

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Propuesta de gestión de mantenimiento basada en
Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para mejorar la
disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una
Planta Concentradora minera en Tacna - Perú, en 2025**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Elaborado por

José Manuel Yataco Espinoza

 [0009-0002-0163-4200](https://orcid.org/0009-0002-0163-4200)

Asesor

MSc. Adrián Zapata Sernaque

 [0000-0002-5303-8286](https://orcid.org/0000-0002-5303-8286)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Yataco, 2025)
Referencia/Reference	Yataco, J. (2025). <i>Propuesta de gestión de mantenimiento basada en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una Planta Concentradora minera en Tacna - Perú, en 2025.</i> [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A Dios, quien me ha colmado de bendiciones, valores, retos y logros. A mis padres José y Marianella, quienes con esfuerzo y dedicación me inculcaron las virtudes que me convirtieron en el hombre que soy. A mis hermanas Andrea y Diana, quienes me sacan una sonrisa en cada conversación. A Nicoll que me motiva a ser mejor y a las personas que siempre confiaron en mí.

Agradecimientos

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se profundizó mi amor por la ingeniería. A mis padres, hermanas y amigos, que me apoyaron durante el desarrollo de esta investigación. Al ingeniero Adrián Zapata Sernaque, por su asesoría en la elaboración de esta investigación y sus comentarios acertados.

Lista de Contenidos

	Pág.
Lista de Contenidos	v
Lista de Tablas	ix
Lista de Figuras	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
Introducción	xiv
Capítulo I. Generalidades	1
1.1 Antecedentes de la investigación	1
1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio	6
1.3 Formulación del Problema	11
1.3.1 Problema Principal	11
1.3.2 Problemas Específicos	11
1.4 Justificación e Importancia	11
1.5 Objetivos	12
1.5.1 Objetivo General	12
1.5.2 Objetivo Específico	12
1.6 Hipótesis	13
1.6.1 Hipótesis General	13
1.6.2 Hipótesis Específicas	13
1.7 Variables y Operacionalización de variables	13
1.7.1 Operacionalización de variables	13
1.8 Metodología de la Investigación	14
1.8.1 Unidades de Análisis	14
1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación	14
1.8.3 Diseño de la Investigación	15

1.8.4	Fuentes de Información.....	15
1.8.5	Población y Muestra	15
1.8.6	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	16
1.8.7	Análisis y Procesamiento de Datos	16
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual		17
2.1	Bases Teóricas	17
2.1.1	Gestión de mantenimiento	17
2.1.2	Tipos de mantenimiento	17
2.1.2.1	Mantenimiento correctivo.....	18
2.1.2.2	Mantenimiento de precaución.....	18
2.1.3	Modelos de mantenimiento.....	18
2.1.3.1	Modelo correctivo.....	19
2.1.4	Variables del mantenimiento	19
2.1.4.1	Disponibilidad.	20
2.1.4.2	Mantenibilidad.	20
2.1.4.3	Confiabilidad.	21
2.1.4.4	Tiempo medio entre fallas (MTBF).....	22
2.1.4.5	Tiempo medio para reparar (MTTR).....	22
2.1.5	Distribución Weibull en fiabilidad	22
2.1.6	Análisis de modos de falla	25
2.1.6.1	Fallas primarias.....	25
2.1.6.2	Fallas secundarias.....	25
2.1.7	Método de asignación de criticidad de fallas	26
2.1.8	Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	27
2.1.8.1	¿Cuáles son las funciones?	28
2.1.8.2	¿De qué forma puede fallar?	28
2.1.8.3	¿Qué causa que falle?	29
2.1.8.4	¿Qué sucede cuando falla?	29

2.1.8.5	¿Qué ocurre si falla?	29
2.1.8.6	¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?	29
2.1.8.7	¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?	29
2.1.9	Compresores.....	30
2.1.9.1	Compresores de pistón.....	30
2.1.9.2	Compresores de tornillo rotativo.....	31
2.1.9.3	Compresores Scroll.....	31
2.1.9.4	Compresores de diafragma.....	33
2.1.9.5	Compresores de uña.....	33
2.1.9.6	Compresores de paletas.....	33
2.1.9.7	Compresores centrífugos.....	33
2.1.10	Leyes de termodinámica y ecuaciones.....	34
2.1.10.1	Primera ley de la termodinámica.....	37
2.1.10.2	Segunda ley de la termodinámica.....	37
2.1.10.3	Leyes para gases perfectos.....	37
2.1.10.4	Ciclos de compresión.....	38
2.1.10.5	Compresión con múltiples etapas.....	39
2.1.11	Compresor de doble tornillo helicoidal.....	39
2.2	Marco conceptual: Definición de términos o conceptos	42
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		43
3.1	Descripción operacional de los compresores	43
3.2	Funcionamiento y sistemas	47
3.3	Análisis de modos y efectos de falla.....	52
3.4	Análisis de criticidad.....	60
3.5	Plan de mantenimiento.....	65
3.6	Gestión de mantenimiento	69
Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados.....		72
4.1	Resultados	72

4.2	Contrastación de hipótesis	74
4.3	Discusión de resultados	74
	CONCLUSIONES	76
	RECOMENDACIONES	77
	REFERENCIAS	78
	Anexos	83

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Matriz de operacionalización de variables.....	14
Tabla 2: Asignación de valor de FF.....	26
Tabla 3: Asignación de valor de IP.....	26
Tabla 4: Asignación de valor de SS.....	27
Tabla 5: Asignación de valor de CR.....	27
Tabla 6: Asignación de valor de TR.....	27
Tabla 7: Cantidad de compresores por modelo.....	44
Tