectar y solucionar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas mayores.

En un plan de mantenimiento preventivo para turbinas generadoras de electricidad, se deben considerar diferentes aspectos. En primer lugar, es importante realizar un análisis exhaustivo de las condiciones de operación de la turbina, incluyendo la revisión de los registros de funcionamiento, los niveles de



vibración, la temperatura y la presión. Esto nos permitirá identificar posibles desviaciones y tomar acciones correctivas de manera oportuna.

Además, es necesario llevar a cabo inspecciones visuales para verificar el estado de los componentes de la turbina, como las cuchillas, los álabes, sellos y rodamientos. También se deben revisar los sistemas de control y protección para garantizar su correcto funcionamiento. En caso de encontrar algún desgaste o daño, se deben realizar las reparaciones o reemplazos correspondientes. El plan de mantenimiento preventivo también debe incluir la limpieza regular de la turbina, tanto interna como externamente. Es importante eliminar cualquier acumulación de suciedad, aceite o residuos que puedan afectar su rendimiento.

La acumulación de suciedad, polvo y otros contaminantes puede afectar el rendimiento de la turbina y reducir su eficiencia. Por ello, es necesario llevar a cabo una limpieza regular de las aspas, los conductos de aire y otros componentes, utilizando métodos y productos adecuados para evitar daños. Asimismo, se deben realizar labores de lubricación en los puntos necesarios para evitar el desgaste prematuro de los componentes.

Otro aspecto relevante en el plan de mantenimiento, es la capacitación y entrenamiento del personal encargado de llevar a cabo las labores de inspección y mantenimiento. Es fundamental que estén familiarizados con las técnicas y procedimientos adecuados, así como con las normas de seguridad correspondientes.

En resumen, un plan de mantenimiento preventivo adecuado para las turbinas generadoras de electricidad es esencial para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil. Realizar inspecciones periódicas, limpieza, lubricación y ajustes necesarios son algunas de las tareas clave que se deben llevar a cabo. Ya que una turbina bien mantenida es sinónimo de eficiencia y confiabilidad en la generación de energía eléctrica.



DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

1.1 Glucovil Argentina S.A.

El trabajo realizado se encuadra con la modalidad “B” según Ordenanza C.D. 002/2018, el cual se llevó a cabo en Glucovil Argentina S.A. ahora llamado *Cargill Villa Mercedes*, que se encuentra en el Paraje El Dique, sobre la ruta interfábricas, dentro del parque industrial de Villa Mercedes San Luis.

La fábrica se instaló en el año 1983 como parte del grupo Ledesma de la familia Blaquier y era capaz de moler 150 toneladas de maíz por día. Hacia fines del año 2008, a partir de una asociación estratégica entre dos compañías líderes y de vasta experiencia en el negocio de la molienda húmeda de maíz: Ledesma y Cargill, la empresa fue aumentando su capacidad hasta llegar a procesar 1200 toneladas de maíz por día. En esta sociedad, Cargill participa con el 70% del capital social y Ledesma con el 30% restante. A partir del año 2021 Cargill pasa a ser el único propietario de Glucovil.

Los productos elaborados por Cargill satisfacen los más elevados estándares de calidad, ya que cuenta con procesos estandarizados y certificados conforme a los lineamientos de la norma ISO 9001 y avalados por un sistema reconocido por el GSFI – Global Food Safety Initiative – que prioriza aspectos de inocuidad.

Cargill Villa Mercedes se dedica a la elaboración de diversos productos para la industria de alimentos para humanos y animales en general como: Jarabe de fructosa, Jarabe de Glucosa, Jarabes mezcla, Jarabe de alta maltosa, Harina de Germen, Aceite de Maíz, Gluten feed, Gluten meal, Almidones simples y Almidones modificados. Todos estos productos se obtienen a partir de un proceso fisicoquímico llamado molienda húmeda de maíz.



Fig. 1. Glucovil Argentina. Fuente: <https://acortar.link/pc0mFt> Fecha: 2020

1.2 Historia de la Molienda Húmeda

El descubrimiento de que el almidón puede ser transformado en sustancias edulcorantes data de principios del siglo pasado, pero recién tuvo aplicación industrial alrededor de 1950.

La producción de jarabe de fructosa de primera generación (fructosa 42) comenzó en 1977 y la elaboración de fructosa 55 se inició en 1981. Los procesos fueron originalmente desarrollados en EE.UU y Japón; al poco tiempo de su invención, se realizó la aplicación en el ámbito nacional, instalándose las fábricas.

Las inversiones fueron muy importantes entre 1980 y 1985, poniendo en marcha toda la producción de fructosa de segunda generación y con ampliaciones en otras líneas. En los años recientes se han realizado importantes inversiones, que permitieron un fuerte incremento de la capacidad instalada.

Los orígenes de la industria de la molienda húmeda de maíz se remontan al año 1842, cuando el americano Thomas Kingsford comenzó con la fabricación de almidón de maíz a nivel industrial. Con anterioridad, el almidón nativo se obtenía a partir de trigo y papa. Hacia el año 1860 una cantidad substancial de almidón era producido por pequeñas plantas distribuidas a lo largo de los EE.UU y noroeste de Europa. En 1890 ya el maíz había reemplazado al trigo y a la papa como la fuente principal de almidón. En consecuencia, la industria de refinación de maíz tuvo un crecimiento continuo además de diversificarse y transformarse en la compleja planta de procesamiento que es hoy en día. El desarrollo de esta industria ha sido enorme no solo a nivel mundial sino también, local.



Aunque el proceso de molienda húmeda se diseñó originalmente para producir almidón para uso industrial y alimenticio, en la actualidad, la meta es encontrar un óptimo en la eficiencia del proceso para el cual exista un máximo en la separación de cada fracción del grano de maíz. Las mejoras en el rendimiento y la calidad de los productos de la molienda se suceden constantemente en respuesta a necesidades del consumidor, requerimientos nutritivos de animales de granja, como también al desarrollo de nuevas tecnologías.

1.3 La Molienda Húmeda en Argentina

La producción argentina de maíz ha tenido como destino tradicional la exportación como grano forrajero, ya sea como tal o bien para la elaboración de alimentos balanceados, aunque en los últimos años cierta cantidad de la producción ha sido destinada a la industria molinera, sea ésta de molienda seca o húmeda. De la primera de ellas se obtienen principalmente harina de maíz para polenta, sémolas de distinta granulometría y endosperma partido o grits para la industria cervecera y elaboración de alimentos para desayuno.

La molienda húmeda es fuente de gran diversidad de productos, siendo este proceso más complejo que el anterior. Si bien el principal producto de la molienda húmeda es el almidón, otros subproductos de interés tecnológico y alimenticio son el gluten feed y el gluten meal. Estos últimos se destinan a exportación para la elaboración de alimentos balanceados. El aceite de maíz, obtenido a partir del germen, es otro de los subproductos importantes, siendo la industria de la molienda húmeda su principal fuente. El almidón de maíz no solamente se comercializa como tal, sino que también se destina para la elaboración de dextrinas, jarabes y alcohol combustible. En los últimos años también está cobrando importancia la utilización del almidón de maíz como materia prima en la preparación de polímeros especiales para la industria del plástico. Estos materiales, mezclados con otros similares de la industria petroquímica, tienen la ventaja de ser biodegradables y renovables.

En Argentina, la molienda húmeda de cereales comenzó a operar en 1928, a través de la empresa Refinerías de Maíz, hoy Ingredion, en su planta de Baradero. Hacia 1942 se agregó la firma Molinos Juan Semino, productora de almidón de trigo y en la década de 1950 Glutal, produciendo inicialmente almidones de trigo y luego de maíz. En 1961 comenzó Arcor a producir glucosa



en Arroyito (Córdoba) y en 1968 Georgalos, en Río Segundo. Staley se instaló en Chacabuco en 1971, transfiriendo la planta a Industrias de Maíz cuatro años más tarde. Por la misma época Arcor instaló una subsidiaria en Tucumán, Misky, elaboradora de almidones y glucosa.

La última empresa que se instaló fue Glucovil en Villa Mercedes (San Luis), en 1983. En 1988 surgió Delmaíz, continuadora de Georgalos. Argentina cuenta con una línea de producción (como es la fructosa de segunda generación) que sólo se halla desarrollada en muy pocos países en el mundo.

En la actualidad, la producción mundial de maíz alcanza las 6×10^8 toneladas. Los principales productores son Estados Unidos y China, con cantidades que superan las 1.5×10^8 toneladas. En nuestro país la producción anual es del orden de 40×10^6 toneladas (Secretaría de agroindustria, 2019).

Particularmente en la Argentina, la molienda húmeda está por encima a la molienda seca en niveles de producción anual.

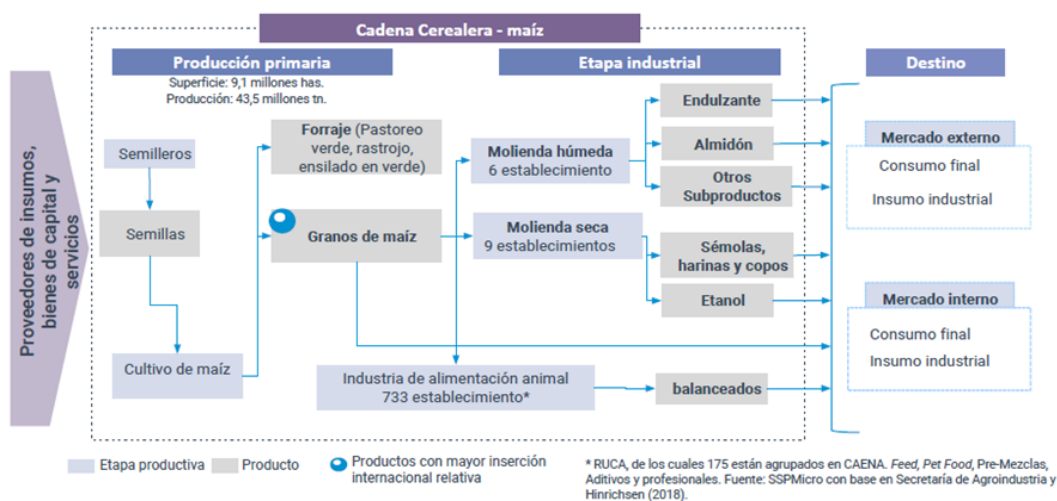


Fig. 2. Cadena de valores del maíz en Argentina 2019.

Fuente: <https://acortar.link/WVBY1a>

El consumo local de maíz destinado a la molienda húmeda es del orden de $1,2 \times 10^6$ toneladas por año y va en aumento. La razón de esta importante demanda de almidón es el bajo precio del producto, junto con la diversidad y adaptabilidad a una gran cantidad de procesos industriales que van desde la industria alimenticia y farmacéutica, hasta las de adhesivos y papeleras.

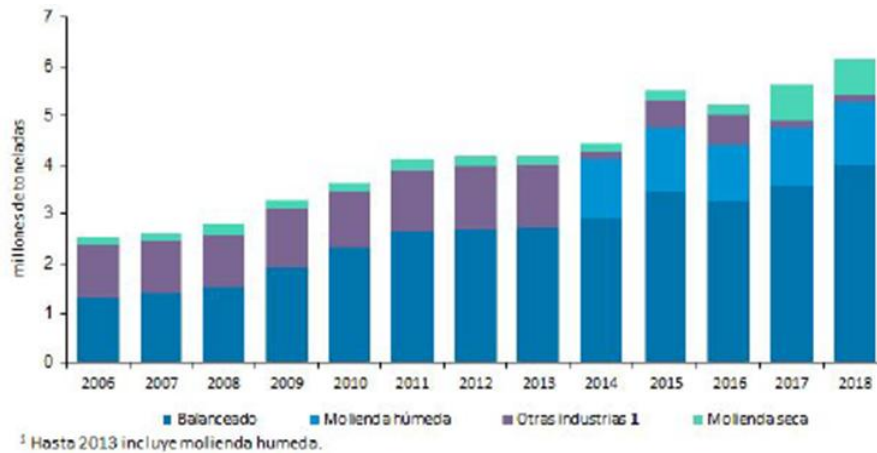


Fig. 3. Producción de la industria del maíz por sector Fuente: <https://acortar.link/WVBY1a>

1.4 Experiencia personal en Cargill

Cargill Villa Mercedes ha sido el lugar de trabajo desde el 11 de enero de 2021. Desde el comienzo, diversas tareas fueron cumplidas como trabajo inicial, en el área de mantenimiento mecánico. Este departamento tiene la responsabilidad de asegurar la mayor confiabilidad de los equipos necesarios para la producción de los diversos derivados del maíz, respetando las normativas de seguridad e inocuidad vigentes en la planta. El área de mantenimiento es considerada un servicio al núcleo productivo y está dividida en tres sectores: mantenimiento mecánico, mantenimiento eléctrico e instrumentación.

Durante estos años, en el sector de mantenimiento mecánico se llevaron a cabo tareas de programación, planificación y supervisión. En ocasiones, se considera necesario aplicar mejoras al proceso con el objetivo de optimizar la productividad de la planta, y el caso presentado en este informe corresponde a este tipo de mejoras.

En el área de Servicios Auxiliares, fue asumida la responsabilidad de asegurar que las turbinas generadoras de electricidad estuvieran en óptimas condiciones. Para alcanzar este objetivo, la planificación y programación del mantenimiento mecánico se consideraron factores clave.

La confiabilidad de las turbinas dependía directamente del mantenimiento preventivo y correctivo realizado. Por lo tanto, se consideró



fundamental establecer planes de mantenimiento periódico que permitieran detectar cualquier falla o problema potencial antes de que ocurriera.

Además, la adecuada programación del mantenimiento mecánico garantizaba una mayor disponibilidad de las turbinas, reduciendo los tiempos muertos y maximizando su rendimiento energético. De este modo, se logró producir más electricidad con un menor consumo de combustible y menores costos operativos.

Otro aspecto importante en la planificación del mantenimiento mecánico fue la gestión eficiente de los recursos humanos y materiales necesarios para llevar a cabo las tareas. Se tuvo en cuenta la disponibilidad del personal técnico especializado, así como la disponibilidad de herramientas y repuestos necesarios.

En resumen, la experiencia personal en el área de Servicios Auxiliares permitió comprender la importancia crítica del mantenimiento mecánico en las turbinas generadoras de electricidad. La planificación, programación y confiabilidad se consideraron factores determinantes para lograr una operación eficiente y rentable en este sector.

1.5 Objetivos

OBJETIVO GENERAL: Diseñar un plan de mantenimiento preventivo que garantice el óptimo funcionamiento de las turbinas de la empresa Cargill Villa Mercedes, asegurando la continuidad operativa, la seguridad, y la eficiencia en la generación eléctrica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

□ Establecer una colaboración efectiva entre los pilares de mantenimiento autónomo y mantenimiento planificado que asegure el correcto funcionamiento de las turbinas.

□ Crear un sistema de mantenimiento preventivo a través de planes en el software SAP utilizado en la planta, que sea robusto y adaptable a las necesidades operativas de la empresa.

□ Evaluar la efectividad de las acciones implementadas mediante el seguimiento de indicadores clave (KPIs), como las paradas programadas, el



cumplimiento de tiempos planificados y el ahorro de costos, para medir el impacto de las mejoras en el rendimiento del mantenimiento.

1.6 Alcances

- El plan de mantenimiento se enfocará específicamente en las turbinas de la planta Cargill Villa Mercedes, abarcando tanto la planificación como la ejecución del mantenimiento preventivo.

- Se incluirá la capacitación del personal, la adquisición de herramientas y repuestos críticos, así como la integración del plan en el sistema de gestión de mantenimiento (SAP).

- El proyecto contemplará un análisis exhaustivo de las condiciones operativas actuales, identificando fallos recurrentes y áreas críticas que requieren atención prioritaria.

- El plan cubrirá desde tareas básicas de inspección y limpieza hasta la supervisión de componentes clave y la implementación de mejoras continuas.

1.7 Limitaciones

- El éxito del plan de mantenimiento preventivo depende en gran medida de la disponibilidad de recursos financieros para la adquisición de repuestos y herramientas especializadas.

- La implementación efectiva del plan está sujeta a la cooperación y coordinación con otros departamentos, como producción y logística, lo cual puede ser un desafío en situaciones de alta demanda operativa.

- La disponibilidad de personal capacitado puede ser una limitante, especialmente si se requiere formación adicional para manejar nuevas tecnologías o procedimientos.

- El tiempo necesario para la integración y validación del plan dentro del sistema SAP puede ser mayor al previsto, afectando los plazos de implementación.



CAPÍTULO 2: INFORMACIÓN OBTENIDA

DESCRIPCIÓN DEL SECTOR MANTENIMIENTO

2.1 Conceptos Básicos

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

A lo largo del proceso industrial vivido desde finales del siglo XIX, la función *mantenimiento* ha pasado diferentes etapas. En los inicios de la revolución industrial, los propios operarios se encargaban de las reparaciones de los equipos. Cuando las máquinas se fueron haciendo más complejas y la dedicación a tareas de reparación aumentaba, empezaron a crearse los primeros departamentos de mantenimiento, con una actividad diferenciada de los operarios de producción.

Las tareas en estas dos épocas eran básicamente correctivas, dedicando todo su esfuerzo a solucionar las fallas que se producían en los equipos.

A partir de la Primera Guerra Mundial, de la Segunda y sobre todo tras atravesar una grave crisis energética en 1973, empieza a concebirse el concepto de fiabilidad. La aviación y la industria automovilística lideran esta nueva corriente. Se desarrollan nuevos métodos de trabajo que hacen avanzar las técnicas de mantenimiento en varias vertientes:

- Robustez del diseño, a prueba de fallos y que minimice las actuaciones de mantenimiento.
- Mantenimiento por condición, como alternativa al mantenimiento sistemático. Aparece el mantenimiento predictivo.
- En el análisis de fallos, tanto los que han ocurrido como los que tienen una probabilidad tangible de ocurrir (fallos potenciales). Se desarrolla un Mantenimiento basado en Fiabilidad o RCM. El RCM como estilo de



gestión de mantenimiento, se basa en el estudio de los equipos, en análisis de los modos de fallo y en la aplicación de técnicas estadísticas y tecnología de detección. Se podría afirmar que RCM es una filosofía de mantenimiento básicamente tecnológica.

- En el uso de la informática para el manejo de todos los datos que se emplean ahora en mantenimiento: órdenes de trabajo, gestión de las actividades preventivas, gestión de materiales, control de costes, etc. Se busca tratar todos estos datos y convertirlos en información útil para la toma de decisiones.
- Aparece el concepto de GMAO (Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador), también denominado GMAC (Gestión del Mantenimiento Asistido por Computadora) o CMMS (Computerised Management Maintenance System).

En su momento, Glucovil migró su sistema GMAO desde Mantec al módulo PM de SAP con el ingreso de Cargill al negocio.

El sistema SAP permite ingresar a una base de datos pedidos de trabajo, por parte de inspectores de planta o personal de producción. Estos pedidos son evaluados por un planificador de mantenimiento que se encargará de conseguir los recursos necesarios para realizar la tarea y luego convertir cada pedido de trabajo en una orden de trabajo.

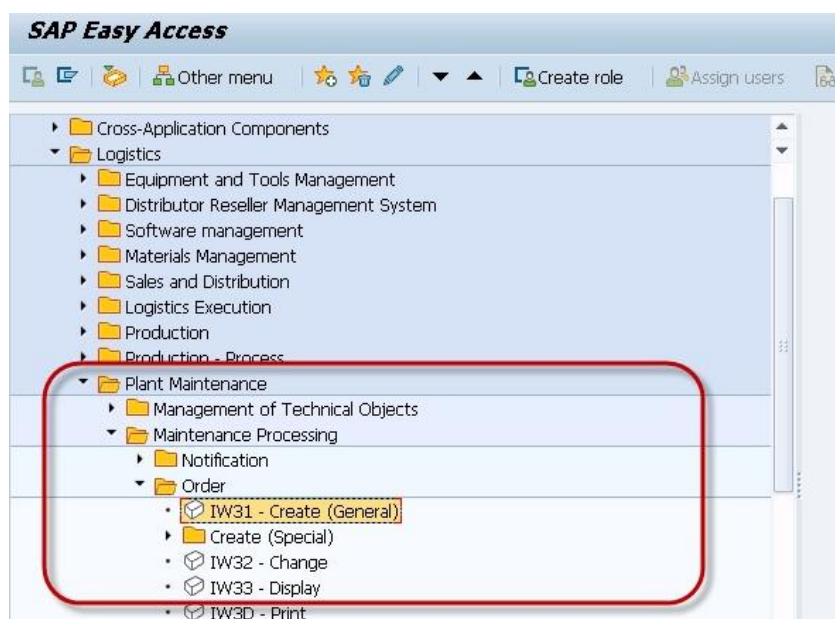


Fig. 4. Interfaz gráfica módulo PM SAP. Fuente: Autor



El personal de ejecución se encarga de realizar cada trabajo y entregar una retroalimentación al planificador sobre las posibles fallas en la planificación y posibles mejoras, pudiéndose generar en ese momento nuevas órdenes de trabajo.

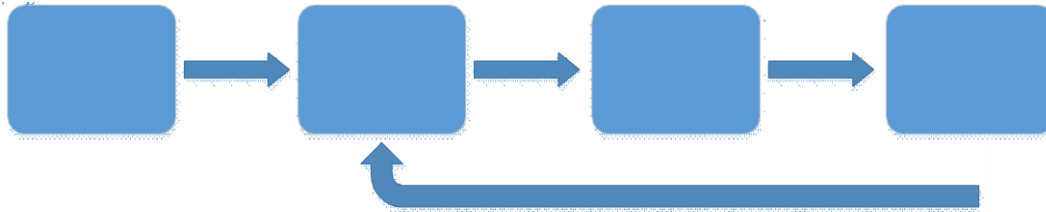


Fig. 5. Organización del mantenimiento. Fuente: Autor

El equipo de mantenimiento completo cuenta con 60 personas trabajando de manera permanente divididas en las áreas mecánica, eléctrica e instrumentos.

El área instrumentación, en conjunto con ingeniería, se ocupa continuamente en automatizar el proceso y mejorar los procesos ya automatizados.

2.2 El Proceso Productivo

2.2.1. EL GRANO DE MAÍZ

El maíz, *Zea mays*, es una planta de la familia de las gramíneas y probablemente el cereal más antiguo cultivado en el continente americano. Los rastros arqueológicos encontrados en América Central, lugar de probable origen de esta planta, retrotraen su uso al año 5000 a.C. El maíz fue cultivado por los nativos de América central, centurias antes de la llegada de Cristóbal Colón. Su cultivo se extendió por América del Norte y América del Sur, siendo una fuente esencial en la alimentación de las poblaciones originarias. A partir del descubrimiento de América por los europeos se difundió desde México a Europa, África y Asia. Y por su tolerancia a distintas condiciones ambientales, el maíz se adaptó a diferentes climas, altitudes y estaciones de cultivo.



La importancia del maíz desde el punto de vista tecnológico, radica en su bajo costo y gran versatilidad. El grano se consume como tal o elaborado, ya sea como maíz inflado, snacks y eventualmente en la elaboración de pan, sin embargo, su principal destino es su industrialización en procesos tales como molienda seca y húmeda, elaboración de alimentos balanceados y cerveza. En lo que a la molienda húmeda respecta, este cereal es una fuente importante de almidón, jarabes, aceite y alcohol, los cuales se emplean en la elaboración de diversos alimentos y bebidas.

2.2.2. ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

El grano de maíz es un fruto compuesto por un pericarpio que encierra una única semilla. Este tipo de fruto, en el cual el pericarpio no se abre para liberar la semilla, es característico de los cereales y se conoce como cariopse. Los granos están dispuestos en una espiga o mazorca unidos a ésta por un apéndice inferior (tip-cap), el cual a menudo se pierde durante el desgranado mecánico. El tamaño y la forma de los granos en la mazorca dependen de la posición que ocupen en ella. Los granos de los extremos son redondeados mientras que los restantes son más o menos planos. Este hecho se debe a las diferentes presiones que soportan los granos durante su desarrollo según sea la posición en que se ubiquen en la mazorca.

En el grano de maíz existen tres partes bien diferenciadas: pericarpio, endosperma y germen, el principal componente es el endosperma, con aproximadamente 85% en peso, seguido por el germen, 10% en peso y finalmente el pericarpio, 5% en peso.

Un esquema del grano de maíz se muestra en la Fig. 6. El pericarpio que recubre el grano está formado por un conjunto de capas discontinuas, firmemente adheridas una a otras. Se distinguen cuatro capas, como muestra la figura: epidermis, mesocarpio y las capas de células transversales y tubulares. La superficie externa de la epidermis está cutinizada dado que está impregnada con ceras, lo cual la hace bastante impermeable al agua. De hecho, la función de esta cutícula es evitar la pérdida de humedad durante el desarrollo del grano. El mesocarpio está compuesto por células elongadas de pared gruesa que forman una estructura compacta, prácticamente sin espacios intercelulares. Por el contrario, las capas internas de células transversales y tubulares exhiben



numerosos espacios intercelulares debido a que las mismas se contactan parcialmente entre sí.

Debido a estas características se genera entre el mesocarpio y las capas internas del pericarpio una línea de debilitamiento a lo largo de la cual se separa fácilmente el pericarpio de la semilla. Este desprendimiento se ve *favorecido por absorción de agua*, dado que la misma agranda los espacios intercelulares debilitando la unión entre el mesocarpio y las capas internas del pericarpio.

Por otra parte, dado que la epidermis y el mesocarpio constituyen un tejido compacto y resistente, el pericarpio se desprende en grandes pedazos casi sin romperse. Este último se continúa hacia la base del grano donde desaparece la epidermis, confundándose con la zona de unión con el marlo o tip-cap. Si se desprende la tip-cap aparece un disco oscuro, o hielina, que representa el cierre del sistema conductor, el cual brinda los nutrientes para el desarrollo de la semilla. El espesor del pericarpio es variable siendo más grueso en la base del grano que en las regiones central y superior, alcanzando su menor espesor sobre el germen.

El endosperma, en contraste con el pericarpio, es un tejido continuo en el que podemos diferenciar una zona externa formada por células ricas en proteínas y aceite, la cual se conoce con el nombre de aleurona. En el resto del tejido, propiamente el endosperma amiláceo, se distinguen además dos regiones. Una zona externa, cercana a la aleurona, de consistencia dura, que se conoce como endosperma córneo o vítreo con un alto contenido proteico; y otra interna, de apariencia opaca, o endosperma harinoso.

El almidón se encuentra fundamentalmente en células elongadas del endosperma, empaquetado en gránulos de 5 a 30 μm y embebido en una matriz proteica continua. El endosperma harinoso es opaco debido a la forma de refractar la luz. La matriz proteica en el endosperma harinoso es delgada y no cubre completamente al gránulo de almidón, el cual adopta una forma redondeada. El endosperma vítreo o córneo posee una matriz proteica más gruesa, con gránulos de forma poliédrica por la compresión de estos, según se ha podido observar por microscopía electrónica de barrido. La matriz proteica de ambos endospermas está compuesta por una proteína amorfa en la cual se encuentran incrustados cuerpos proteicos. Estos cuerpos proteicos están



compuestos casi enteramente de zeína, una fracción proteica extremadamente baja en Lisina.

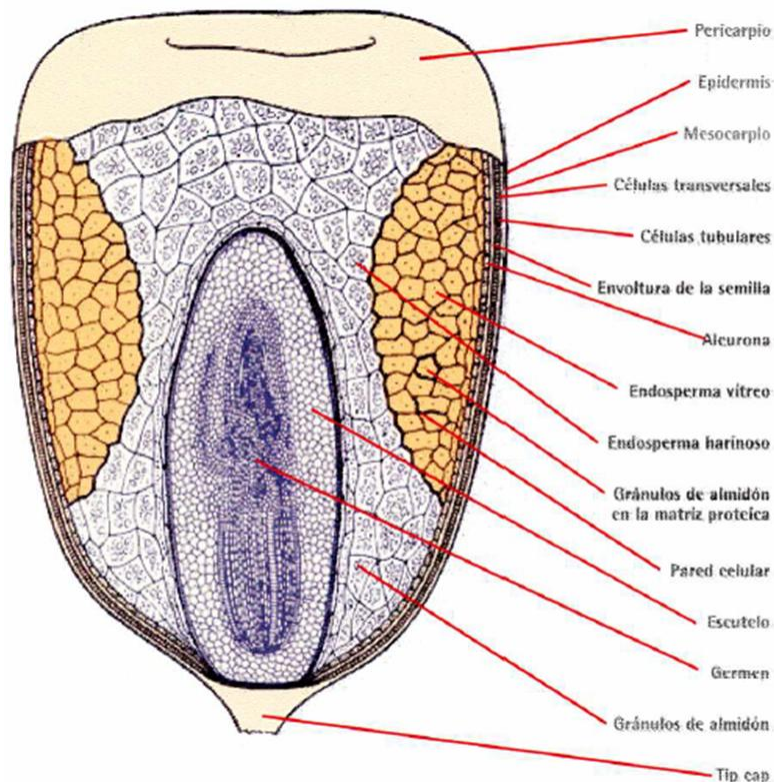


Fig. 6. Sección transversal del grano de maíz, Pomaanz (1987).

Fuente: <https://acortar.link/KOPcsi>

Para recuperar el almidón, los gránulos deben ser liberados de la matriz proteica en donde se encuentran inmersos. La fracción rica en proteínas obtenida por molienda Húmeda se la suele llamar gluten de maíz, que también contiene células de la pared celular del endosperma y pequeños gránulos de almidón. Este gluten, si bien no tiene las propiedades viscoelásticas del gluten de trigo, recibe en la bibliografía esta designación.

El extracto lipídico del gluten de maíz es rico en pigmentos carotenoides, dentro de los cuales se encuentran los carotenos y las xantofilas. Estos compuestos son los principales responsables del color amarillo y/o anaranjado del endosperma de maíz.

Por otro lado, estos pigmentos se encuentran en mayor proporción en el endosperma vítreo. Estos compuestos coloreados naturales del grano de maíz



cobran importancia en los subproductos de la molienda húmeda destinados a la elaboración de alimentos balanceados.

Finalmente, el tercer componente del grano de maíz es el germen, el cual está compuesto por el embrión y el escutelo. El germen contiene poco almidón, pero es rico en aceite y proteínas. En el proceso de molienda húmeda, luego de la etapa de maceración con SO_2 , el germen se separa entero y prácticamente libre de endosperma, para su posterior uso en la extracción de aceite.

2.2.3. LA MOLIENDA HÚMEDA DE MAÍZ

La molienda húmeda de maíz involucra operaciones químicas, bioquímicas y mecánicas para separar el grano en sus principales componentes: almidón, gluten, germen y fibra. El proceso comienza con una maceración del grano con el fin de ablandarlo, seguido por operaciones de molienda y separación. Las fracciones tienen propiedades físicas diferentes por lo que pueden ser separadas por métodos basados en diferencias de densidad y tamaño de partícula. La característica básica de esta industria es lograr la separación de los principales componentes del maíz empleando grandes cantidades de agua, lo que la diferencia de la molienda seca de maíz, que puede ser comparada con la molienda de trigo.

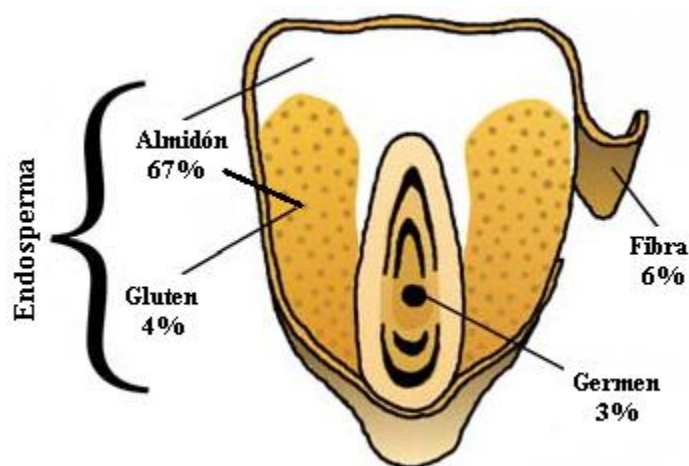


Fig. 7. Principales componentes de Maíz. Fuente: <https://lc.cx/jlo4J0>

Un esquema del proceso de molienda húmeda de maíz se ilustra en la Fig. 8. En primer lugar, el maíz se limpia para eliminar todo tipo de material extraño. El grano se transporta a grandes cubas llamadas “tanques de



maceración” en donde se remoja en una solución acuosa de SO_2 , durante un período de 2 a 3 días, a una temperatura de aproximadamente 50°C .

Durante el proceso de maceración, alrededor del 6% del peso seco del grano se disuelve. Estos componentes disueltos son la fracción nutritiva del extracto de maíz fermentado y condensado (licor de maceración o steep water).

Luego de la maceración, el grano de maíz absorbió abundante agua y reaccionó con el SO_2 por lo que se ablandó lo suficiente como para poder ser desintegrado, inclusive, por simple fricción con los dedos. Se realiza entonces una primera molienda gruesa en discos rotatorios dentados donde la distancia entre dientes es variable dependiendo del tamaño de los granos.

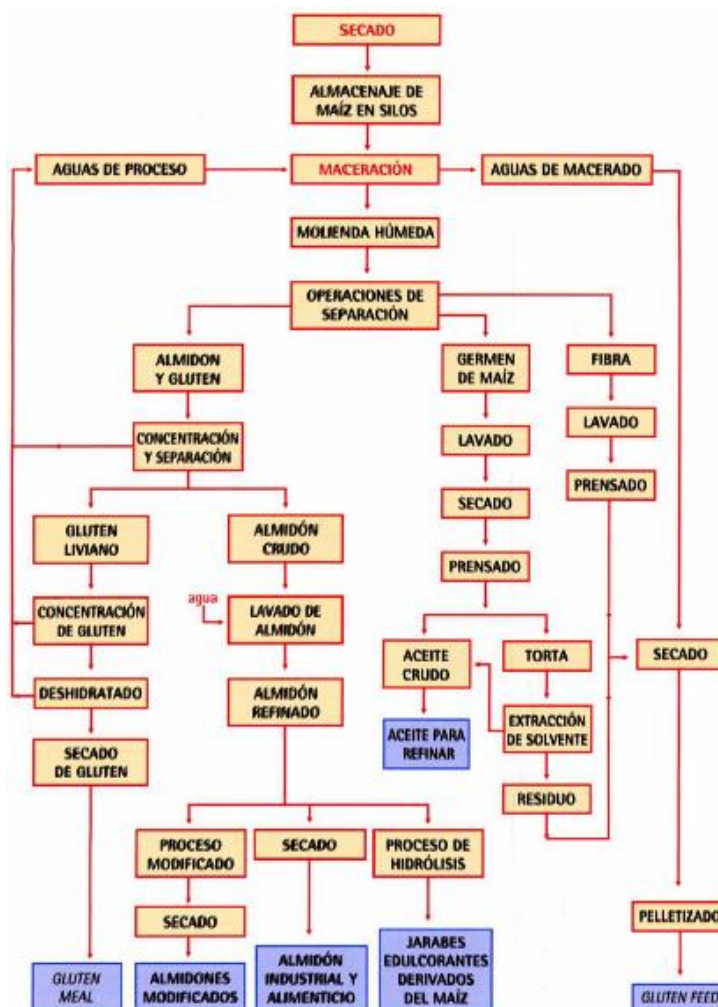


Fig. 8. Proceso de la Molienda Húmeda. Fuente: Autor

Luego de la maceración el grano sale del silo y se pasa por una criba o tamiz que separa el agua del maíz cuya humedad es aproximadamente 48%. Se tiene que separar los componentes que constituyen el grano, la cascara es la



primero que se separa, para que quede disponible el endospermo rico en almidón, proteína y germen. Para ello, se lleva a una molienda gruesa, utilizando un molino de discos de acero inoxidable, que tiene tetones; el objetivo es romper el grano en partes, separando el endospermo del germen. En esta molienda se puede agregar agua para eliminar sulfito si hubiera quedado.



Fig. 9 Molino de Discos. Fuente: <https://lc.cx/Mk1T32>

Luego de esta molienda se obtiene un líquido denso con el germen flotando, a esta masa obtenida, se la bombea con agua a una serie de hidrociclones, para separar el primero de los constituyentes de interés que es el germen.

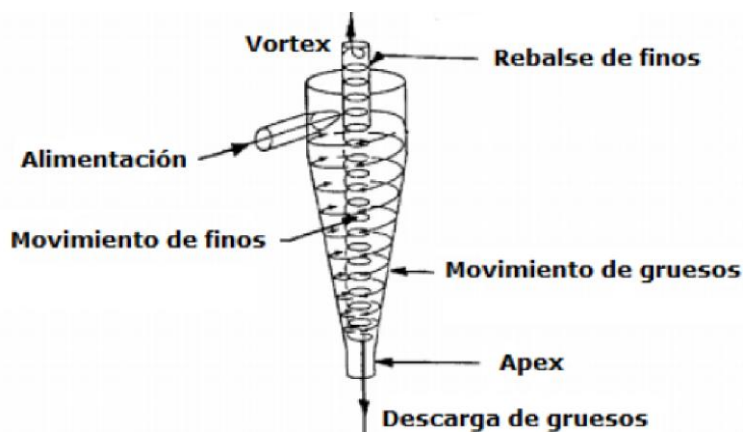


Fig. 10 Diagrama de un hidrociclón. Fuente: <https://lc.cx/nctIPo>

En esta serie de hidrociclones la fracción con germen va hacia arriba y la que no tiene va hacia abajo. Normalmente, no se logra una separación 100%, por eso a la fracción de abajo del 1º hidrociclón, se lo lleva a un 2º hidrociclón que se obtienen dos corrientes.



Si la corriente de arriba aún tiene germen, se la reinyecta al 1º hidrociclón y la fracción que sale de abajo es sometida a molienda, para separar el germen que quedó adherido al endospermo y lo que pueda haber de cáscara.

La masa obtenida que sale de la molienda se la bombea con agua a otro sistema de hidrociclones, de esta forma se van juntando todas las fracciones que van hacia arriba (germen) y se las envía a un sistema de cribas de barras, que tienen forma triangular y una distancia bien definida entre una y otra.

El proceso de separación del germen del líquido que está llevando lo fino (almidón, proteína) se realiza en tres etapas y en contracorriente, es decir, a la última criba se le agrega agua limpia, que se va inyectando mediante bombeo.

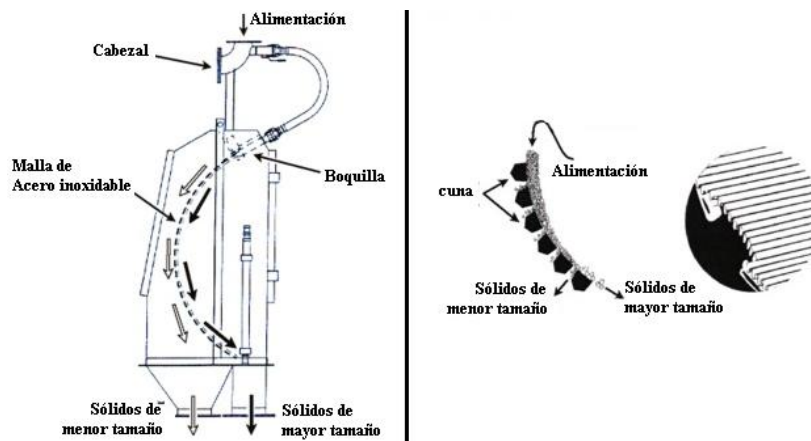


Fig. 11 Tamiz para separación de fibra. Fuente: <https://lc.cx/XbZ3OH>

Se obtiene de estas cribas o tamices germen lavado, al cual se lo prensa para sacarle el agua, y se lo seca a valores de 30% de humedad, luego pasa a un secador por tambor rotativo de vapor, que reduce aún más su humedad, de modo que debe transportarse por sistemas de transporte neumático.

El germen se destina para la elaboración de aceite mediante un prensado expeller; el aceite crudo posteriormente se refina. El germen seco puede emplearse como ingrediente del gluten feed.

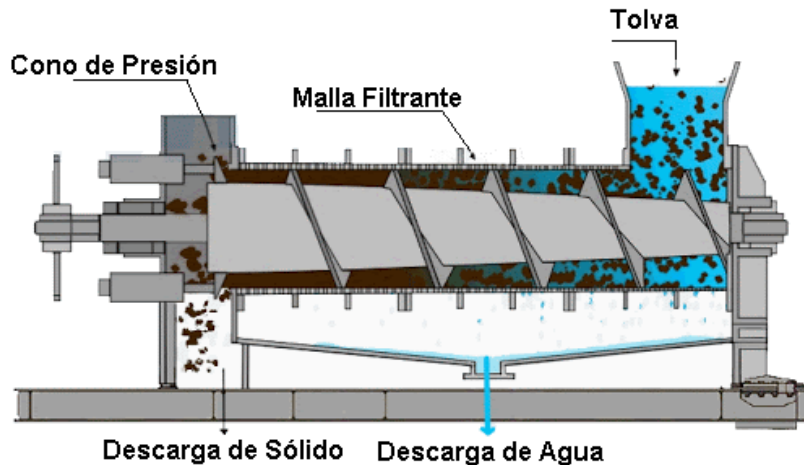


Fig. 12 Prensa de germen. Fuente: <https://lc.cx/1ms9-H>

De la fracción que no es germen del 2º hidrociclón se puede sacar maíz hinchado porque la primera molienda fue gruesa, también se tendrá cáscara casi entera, así que por esta razón se envía a una molienda fina, o segunda molienda utilizando un molino de pernos con cizalla reducida.

Luego de la separación del germen, la suspensión resultante se muele en un molino de impacto, para pulverizar las partículas de endosperma, mientras se deja el material fibroso intacto. La suspensión se filtra por una serie de tamices con tamaño de malla decreciente (75 a 50 μm), impactando la suspensión en el último tamiz para permitir el pasaje del almidón y el gluten. La fibra separada es el mayor ingrediente del gluten feed, este subproducto de la molienda húmeda de maíz se elabora combinando la fibra con el licor de maceración, y en algunas plantas se mezcla con el germen.



Fig. 13 Molino fino de pernos. Fuente: <https://lc.cx/mGErne>

El almidón y el gluten se separan por centrifugación en hidrociclones en serie de manera tal de optimizar la separación. La suspensión más liviana corresponde al gluten, la cual se concentra y posteriormente se deshidrata



mediante decantadores rotativos de vacío, del cual se obtiene una torta de gluten que se seca en horno rotativo, con flujo de aire caliente.

Este producto seco se denomina gluten meal. Por otro lado, la suspensión o lechada de almidón que emerge del extremo inferior del hidrociclón se concentra y se lava en contracorriente. Esta suspensión de almidón (pulpa) es utilizada en los distintos canales de producción con que cuenta la planta. Estos podrán ser almidones modificados, procesos de hidrólisis para la elaboración de jarabes o simplemente su deshidratación en filtros prensa.



Fig. 14. Separadora Centrífuga. Fuente: <https://lc.cx/E-hTKY>

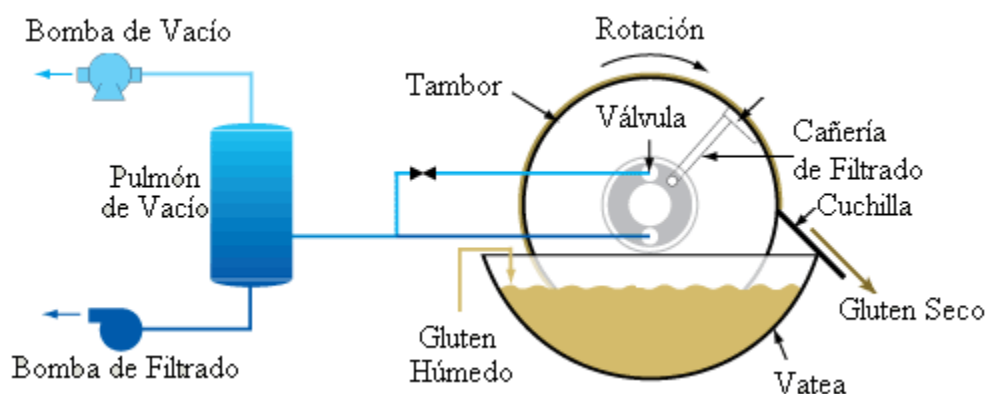


Fig. 15. Filtro de Vacío Rotativo. Fuente: <https://lc.cx/epeXTq>

El almidón de maíz en estado líquido (lechada) se trata en reactores, que son tanques con agitación y posibilidad de adicionar reactivos que permiten regular el pH, conductividad, color u otros factores.

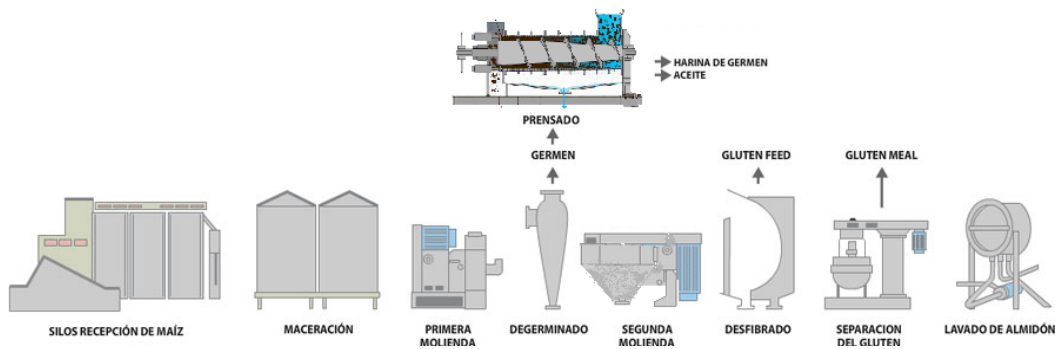


Fig. 16 Molienda Húmeda. Fuente: Autor

2.2.4. MACERACIÓN

Esta etapa consiste en la inmersión en agua en condiciones controladas tales como temperatura, tiempo, concentración de Bisulfito de Sodio y contenido de ácido láctico.

Es un proceso complejo en donde se producen reacciones químicas y bioquímicas, además de cambios físicos que resultan en un debilitamiento de la matriz proteica del endosperma.

Uno de los cambios físicos que se producen durante la maceración es la absorción de agua, lo cual ayuda al ablandamiento del grano como así también actúa como transporte del SO_2 . La velocidad de difusión y el camino difusional afecta la eficacia de la operación de maceración, teniendo en cuenta que la dispersión de la matriz proteica no puede ocurrir sin la presencia de ácido sulfuroso.

El SO_2 causa un debilitamiento a la matriz proteica por ruptura de los puentes disulfuro formando S-sulfoproteínas solubles, proporcionando un medio reductor que evita la recombinación de estos.

La presencia de SO_2 en las aguas de maceración además inhibe el crecimiento microbiano y proporciona el medio adecuado para que se desarrollen las bacterias lácticas, se debe tener en cuenta que el SO_2 en solución acuosa forma el ácido sulfuroso, el cual se disocia de acuerdo con el pH del medio. Por lo tanto, la difusión de este compuesto como así su rol de agente reductor e inhibidor de microorganismos estará condicionado al pH. Al comienzo



de la maceración el pH de la solución es de aproximadamente 3.5, el cual evoluciona con el tiempo y no supera el valor de 5.5 en condiciones normales de proceso.

La concentración de SO_2 empleada en la etapa de maceración oscila entre 0.1% a 0.3%. Aumentando la concentración de SO_2 de 0.1% a 0.2-0.4% en las aguas de maceración se incrementa la recuperación de almidón. Sin embargo, la recuperación de almidón no aumenta indefinidamente con el aumento de los niveles de SO_2 .

Niveles superiores a 0.3% en las aguas de remojo inhibe el crecimiento de *Lactobacillus*. Estos microorganismos producen la fermentación láctica a partir de los azúcares solubles liberados por el grano a las aguas de maceración. La presencia de ácido láctico en las aguas de remojo puede ayudar a incrementar el rendimiento del almidón. Con la adición de ácido láctico en el proceso de maceración, el rendimiento y calidad del almidón obtenido mejora.

Por otro lado, la etapa de maceración requiere de tiempo y temperatura para que se produzcan los cambios físicos, químicos y bioquímicos necesarios para el ablandamiento del grano. La temperatura suele estar comprendida entre los 45 - 55°C y el tiempo de remojo entre las 22 y 50 horas. Las condiciones de maceración dependen de numerosos factores, entre los cuales el tiempo estará condicionado al tipo de grano empleado, siendo en todos los casos la temperatura de proceso inferior a la de gelatinización.

El dióxido de azufre (SO_2), bisulfito de sodio (NaHSO_3) y especies relacionadas son usados en productos alimenticios como inhibidores de mohos, levaduras y bacterias aeróbicas. También evitan el oscurecimiento de frutos y legumbres debido a reacciones enzimáticas, actuando también como antioxidantes.



CAPÍTULO 3: CONCEPTOS TEÓRICOS

3.1.1 DESCRIPCIÓN DE TURBINA

Las turbinas son máquinas en las que existe un intercambio de energía entre el fluido de trabajo y un dispositivo mecánico basados en el principio de cantidad de movimiento.

A semejanza de otras máquinas, las turbomáquinas son esencialmente transformadoras de energía y de movimiento rotativo. Sin embargo, se diferencian, por ejemplo, del motor eléctrico en que la transformación de energía se realiza mediante un fluido de trabajo.

La turbina de gas es una máquina térmica que transforma la energía química contenida en un combustible, en energía mecánica. Esta energía mecánica se transmite por un eje, éste es conectado a un generador eléctrico que aprovecha esta energía.

El funcionamiento de la turbina empieza al ingresar aire por la admisión, se comprime al pasar por el compresor, lo que aumenta tanto su presión como su temperatura. En esta empresa, se ha acoplado una caldera a cada una de las dos turbinas. Estas calderas aprovechan los gases de escape de la turbina, que aún contienen altos niveles de O_2 y una alta temperatura, como aire de combustión para su quemador. De esta manera, el sistema combinado no solo genera electricidad, sino que también produce vapor a través de las calderas.

Las turbinas de gas son turbomáquinas que de modo general pertenecen al grupo de máquinas térmicas generadoras y cuya franja de operación va de pequeñas potencias 5KW a 500MW para los últimos desarrollos. Sus principales ventajas son el pequeño peso y volumen en relación a su potencia, y la flexibilidad de su operación. Esto hace que sean máquinas cuyo uso para determinadas aplicaciones especialmente referidas a la generación de electricidad y a la propulsión de buques y aviones esté en claro aumento.

Al ser máquinas rotativas presentan una clara ventaja frente a los motores alternativos, por la ausencia de movimientos alternativos y de rozamientos entre superficies sólidas, como las que dan entre pistón y camisa. Lo que se traduce en menores problemas de equilibrado y menores consumos de aceite lubricante que además, no están en contacto con superficies calientes



ni con productos de combustión. Comparadas con las turbinas de vapor, las turbinas de gas apenas tienen necesidades de refrigeración, lo que facilita sustancialmente su instalación. Además de su baja inercia térmica, les permite alcanzar su plena carga en periodos de tiempo muy cortos, lo que les hace ideales para determinadas aplicaciones, en las que se requiere variaciones de carga rápida, regulación de redes o abastecimiento de picos de demanda.

Esta simplicidad comparada con las turbinas de vapor y con motores alternativos, otorga a las turbinas de gas, dos ventajas adicionales: un mantenimiento sencillo, comparado con otras máquinas térmicas y una elevada fiabilidad.

En efecto, la reducción de las necesidades de lubricación y refrigeración, la continuidad del proceso de combustión y la ausencia de movimientos alternativos hace que la probabilidad de fallo disminuya. Una instalación de generación eléctrica basada en una turbina de gas puede alcanzar, con facilidad, valores de disponibilidad superiores al 95% y valores de fiabilidad cercanos al 99%, si la instalación está bien diseñada, bien construida, bien operada y con un adecuado mantenimiento.

Normalmente se entiende por turbina de gas el conjunto formado por los siguientes elementos:

- Filtros de aire de admisión
- Compresor responsable de la elevación de presión del fluido de trabajo
- Sistema de aporte de calor al fluido
- Elemento expensor o turbina propiamente dicha
- Escape
- Rotor
- Carcasa
- Cojinetes
- Rodamientos
- Sistemas auxiliares



Sus aplicaciones son muy variadas, siendo el más amplio campo de aplicación entre los motores térmicos. Inicialmente se utilizaron para la obtención de trabajo mecánico, posteriormente se trasladaron al campo de la aeronáutica como elemento propulsor, sobre todo a partir de la segunda guerra mundial. Más tarde se utilizaron masivamente, como elemento motor para la generación de energía eléctrica, aplicación para la que se han desarrollado modelos específicos, que han tratado de adaptarse a las exigencias de ese mercado.

Una turbina de gas tiene tres partes claramente diferenciadas: la primera es el compresor, en éste se produce la elevación de la presión del aire, generalmente es del tipo axial. Debido a esta elevación de presión, también se eleva la temperatura (de 20 °C a 200 °C). Pero en la cámara de combustión se eleva aún más: alrededor de 1000 ° y hasta 1700 °C en algunos modelos. Debido a este aumento de presión y temperatura, se acumula una gran cantidad de energía potencial que puede ser transformada en otras formas de energía. La primera conversión ocurre en las toberas, donde la energía potencial se convierte en energía cinética. Luego, esta energía cinética es aprovechada por los álabes, que transfieren el movimiento al rotor, generando la energía rotativa, que es el objetivo principal de la turbina.

Como ya se mencionó, el funcionamiento de la turbomáquina inicia, a partir la primera etapa de compresión, a los efectos de poder alcanzar un vañor significativo de presión, en su segunda etapa se realiza un nuevo aporte de energía mediante la inyección de combustible de forma dispersada, esta acción genera una combustión que emite un flujo gaseoso con alta temperatura.

Este fluido con una gran energía en forma de presión, calor y alta temperatura, ingresa a la tercer etapa de expandiéndose en la propiamente turbina, donde el fluido de trabajo sede su energía transformándola en mecánica en el eje de la maquina

Esa energía resultante en el eje de la turbina le otorga movimiento al compresor, al generador eléctrico, y órganos auxiliares; la energía no utilizada a la salida de este proceso, en forma de calor y alta velocidad, son aprovechados para precalentar el agua de alimentación una caldera que tiene acoplada cada una de las dos turbinas^[1].

3.1.2 PARTE DE LA TURBINA DE GAS

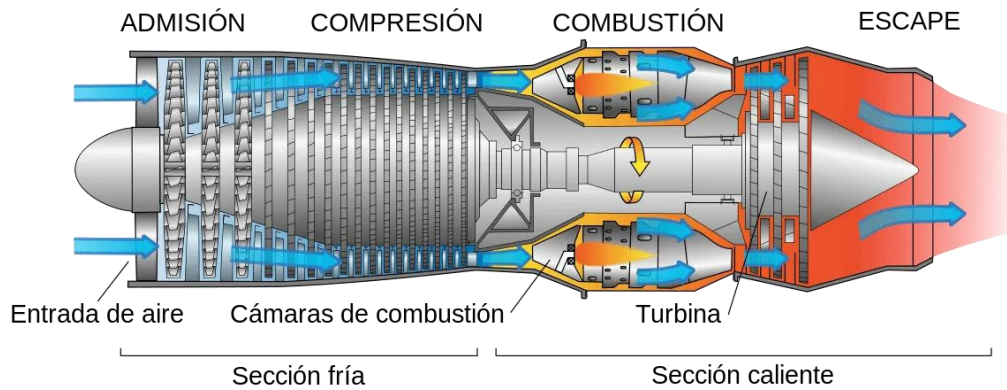


Fig. 17 Diagrama de turbina. Fuente: <https://lc.cx/9aJZR5>

Las principales partes que componen la turbina de gas que se pueden visualizar en la Fig. 17, son los siguientes:

- Admisión de aire

Es la pieza encargada de la introducción del aire, contiene los componentes necesarios para que el aire pueda ingresar en la turbina, en las condiciones adecuadas en relación con la presión, la temperatura y la limpieza, por esta razón la pieza posee varios filtros, que se encargan que todos los elementos entren de manera adecuada y sin las impurezas que pueda tener el aire. De esa manera se facilita que en el interior de la turbina ingrese mayor cantidad de masa de aire.

- Compresor

El compresor de aire tiene como objetivo, elevar la presión del aire de combustión a la turbina, antes de su ingreso a la cámara de combustión, dicha compresión se ejecuta en varias etapas.

Su función es mover la masa de aire, a través de las diferentes piezas, variando el ángulo de inclinación de las paletas curvas de los álabes del compresor. En la medida que el compresor de la turbina de gas posea una mayor apertura, mayor es el volumen de aire que penetra en el compresor y con consiguiente a la turbina.



Una parte del aire que se genera en el compresor es utilizada para la refrigeración de las piezas de álabe y de la cámara de combustión, por lo que el 50 % de la masa de aire es utilizado con esa finalidad.

- Cámara de combustión

En la cámara de combustión es donde se genera la combustión de manera constante y es en esta donde se utiliza el gas combustible conjuntamente con el aire, dicha combustión a presión empuja al combustible en un nivel adecuado de presión, que puede oscilar entre los 16 y 50 bar.

A causa de las altas temperaturas que se alcanza en el proceso de combustión y para preservar la vida útil de todos los componentes de la cámara de la turbina de gas, el mecanismo trabaja con una gran cantidad de aire el cual se ubica entre el 300 % y 400 % del aire teórico requerido. De esta manera, se puede reducir la temperatura de la llama y al mismo tiempo refrescar los componentes más calientes que se encuentran en la cámara.

Así, el compresor dirige la masa refrigerante de manera directa hacia las paredes de la cámara de combustión, buscando mantener la temperatura en los valores convenientes, igualmente el aire circula en los álabes de la turbina, saliendo por las perforaciones que se ubican en los bordes, creando una película protectora en los álabes.

- Turbina de expansión

La turbina de expansión es la pieza encargada de beneficiarse de la velocidad de la salida de los gases de combustión y generar la conversión de energía cinética a energía mecánica rotacional, por lo tanto, todas sus etapas están relacionadas con la reacción, de manera que genera la energía adecuada para alimentar al compresor y producir adicionalmente energía eléctrica en el generador.

La turbina de expansión generalmente consta de cinco etapas, las cuales están integradas por una corona de álabes a través de un diseño aerodinámico, que tienen como función hacer girar el rotor. Los álabes están cubiertos por un material de cerámica, diseñados para las altas temperaturas, adicionalmente por sus piezas pasa un flujo de aire refrigerado que se genera



del compresor y lo atraviesa por su parte internas, que sale al ambiente exterior por medio de pequeños orificios, que se encuentran en toda su superficie.

- Carcasa

La carcasa es el componente físico cuya función es proteger y aislar la parte interna de la turbina, el mismo se divide en tres secciones:

- Carcasa del compresor: es la única capa donde se cimienta los álabes fijos, también actúa como transportador del aire de refrigeración a las secciones que se encuentran en las etapas posteriores de la turbina de gas.
- Carcasa de cámara de combustión: esta pieza tiene varias capas, las cuales fueron diseñadas para la protección térmica, mecánica y para distribuir la masa de aire en las tres fases en el que se incorpora o inyecta el aire en el proceso de la combustión.
- Carcasa de la turbina de expansión, esa pieza se compone de dos capas, una interna que permite la inmovilización de los álabes fijos y la otra ubicada en la parte externa que permite el traslado del aire de refrigeración por la parte interna de los álabes, igualmente tiene la función de suministrar la protección térmica en la zona exterior^[2].

3.2 Mantenimiento de turbina

Las turbinas de gas son máquinas térmicas cuyo funcionamiento es similar al de las turbinas de vapor, solo que en este caso el fluido utilizado es un gas.

Se distinguen tres tipos de operaciones de mantenimiento de turbinas de gas; mantenimiento rutinario, inspecciones y grandes revisiones o mantenimiento mayor.

El mantenimiento rutinario consta principalmente de operaciones diarias de vigilancia y comprobación. Los más importantes son:

- Vigilancia de los parámetros de presión y temperatura.



- Control del aceite de lubricación de los cojinetes y demás partes móviles, con su consiguiente sustitución si es necesaria.
- Sustitución de los filtros de aire del compresor, cuando la resistencia por la retención de partículas sea demasiado elevada.
- Limpieza del compresor. Este proceso se puede realizar tanto en marcha como con la turbina apagada.
- Comprobación de alarmas contra incendios y demás sistemas de seguridad

El propósito principal de las inspecciones es la búsqueda de deformaciones y daños en las partes internas causados por temperaturas o presiones elevadas o debido al impacto de objetos extraños.

Las grandes revisiones o mantenimiento mayor suelen ser sustituciones de partes de la turbina o limpieza manual de partes internas, generalmente los álabes.

También pueden incluir una revisión general de los elementos de control, como sensores, cableado, bombas, cojinetes de apoyo, así como el equilibrado del conjunto rotor.

3.2.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo consiste en intervenciones que previenen las averías y disminuyen la probabilidad de que el equipo falle. Es decir, se trata de un tipo de mantenimiento planificado que se realiza incluso cuando un equipo mantiene su capacidad operativa. Puede ser tan simple como la limpieza de los filtros de los aparatos de calefacción, ventilación y aire acondicionado, una inspección visual o una lubricación periódica, pero también incluye planes de inspección más complejos, planes de calibración y/o medición, detección de fugas de gas y otras revisiones cíclicas, muestras de aceite, etc.

El mantenimiento planificado nos permite: aumentar la vida útil del activo en cuestión y mantener la productividad a lo largo del tiempo.



El mantenimiento preventivo evita las paradas no programadas. Como consecuencia, se obtiene un mayor rendimiento de la inversión en equipos y se cumplen los plazos establecidos con tus clientes.

El mantenimiento preventivo y las revisiones periódicas detectan el desgaste de las piezas y mantienen el equipo en condiciones óptimas. Esto ofrece más seguridad a todas las personas que están en contacto con el activo, tanto trabajadores como clientes^[3].

3.3 Descripción del problema

La necesidad de desarrollar e implementar un plan que evite interrupciones en el funcionamiento de las turbinas se origina en el hecho ocurrido en septiembre del año 2021, donde la turbina TG3 se rompió debido a la falta de mantenimiento. En este caso cuerpos extraños ingresaron por el ducto de admisión, ocasionando roturas en los álabes de la turbina. Previa a la rotura, el equipo acusaba exceso de vibraciones. Lo que conllevó a la parada de planta general, viéndose afectados todos los equipos de la empresa.

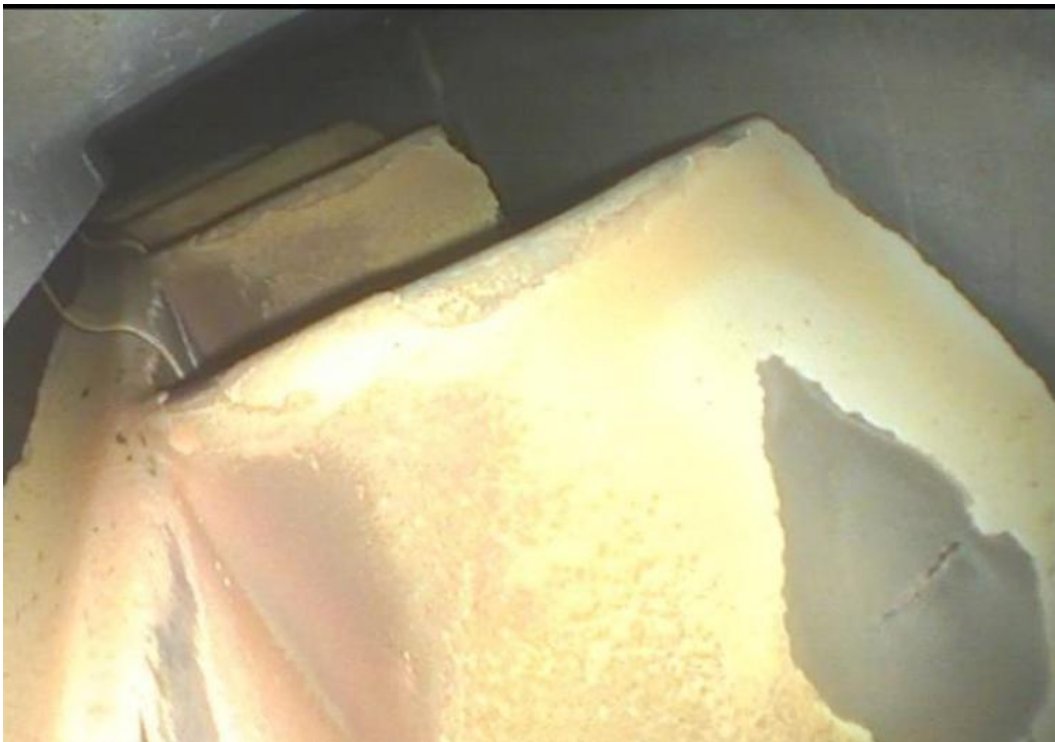


Fig. 18 Fotografía de boroscopia. Fuente: Informe Solar



En la imagen de la boroscopia realizada después del incidente, se puede apreciar la fractura, erosión térmica y corrosión en los álabes de la 1era etapa de la turbina. En la Fi.:19 se indica la ubicación de los álabes.

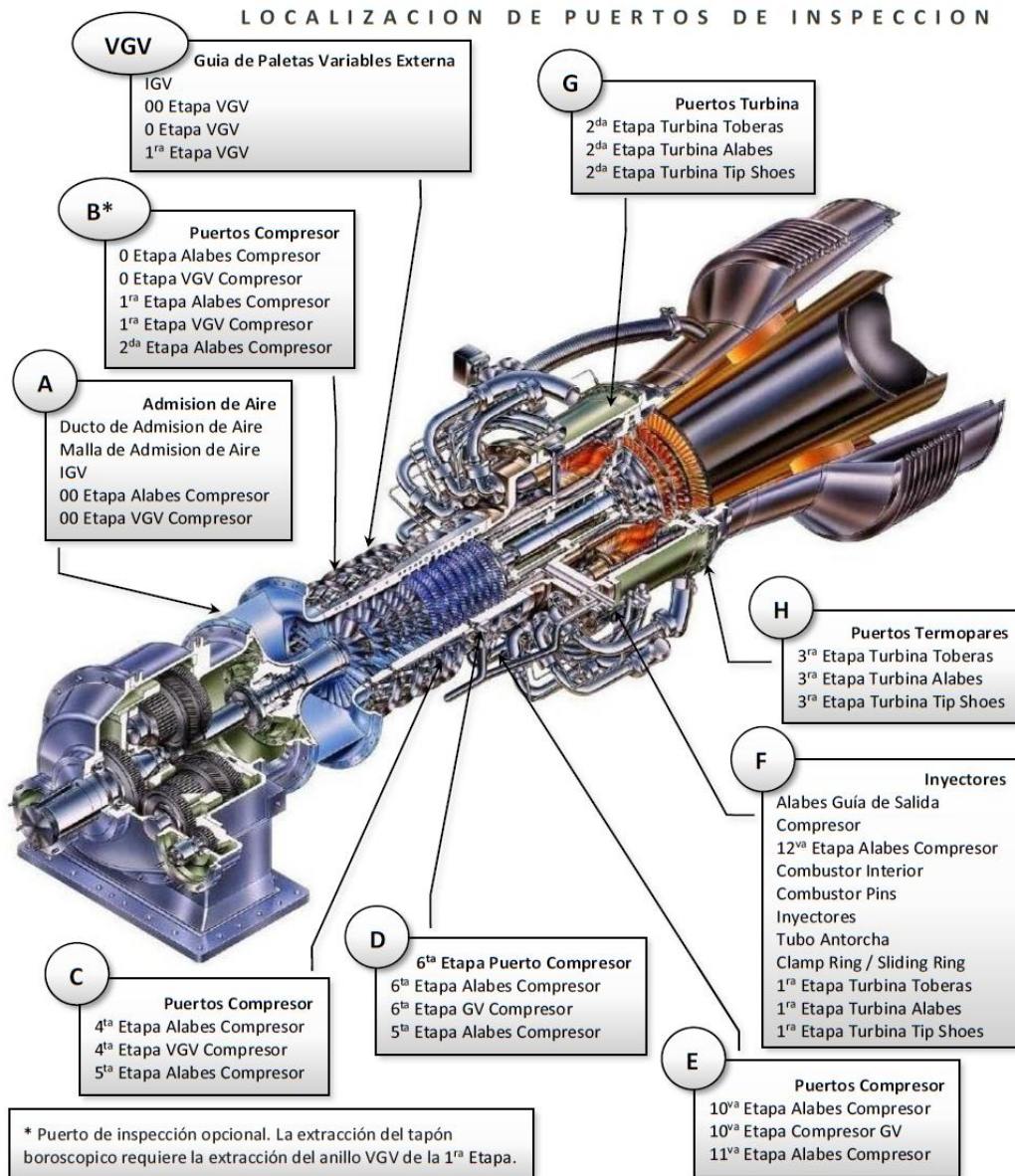


Fig. 19 Partes de turbina Taurus 70. Fuente: <https://lc.cx/rsRmRc>

Posterior a este incidente y luego de varios intentos, se pudo restablecer la generación de energía eléctrica a la red de distribución. Una de las dos turbinas quedó fuera de servicio, viéndose adicionalmente afectada la producción de vapor, debido a que las turbinas están acopladas a las calderas,



mediante la utilización de los gases de escape para generar vapor. Lo cual impedía el total abastecimiento a las plantas productivas con la cantidad de toneladas de vapor necesarias para que estén todas en marcha, por lo que, solamente se le dio prioridad para producir la planta de jarabes por ser la de mayor demanda en ese momento.

Al cabo de transcurrir veinte días en esta situación, se tomó la decisión de alquilar una caldera, instalándose con mínimos elementos de medición, razón por lo cual no se pudo conocer exactamente la cantidad de toneladas de vapor producidas. Adicionalmente se contrató el traslado y descarga de la caldera, lo que implicó un costo de \$18.000 dólares, por todo el servicio.

A los efectos de poder conservar el normal funcionamiento de la planta fue necesario la compra de energía durante todo el incidente, el valor de cada mega es de \$ 250 dólares, se compró 5 Megawatt por cada hora, durante 76 días.

Al cabo de 24 días de alquilar la caldera, la empresa Solar proveyó una turbina de reemplazo desde EE.UU, faltando únicamente la caja reductora. Razón por lo cual se decidió, con el área de Servicios Auxiliares, reparar la caja reductora de la turbina deteriorada. El trabajo llevó siete días, con dos equipos trabajando 12 horas; el grupo estuvo integrado por cinco mecánicos y un supervisor por turno.

Respecto de la turbina desinstalada, se decidió devolverla a la empresa proveedora Solar, lo cual ocasionó un costo adicional por incumplimiento del contrato en la Aduana, y se materializó en una multa de casi \$ 500.000 dólares.

A continuación, se expone una línea temporal y un cuadro detallando los costos ocasionados por falta de mantenimiento de la turbina:

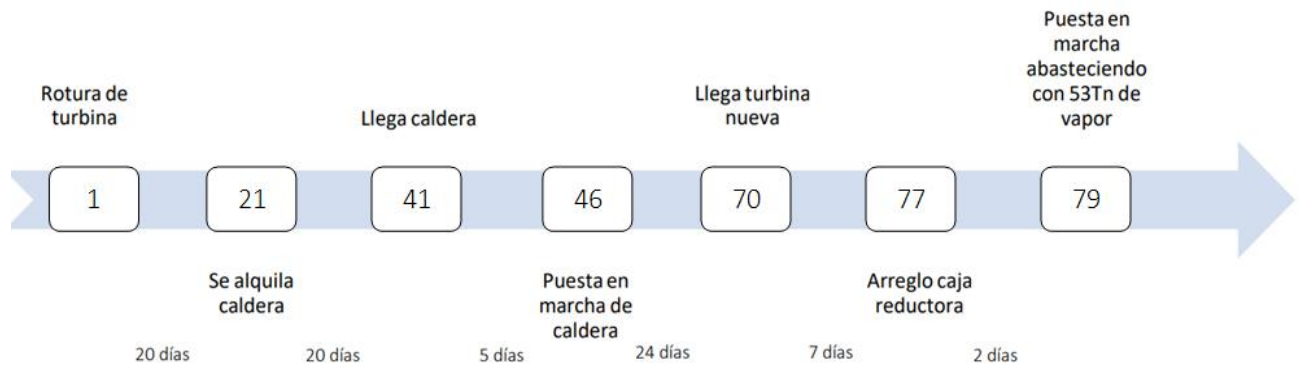


Fig. 20 Línea temporal. Fuente: Autor

Ítem de gastos	Costo
Alquiler de caldera	\$ 60.300
Traslado en camión	\$ 18.000
40 días sin producir	\$ 38.400.000
Compra de energía	\$ 2.280.000
Reparación caja reductora	\$ 10.000
Multa	\$ 500.000
Total	\$ 41.268.300

Tabla N°1 Análisis de costos

Desarrollo de ítems de costos:

- El alquiler de la caldera fue de 45 días, el precio de cada día fue de \$1.340 dólares. Por lo tanto, el costo total fue de \$60.300 dólares.
- El costo del servicio de grúa más el traslado en camión y alquiler de carretón fue de un total de \$18.000 dólares.
- El costo de la hora por parada de planta es de \$40.000 dólares, por las 24 horas, totalizan \$960.000 por día. El costo total en dólares de no producir por 40 días es de \$38.400.000 dólares.
- El megawatt - hora comprado costó \$250 dólares, diariamente se compraron 5 megawatt, totalizando \$30.000 dólares. Al cabo de los 79 días necesarios, conllevando a un gasto de \$2.280.000 dólares.



- El servicio de contratistas para la reparación de la caja reductora durante 7 días tuvo un valor de \$10.000 dólares.
- Adicionalmente cabe ponderar el gasto de la multa por el contrato con Solar de \$500.000 dólares.

Ascendiendo a un costo en dólares total de: \$41.268.300.

Para mantener la turbina en óptimas condiciones, fue necesario formular un plan de mantenimiento que asegurara la operatividad de cada una de sus partes. Esto incluyó una revisión exhaustiva de todos los componentes críticos, con el objetivo de prevenir una falla de la magnitud mencionada. De no hacerlo, se comprometería tanto la producción de energía como de vapor, ya que ambas turbinas operativas están conectadas a sus respectivas calderas. Cada tonelada de vapor generada es esencial para los diferentes procesos, como las líneas de jarabe de maltosa, dextrosa, almidón, e incluso de la molienda húmeda de maíz.



CAPÍTULO 4: DESARROLLO

4.1 Desarrollo del plan preventivo

4.1.1 Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo que garantice el óptimo funcionamiento de las turbinas de la empresa Cargill Villa Mercedes, asegurando la continuidad operativa, la seguridad y la eficiencia en la generación eléctrica.

Objetivos Específicos:

Establecer una colaboración efectiva entre los pilares de mantenimiento autónomo y mantenimiento planificado que asegure el correcto funcionamiento de la turbina.

Crear un sistema de mantenimiento preventivo a través de planes en el software SAP, utilizado en la planta, que sea robusto y adaptable a las necesidades operativas de la empresa.

Evaluar la efectividad de las acciones implementadas mediante el seguimiento de indicadores clave (KPIs) como las paradas programadas, el cumplimiento de tiempos planificados y el ahorro de costos, para medir el impacto de las mejoras en el rendimiento del mantenimiento.

4.2. Metodología

Para llevar a cabo este proyecto, se seguirá una metodología basada en las siguientes etapas:

1. Análisis de la Situación Actual:

Se realizará una evaluación exhaustiva del estado actual de las turbinas de generación eléctrica, revisando registros de mantenimiento, identificando fallos recurrentes y analizando los procedimientos de mantenimiento existentes.

2. Investigación y Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo:

Se llevará a cabo una investigación detallada sobre las mejores prácticas en el mantenimiento de turbinas de generación eléctrica. Con base en esta investigación, se diseñará un plan de mantenimiento preventivo



personalizado que aborde las necesidades específicas de las turbinas en la planta.

3. Implementación del Plan de Mantenimiento Preventivo:

Una vez diseñado el plan, se procederá a su implementación en la planta. Esto incluirá la capacitación del personal, la adquisición de los recursos necesarios, y la integración del plan en los sistemas de gestión de mantenimiento existentes, como SAP.

4. Monitoreo, Ajustes y Mejoras Continuas:

Basándose en los resultados del monitoreo y la retroalimentación del personal, se ajusta al plan de mantenimiento preventivo para optimizar su efectividad. Este proceso de mejora continua garantizará que el plan se adapte a las necesidades cambiantes de la planta.

4.3 Plan de Trabajo

El plan de trabajo se estructuró en las siguientes fases:

Fase 1: Preparación y Planificación Inicial

ACTIVIDADES PRINCIPALES:

Reuniones de Inicio: Se llevarán a cabo reuniones con el equipo de mantenimiento y otras partes interesadas clave para definir claramente los objetivos, el alcance del proyecto, y los roles y responsabilidades de cada miembro del equipo.

Revisión de Documentación Existente: Se recopilará y analizará toda la documentación relevante, incluyendo registros de mantenimiento anteriores, manuales técnicos de las turbinas, y datos históricos de fallos. Este análisis permitirá identificar patrones de fallos recurrentes y áreas críticas que requieren atención prioritaria.

Definición de Cronograma: Se establecerá un cronograma detallado que incluirá todas las actividades previstas, asignando tiempos específicos y recursos necesarios para cada tarea.



Objetivo de la Fase: Garantizar que todos los aspectos del proyecto estén claramente definidos y que se disponga de toda la información necesaria para proceder con el diseño del plan de mantenimiento.

Fase 2: Investigación y Diseño del Plan de Mantenimiento

ACTIVIDADES PRINCIPALES:

Investigación de Mejores Prácticas: Se realizará una investigación exhaustiva sobre las mejores prácticas en el mantenimiento de turbinas de generación eléctrica, consultando fuentes técnicas, normativas internacionales y estudios de caso en plantas similares.

Diseño del Plan de Mantenimiento: Con base en la investigación realizada y el análisis de la situación actual, se diseñará un plan de mantenimiento preventivo personalizado. Este plan incluirá cronogramas de inspección, listas de verificación para tareas de mantenimiento, procedimientos detallados para cada tarea y un calendario de reemplazo de componentes críticos.

Validación del Plan: El plan diseñado será revisado y validado por expertos en mantenimiento y personal de área de calidad para asegurar que sea práctico, efectivo y acorde a los requerimientos y estándares de la empresa.

Objetivo de la Fase: Crear un plan de mantenimiento preventivo exhaustivo que sea específico para las turbinas de la planta, asegurando su eficacia y adaptabilidad.

Fase 3: Implementación del Plan de Mantenimiento

ACTIVIDADES PRINCIPALES:

Capacitación del Personal: Se organizarán sesiones de capacitación para todo el personal involucrado en el mantenimiento y sector productivo, asegurando que comprendan completamente los nuevos procedimientos y su importancia. La capacitación cubrirá tanto aspectos técnicos como normativos.

Adquisición de Recursos: Se adquirirán los recursos necesarios, incluyendo repuestos críticos, herramientas especializadas, y equipos de medición. Se revisará el inventario existente para asegurar que todos los elementos estén disponibles y en buen estado.



Integración en el Sistema SAP: El plan de mantenimiento se integrará en el sistema de gestión SAP, permitiendo la automatización de las órdenes de trabajo, el seguimiento de las actividades y la generación de reportes en tiempo real.

Objetivo de la Fase: Asegurar que el plan de mantenimiento sea implementado de manera efectiva y que todo el personal y los recursos estén alineados con los nuevos procedimientos.

Fase 4: Monitoreo y Evaluación

ACTIVIDADES PRINCIPALES:

Establecimiento de KPIs: Se definirán indicadores clave de rendimiento (KPIs) para medir la efectividad del plan de mantenimiento. Estos incluirán métricas como el tiempo promedio entre fallos (MTBF), el tiempo promedio de reparación (MTTR), el porcentaje de cumplimiento de tareas planificadas, y el costo de mantenimiento.

Seguimiento de Desempeño: Se implementará un sistema de seguimiento continuo utilizando SAP para evaluar el desempeño del plan de mantenimiento. Los resultados serán revisados periódicamente por el equipo de mantenimiento y la dirección.

Informe de Resultados: Se generarán informes detallados que comparen el desempeño actual con los objetivos planteados, permitiendo una evaluación precisa de la eficacia del plan.

Objetivo de la Fase: Proveer un sistema de monitoreo que permita evaluar de manera continua la efectividad del plan y realizar ajustes necesarios en tiempo real.

Fase 5: Ajustes y Mejoras Continuas

ACTIVIDADES PRINCIPALES:

Revisión de Resultados: Basándose en los informes generados y la retroalimentación del personal, se revisarán los resultados obtenidos para identificar áreas de mejora.

Implementación de Ajustes: Cualquier ajuste necesario será implementado de inmediato para optimizar la efectividad del plan. Esto puede



incluir modificaciones en los procedimientos, cambios en la frecuencia de las tareas de mantenimiento, o la actualización de herramientas y tecnologías utilizadas.

Ciclo de Mejora Continua: Se establecerá un ciclo de mejora continua que incluya revisiones regulares del plan de mantenimiento, asegurando que se mantenga actualizado y efectivo frente a los cambios operacionales y tecnológicos.

Objetivo de la Fase: Mantener el plan de mantenimiento relevante y efectivo a lo largo del tiempo, asegurando que se adapte a las necesidades cambiantes de la planta y que continúe brindando beneficios operativos y económicos.

4.4 Consideraciones y Recursos Requeridos

Consideraciones Generales

Impacto en la Operación de la Planta:

- **Programación de Mantenimiento:** Es crucial programar las actividades de mantenimiento preventivo en momentos que minimicen el impacto en la operación diaria de la planta. Esto puede incluir la realización de mantenimiento durante períodos de baja demanda o paradas programadas.

- **Coordinación con Producción:** Es necesario coordinar estrechamente con el equipo de producción para asegurarse de que las tareas de mantenimiento no interfieran con los procesos críticos. Esta coordinación es esencial para evitar cualquier interrupción no planificada en la producción.

Cumplimiento Normativo:

- **Regulaciones de Seguridad y Medioambiente:** El plan de mantenimiento debe cumplir con todas las normativas de seguridad y medioambientales aplicables. Esto incluye asegurar que todas las prácticas de mantenimiento sigan los procedimientos de seguridad establecidos y que los desechos generados sean manejados de acuerdo con las regulaciones medioambientales.

- **Auditorías y Documentación:** Mantener una documentación detallada y precisa de todas las actividades de mantenimiento es fundamental para las



auditorías internas y externas. Esta documentación debe estar fácilmente accesible y actualizada regularmente.

Evaluación de Riesgos:

- Identificación de Riesgos: Antes de implementar cualquier actividad de mantenimiento, se deben identificar y evaluar los posibles riesgos asociados. Esto incluye riesgos para la seguridad del personal, la integridad de los equipos y el impacto potencial en la operación de la planta.

- Planes de Contingencia: Se deben desarrollar planes de contingencia para mitigar los riesgos identificados. Esto podría incluir procedimientos para manejar emergencias, disponibilidad de repuestos críticos, y estrategias para minimizar el tiempo de inactividad en caso de fallos imprevistos.

Capacitación y Competencias:

- Formación del Personal: Es fundamental que todo el personal involucrado en el mantenimiento esté debidamente capacitado en los nuevos procedimientos y tecnologías implementadas. La capacitación debe ser continua para asegurar que los técnicos estén al tanto de las mejores prácticas y actualizaciones en el mantenimiento de turbinas.

- Certificaciones y Competencias: Se debe asegurar que el personal posea las certificaciones necesarias para realizar tareas específicas, especialmente aquellas que involucren operaciones críticas o el manejo de maquinaria pesada.

Gestión de la Calidad:

- Control de Calidad: Se debe implementar un sistema de control de calidad que garantice que todas las tareas de mantenimiento se realicen con los más altos estándares. Esto incluye la inspección y verificación de trabajos completados, así como la revisión de la conformidad con los procedimientos establecidos.

- Retroalimentación y Mejora Continua: La retroalimentación del personal y los resultados de las inspecciones deben ser utilizados para mejorar continuamente los procedimientos de mantenimiento, asegurando una mejora constante en la calidad del trabajo realizado.



Recursos Requeridos

Recursos Humanos:

- Equipo de Mantenimiento: Se requiere un equipo de mantenimiento altamente capacitado que incluya ingenieros, técnicos y operarios especializados en turbinas de generación eléctrica. Este equipo debe estar disponible durante todas las fases del proyecto, desde la planificación hasta la implementación y el seguimiento.

- Supervisión y Coordinación: Un supervisor o coordinador de mantenimiento es esencial para gestionar el equipo y asegurar que todas las actividades se realicen según lo planificado, manteniendo la comunicación entre los diferentes departamentos involucrados.

Recursos Materiales y Técnicos:

- Herramientas y Equipos Especializados: Se necesitan herramientas y equipos especializados para realizar tareas de mantenimiento preventivo, como equipos de diagnóstico, calibradores, herramientas de precisión, y equipos de seguridad personal (EPP).

- Repuestos Críticos: Es crucial tener en stock los repuestos críticos para las turbinas, como rodamientos, sellos, y componentes electrónicos, para asegurar que las reparaciones puedan realizarse sin demoras innecesarias.

- Instrumentación y Sensores: La instrumentación adecuada para el monitoreo continuo de las turbinas, incluyendo sensores de vibración, temperatura y presión, es esencial para identificar problemas antes de que se conviertan en fallos mayores.

Recursos Financieros:

- Presupuesto de Implementación: Se requiere un presupuesto detallado que cubra todos los aspectos del plan de mantenimiento, incluyendo la compra de herramientas, repuestos, costos de capacitación, y la integración del plan en el sistema SAP.

- Fondos para Emergencias: Se debe disponer de fondos adicionales para cubrir cualquier eventualidad o imprevisto que pueda surgir durante la implementación del plan de mantenimiento.



Recursos de Información y Tecnología:

- Software de Gestión (SAP): El sistema de gestión de mantenimiento SAP debe estar configurado para soportar el nuevo plan de mantenimiento, permitiendo la automatización de tareas, el seguimiento de KPIs y la generación de reportes.

- Documentación Técnica: Manuales técnicos actualizados de las turbinas, normas de mantenimiento y guías de procedimientos deben estar disponibles para todo el equipo, asegurando que las actividades de mantenimiento se realicen conforme a los estándares recomendados.

Infraestructura:

- Taller de Mantenimiento: El taller de mantenimiento debe estar equipado con todas las herramientas y equipos necesarios para realizar reparaciones y mantenimiento de turbinas. Esto incluye bancos de trabajo, grúas, sistemas de ventilación adecuados, y almacenamiento seguro para herramientas y repuestos.

- Almacén de Repuestos: Un almacén dedicado con un sistema de gestión eficiente es necesario para asegurar que los repuestos estén disponibles cuando se necesiten, minimizando el tiempo de inactividad.

4.5 Insumos, Horas Hombre y Equipos Necesarios

4.5.1 Insumos Requeridos

Materiales y Repuestos:

- Rodamientos y Sellos: Repuestos críticos para las turbinas, como rodamientos de alta precisión y sellos mecánicos, que son esenciales para mantener la integridad del sistema y evitar fugas.

- Aceites y Lubricantes: Aceites especializados para turbinas y lubricantes de alta temperatura para asegurar un funcionamiento suave y minimizar el desgaste de las piezas móviles.



- Filtros: Filtros de aire y aceite que necesitan ser reemplazados regularmente (cada 6 meses) para mantener la eficiencia operativa y prevenir la entrada de contaminantes en el sistema.

- Piezas de Desgaste: Componentes como juntas, anillos de desgaste y válvulas que se sustituyen regularmente debido al uso continuo y la exposición a condiciones extremas.

- Herramientas Especializadas: Herramientas de precisión necesarias para realizar tareas de mantenimiento delicadas, como calibradores, dinamómetros y extractores.

Consumibles:

- Materiales de Limpieza: Solventes industriales, paños libres de pelusa, y otros materiales de limpieza para mantener las turbinas libres de residuos y en condiciones óptimas.

- Equipos de Protección Personal (EPP): Guantes resistentes a cortes, gafas de seguridad, protectores auditivos, y trajes ignífugos para garantizar la seguridad del personal durante las operaciones de mantenimiento.

- Productos Químicos: Inhibidores de corrosión, aditivos para el tratamiento de agua y otros productos químicos que son esenciales para mantener la integridad de los sistemas asociados.

Software y Documentación:

- Licencias de Software: Licencias para el software de gestión de mantenimiento (SAP), incluyendo módulos adicionales que faciliten la programación, seguimiento y optimización de las tareas de mantenimiento.

- Documentación Técnica: Manuales de operación y mantenimiento, hojas de datos de seguridad de materiales (MSDS), y otros documentos técnicos necesarios para guiar las actividades de mantenimiento.

4.5.2 Horas-hombre Requeridas

1. Estimación de Horas-hombre:



Tareas de Inspección y Diagnóstico:

- Personal Involucrado: Técnicos en mantenimiento mecánico, eléctrico e instrumentistas.

- Horas Hombre Estimadas: 120 horas-hombre mensuales distribuidas en inspecciones rutinarias de los sistemas principales de las turbinas.

Tareas de Mantenimiento Preventivo:

- Personal Involucrado: Ingenieros de mantenimiento, supervisores y técnicos especializados.

- Horas-hombre Estimadas: 200 horas hombre mensuales para llevar a cabo actividades preventivas, como la lubricación de componentes, cambio de filtros, y ajuste de piezas críticas.

Capacitación del Personal:

- Personal Involucrado: Todo el personal de mantenimiento.

- Horas Hombre Estimadas: 40 horas hombre mensuales para la formación continua en los nuevos procedimientos y el uso del software de gestión.

Monitoreo y Evaluación de Resultados:

- Personal Involucrado: Ingenieros de confiabilidad, ingenieros de mantenimiento y analistas de datos.

- Horas-hombre Estimadas: 60 horas-hombre mensuales para el seguimiento de KPIs y la elaboración de informes sobre el desempeño del plan de mantenimiento.

2. Distribución de Tareas:

Tareas Semanales: Actividades regulares de inspección visual y medición de parámetros críticos, que requerirán aproximadamente 40 horas hombre por semana.

Tareas Mensuales: Mantenimiento preventivo y ajuste de componentes que no necesitan intervención semanal, estimado en 80 horas hombre por mes.



Tareas Trimestrales: Intervenciones más extensas, como la revisión completa de turbinas, programadas cada trimestre y estimadas en 150 horas hombre.

4.5.3 Equipos Necesarios

1. Equipos de Diagnóstico:

Analizadores de Vibraciones: Herramientas para detectar desalineaciones y problemas en los rodamientos mediante el análisis de vibraciones.

Termógrafos Infrarrojos: Equipos para medir temperaturas en superficies críticas, identificando puntos calientes que podrían indicar problemas potenciales.

Ultrasonidos: Dispositivos para la detección de fugas de aire y otros gases, así como para la inspección de piezas internas no visibles.

Medidores de Espesor: Instrumentos para verificar el desgaste en tuberías y carcasas de las turbinas.

2. Herramientas de Mantenimiento:

Llaves Dinamométricas: Para asegurar que todos los tornillos y pernos se ajusten a los valores de torque especificados por el fabricante.

Extractores Hidráulicos: Para remover componentes como rodamientos y engranajes sin dañar las piezas.

Sistemas de Levantamiento: Grúas y polipastos para manejar piezas pesadas durante el desmontaje y montaje de las turbinas.

3. Sistemas de Monitoreo Continuo:

Sensores de Temperatura y Presión: Integrados en las turbinas para monitorear continuamente las condiciones operativas y alertar sobre desviaciones que requieran intervención.

Controladores Lógicos Programables (PLC): Para la automatización de procesos de control y monitoreo en tiempo real.



Sistema de Gestión SAP: Configurado para soportar la planificación, ejecución y seguimiento de todas las tareas de mantenimiento.

4. Infraestructura de Apoyo:

Talleres equipados: Talleres con bancos de trabajo, iluminación adecuada, sistemas de ventilación, y almacenamiento para herramientas y repuestos.

Vehículos de Mantenimiento: Vehículos equipados para transportar herramientas y personal a las distintas ubicaciones de la planta.

4.6 Cronograma y Tiempos de Ejecución

El cronograma y los tiempos de ejecución son fundamentales para garantizar que el plan de mantenimiento preventivo se implemente de manera eficaz y dentro de los plazos establecidos. A continuación, se detalla un cronograma con los tiempos de ejecución estimados para cada fase del proyecto:

1. PREPARACIÓN Y PLANIFICACIÓN INICIAL (MES 1 A MES 2)

- **Reuniones de Inicio del Proyecto:**

- Tiempo Estimado: 2 semanas.

- Descripción: Reuniones con el equipo de mantenimiento, ingeniería y administración para definir los objetivos, alcances y expectativas del proyecto. Estas reuniones permitirán coordinar esfuerzos y asegurar que todos los involucrados estén alineados con los objetivos del plan.

- **Revisión de Documentación y Registros:**

- Tiempo Estimado: 4 semanas.

- Descripción: Análisis de la documentación existente, como manuales técnicos, registros históricos de mantenimiento, y datos de rendimiento de las turbinas. Este paso es crucial para identificar áreas de mejora y desarrollar un plan basado en datos reales.

2. INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO (MES 2 A MES 4)

- **Investigación de Mejores Prácticas:**



- Tiempo Estimado: 3 semanas.

- Descripción: Investigación detallada de las mejores prácticas en mantenimiento preventivo de turbinas. Esto incluirá la revisión de literatura técnica, estudios de caso y benchmarks de la industria para asegurar que el plan esté alineado con los estándares más avanzados.

- **Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo:**

- Tiempo Estimado: 5 semanas.

- Descripción: Desarrollo del plan de mantenimiento específico para las turbinas de la planta, incluyendo la definición de tareas, frecuencia de mantenimiento, y asignación de recursos. Este paso también incluirá la creación de un calendario detallado para cada actividad de mantenimiento.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO (MES 4 A MES 5)

- **Capacitación del Personal:**

- Tiempo Estimado: 4 semanas.

- Descripción: Formación del equipo de mantenimiento en los nuevos procedimientos, herramientas y sistemas implementados como parte del plan. Esto asegurará que todos los técnicos estén preparados para ejecutar las tareas de mantenimiento con eficiencia y seguridad.

- **Adquisición de Recursos y Herramientas:**

- Tiempo Estimado: 2 semanas.

- Descripción: Compra de los repuestos, materiales y equipos necesarios para la ejecución del plan. Este paso incluye la verificación de stock existente y la adquisición de cualquier insumo adicional requerido.

- **Integración del Plan en Sistemas de Gestión:**

- Tiempo Estimado: 2 semanas.

- Descripción: Configuración del software de gestión de mantenimiento (SAP) para reflejar el nuevo plan de mantenimiento. Esto incluye la programación de tareas, generación de órdenes de trabajo y la configuración de alertas automáticas.



4. MONITOREO Y EVALUACIÓN (MES 5 A MES 6)

- **Establecimiento de Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs):**
 - Tiempo Estimado: 2 semanas.
 - Descripción: Definición e implementación de KPIs para evaluar la efectividad del plan de mantenimiento, como la reducción de tiempos de inactividad, el cumplimiento de cronogramas, y la optimización de costos.
- **Seguimiento y Análisis de Resultados:**
 - Tiempo Estimado: 4 semanas.
 - Descripción: Monitoreo continuo de los KPIs y análisis de los resultados obtenidos. Se realizarán ajustes al plan según sea necesario, basándose en los datos recopilados y en la retroalimentación del personal.

5. AJUSTES Y MEJORAS CONTINUAS (MES 6 EN ADELANTE)

- **Revisión Periódica del Plan de Mantenimiento:**
 - Tiempo Estimado: Cada 3 meses.
 - Descripción: Revisión y actualización del plan de mantenimiento para adaptarse a cambios en las condiciones operativas, nuevas tecnologías o mejoras identificadas a través del monitoreo continuo.

4.7 Costos Detallados

El cálculo de los costos detallados es esencial para garantizar que el plan de mantenimiento preventivo sea viable desde un punto de vista económico. A continuación, se presenta una estimación de los costos asociados a la implementación del plan.

1. COSTOS DE PERSONAL

- **Salarios y Horas Extra:**
 - Costo Estimado: \$ 50,000 dólares anuales.
 - Descripción: Este costo incluye los salarios del personal de mantenimiento dedicado al proyecto, además de horas extra necesarias durante



la implementación del plan, especialmente durante las fases de capacitación y monitoreo intensivo.

- **Capacitación:**

- Costo estimado: \$10,000 dólares.

- Descripción: Incluye el costo de formadores externos, materiales de capacitación, y el tiempo invertido por el personal en entrenamiento. Es fundamental para asegurar que todos los técnicos estén preparados para seguir los nuevos procedimientos.

2. COSTOS DE MATERIALES Y EQUIPOS

- **Materiales de Mantenimiento:**

- Costo estimado: \$ 50,000 dólares anuales.

- Descripción: Incluye repuestos, lubricantes, sellos, y otros materiales consumibles necesarios para el mantenimiento preventivo. Estos costos son recurrentes y se distribuyen a lo largo del año según el cronograma de mantenimiento.

- **Equipos Especializados:**

- Costo Estimado: \$ 70,000 dólares.

- Descripción: Compra de equipos de diagnóstico y herramientas especializadas que serán necesarios para la implementación del plan. Este es un costo único, con mantenimiento adicional requerido para los equipos a lo largo del tiempo.

3. COSTOS DE SOFTWARE Y GESTIÓN

- **Licencias de Software (SAP):**

- Costo Estimado: \$ 15,000 dólares.

- Descripción: Incluye la adquisición de licencias adicionales para el software de gestión de mantenimiento, así como cualquier costo relacionado con la integración del nuevo plan de mantenimiento en el sistema existente.

- **Consultoría y Soporte Técnico:**

- Costo estimado: \$ 10,000 dólares.



- Descripción: Gastos asociados a la contratación de consultores especializados en SAP y mantenimiento preventivo para asistir en la configuración inicial y en la solución de problemas durante la fase de implementación.

4. COSTOS INDIRECTOS

- **Interrupciones en la Producción:**

- Costo estimado: \$ 40,000 dólares.

- Descripción: Potenciales pérdidas económicas debido a paradas programadas para la ejecución del mantenimiento preventivo. Aunque estas interrupciones están planificadas, es importante considerar su impacto en la producción.

- **Logística y Transporte:**

- Costo estimado: \$ 5,000 dólares.

- Descripción: Incluye los costos de transporte de herramientas, repuestos y personal, especialmente para tareas que se realicen fuera del horario habitual o en ubicaciones alejadas dentro de la planta.

5. COSTOS TOTALES

- **Costo Total Estimado para el primer año: \$ 250,000 dólares.**

Descripción: La suma de todos los costos anteriores proporciona una visión general de la inversión necesaria para la implementación y operación del plan de mantenimiento preventivo durante el primer año. Estos costos pueden ajustarse en años subsecuentes, a medida que se optimizan los procesos y se reducen las necesidades de capacitación y adquisición de equipos.



CAPÍTULO 5: Conclusiones

- **MEJORA DE LA CONFIABILIDAD OPERATIVA:**

La implementación del plan de mantenimiento preventivo diseñado específicamente para las turbinas de la planta de Cargill Villa Mercedes mejora significativamente la confiabilidad operativa. La identificación y corrección de fallos antes de que ocurran problemas mayores, permite una operación más estable y segura, reduciendo la probabilidad de paradas inesperadas que podrían afectar la producción y el suministro de energía.

- **REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS:**

Aunque el plan de mantenimiento preventivo requiere una inversión inicial considerable, esta se ve compensada por la reducción de los costos operativos a largo plazo. Al minimizar las fallas catastróficas y reducir las reparaciones de emergencia, la planta experimentará un ahorro significativo en los costos de reparación y repuestos, así como en el tiempo de inactividad no planificado.

- **OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES:**

La planificación detallada y la asignación eficiente de horas-hombre y recursos materiales garantizan que los esfuerzos de mantenimiento se utilicen de manera óptima. Esto no solo maximiza la eficiencia del equipo de mantenimiento, sino que también permite una mejor gestión de los inventarios de repuestos y materiales, asegurando que los recursos estén disponibles cuando sean necesarios sin incurrir en exceso o escasez.

- **CUMPLIMIENTO NORMATIVO Y SEGURIDAD:**

El plan de mantenimiento preventivo también asegura que la planta cumpla con todas las normativas de seguridad y medioambientales vigentes. Al seguir un enfoque estructurado y documentado, la planta puede demostrar conformidad en auditorías y revisiones regulatorias, lo que protege a la empresa de posibles sanciones y mejora su reputación en la industria.

- **MEJORA CONTINUA Y ADAPTABILIDAD:**

La inclusión de un ciclo de retroalimentación y ajuste continuo en el plan garantiza que las prácticas de mantenimiento evolucionen con el tiempo. Al integrar las lecciones aprendidas y los resultados de los indicadores clave de



rendimiento (KPIs), el plan puede ser ajustado para enfrentar nuevas necesidades o desafíos operativos, asegurando así su relevancia y efectividad en un entorno en constante cambio.

- **INTEGRACIÓN EFICIENTE CON SISTEMAS DE GESTIÓN:**

La integración del plan de mantenimiento preventivo con el sistema SAP de la planta facilita una gestión más centralizada y eficiente de las actividades de mantenimiento. Esto permite un seguimiento detallado del desempeño, la programación y los costos asociados, proporcionando a la dirección una visibilidad completa sobre el estado del mantenimiento y su impacto en la operación general.

- **CAPACITACIÓN Y DESARROLLO DEL PERSONAL:**

La implementación del plan de mantenimiento preventivo incluye la capacitación del personal, lo que no sólo mejora la ejecución de las tareas de mantenimiento, sino que también contribuye al desarrollo profesional del equipo. Al familiarizarse con las mejores prácticas y los últimos avances en mantenimiento, el personal se convierte en un recurso más valioso para la empresa.

- **SOSTENIBILIDAD Y RESPONSABILIDAD SOCIAL:**

La reducción de fallas y el mantenimiento eficiente de las turbinas contribuyen a un uso más sostenible de los recursos energéticos. Esto tiene un impacto positivo en la huella ambiental de la planta y además, refuerza el compromiso de la empresa con la responsabilidad social corporativa, al operar de manera que se minimicen los residuos y se maximice la eficiencia energética.

- **MITIGACIÓN DE RIESGOS OPERACIONALES:**

Al implementar un plan de mantenimiento preventivo bien estructurado, la planta de Cargill Villa Mercedes está mejor preparada para mitigar riesgos operacionales significativos. La anticipación y gestión proactiva de problemas potenciales asegura que la operación pueda continuar de manera fluida, incluso en situaciones de alto estrés o demanda.

BENEFICIOS A LARGO PLAZO:

Finalmente, los beneficios a largo plazo de este plan se extienden más allá de la simple reducción de costos y el aumento de la eficiencia. Al establecer



un sistema robusto de mantenimiento preventivo, la planta se posiciona para mantener un alto nivel de rendimiento operativo, lo que puede traducirse en una ventaja competitiva en el mercado y en una base sólida para futuras expansiones o innovaciones.



ANEXO

Ejemplo de plan de mantenimiento para las paradas

Solar Turbines A Caterpillar Company		PLANEACION CARGIL / Glucovil VM													Fecha						
DOCUMENTO : PROG_M_FLYFFBR BC REVISION 2		PLAN ANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Cargil Glucovil VM Taurus 70 GENERADOR																			
No.	Actividad	DIA	Sistema	Especialidad	Duración	Frecuencia	En servicio (S/N)	8F	9D	10F	11F	12F	13F	14F	15F	16F	17F	18F	19F	Comentarios	
1	Realizar prueba en modo manual y en modo automático del sistema contraincendio.	1	EC	I	2	6M	N													B2+in cbrme n1 cb2	
2	Pesar los tanques de CO2 y verificar su carga adecuada.	1	EC	I	3	6M	N													B2+in cbrme n1 cb2	
3	Realizar prueba de las persianas actuadas por el sistema contraincendio.	1	EC	I	2	6M	N													B2+in cbrme n1 cb2	
4	Revisar la condición de los ameses de termostatos y verificar su respuesta (T5)	1	EC	I	2	6M	N													B2+in cbrme n1 cb2	
5	Remover e Inspeccionar el cable de ignición. Revisar si no hay erosión en la buja y checar su separación, Reemplazarla si es necesario.	1	EC	I	1	6M	N													B1+in cbrme n1 cb1	
6	Prueba y Calibre el sistema de control de sobrevelocidad de respaldo.	1	EC	I	1	6M	N													B1+in cbrme n1 cb1	
7	Inspeccionar visualmente que todos los manómetros e indicadores operen correctamente	1	EC	I	1	6M	S													B1+in cbrme n1 cb1	
8	Verificar la calibración de los monitores de temperatura	1	EC	I	2	6M	N													B2+in cbrme n1 cb2	
9	Verificar el sistema INSIGHT para detectar cualquier anomalía o tendencia a falla.	1	EC	C	4	6M	S													B1	
10	Revisar y Calibrar todos los Transmisores de presión	1	EC	I	7	6M	N													B1+in cbrme n1 cb1	
11	Revisar y Calibrar todos los interruptores de presión y válvulas de seguridad que se requiera	1	EC	I	7	6M	N													B1+in cbrme n1 cb2	
12	Realizar limpieza y verificar calibración del sistema sensor de nivel de gas en el encabinado.	1	EC	I	1	6M	N													B1+in cbrme n1 cb1	
13	Medir voltaje de cada batería. Determinar si alguna necesita ser reemplazada.	1	EC	E	1	6M	LOTO													Beoti + Beo2	
14	Medir voltajes de salida del cargador de baterías. Flotante y High Rate. Ajustar de ser necesario	1	EC	E	1	6M	LOTO													Beoti + Beo2	
15	Realizar limpieza del cargador de baterías y reapriete de todas las terminales eléctricas	1	EC	E	1	6M	LOTO													Beoti + Beo2	
16	Inspeccionar todos los buses de tierra, asegúrese que estén bien conectadas, con el valor de impedancia adecuado, secas, limpias y libres de corrosión.	1	EC	E	2	6M	S													Beoti + Beo2	
17	Inspeccionar si existe desgaste en el mecanismo de álabes variables del compresor de la máquina. Cheque si existen brazos doblados, bujes o uniones flojas. Lubricar si necesario	1	SA	M	1	6M	N													B2	
18	Checar y Calibrar el sistema de activación de los IGV(Inler Guide Vanes).	1	SA	M	1	6M	N													B2 (solo de ser necesario)	
19	Cheque el nivel del tanque de aceite y registre el consumo de aceite. Inspeccionar y reemplazar los filtros principales de aceite lubricante. F S901-2	1	SL	M	3	6M	N													Mecanico1 + Mecanico2	
20	Inspeccionar y reemplazar el filtro de aceite del sistema de respaldo.	1	SL	M	2	6M	N													Mecanico1 + Mecanico2	
21	Lubricar los cojinetes del ventilador del encabinado del encabinado.	1	MG	M	2	6M	N													Mecanico3 + Ayud Mec1	
22	Revisar el historial de la temperatura de aceite lubricante y determinar si el intercambiador de calor necesita mantenimiento.	1	SL	M	3	6M	LOTO													Mecanico3 + Ayud Mec1	
23	Verifique la operación del enfriador de aceite yefectue limpieza	1	SL	M	1	6M	S													Mecanico3 + Ayud Mec1	
24	Verifique la operación del eliminador de niebla para el venteo de del tanque de aceite	1	SL	M	1	6M	S													Mecanico3 + Ayud Mec1	
25	Probar el correcto funcionamiento de los actuadores electrónicos de las válvulas del sistema de gas combustible	1	SG	I	1	6M	LOTO													B1+in cbrme n1 cb1	
26	Limpie el colador F931-1 de la línea principal de gas	1	SG	M	1	6M	N													Mecanico1 + Mecanico2	
27	Reemplace el elemento filtrante principal de gas F931	1	SG	M	1	6M	N													Mecanico1 + Mecanico2	
28	Limpie el elemento filtrante de gas piloto F911-1	1	SG	M	1	6M	N													Mecanico1 + Mecanico2	
29	Hacer prueba de aislamiento al motor eléctrico del encabinado.	1	SAM	E	2	6M	LOTO													Beoti + Beo2	
30	Realice prueba de aislamiento en los devanados del motor eléctrico de arranque.	1	SAM	E	2	6M	LOTO													Beoti + Beo2	
31	Realice prueba de aislamiento en los devanados del motor de pre-post lubricación.	1	SAM	E	2	6M	LOTO													Beoti + Beo2	
32	Lubrique el motor eléctricos de arranque, el motor de la bomba de Pre-Post lubricación y el motor de la bomba de respaldo de CD.	1	MG	M	4	6M	N													Mecanico3 + Ayud Mec1	
33	Realizar limpieza del banco de baterías y reapriete de terminales siguiendo todos los procedimientos de seguridad.	2	EC	E	2	6M	LOTO													Beoti + Ayud elect	
34	Cambie la batería de Lithium del controlador lógico.	2	EC	I	1	A	N													B1	
35	Prueba los monitores de vibración del paquete turbogenerador y calibre los transductores en caso de ser necesario	2	EC	I	3	6M	N														B2 + Instrumento 21
36	Realice Limpieza de tarjetas electrónicas del Variador de Frecuencia de los motores de arranque y reapriete de todas las terminales eléctricas.	2	EC	E	3	6M	LOTO													Beoti + Beo2	
37	Prueba e inspección de la válvula de sangrado. Desmontar únicamente si es necesario	2	SA	M	3	6M	N														B1 + Mecanico2
38	Remover e inspeccionar la antorcha si tiene grietas, erosión excesiva, inspeccionar tubo de descarga si se encuentra desgastado, reemplazar de ser necesario	2	SG	M	2	6M	N														B2 + Mecanico2
39	Inspeccionar las válvulas de gas combustible y limpiarlas si es necesario	2	SG	M	4	6M	N														B1 + Mecanico1 +
40	Probar el funcionamiento adecuado válvulas solenoides y reguladores de presión, cambiar internos de ser requerido. Inspeccionar los manifolds por signos de decoloración por sobrecalentamiento.	2	SG	I	2	A	N														B2 + Instrumento 21
41	Desensamble los acoples de interconexión de los motores de arranque y de la bomba principal de aceite e inspeccione los piñones que no tengan desgaste o daño	2	MG	M	4	A	LOTO														B2 + Mecanico2 +
42	Inspeccionar los clutches de los arrancadores de la turbina. asegúrese de que este embrague hacia el sentido de giro del motor y gre libre hacia el otro lado	2	SAM	M	4	6M	LOTO														B1 + Mecanico1 + Ayud Mec2



Referencia bibliográfica y citas

[1] William W. Bathie: “Fundamentos de turbinas de gas”, 2002.

[2] Claudio Mataix: “Turbomáquinas térmicas”, 1991

[3] José Emilio Sánchez Gómez: “Manual de mantenimiento y reglamentación de instalaciones térmicas”, 2022.

Tokutaro Suzuki: “TPM en Industrias de Proceso”, 2017.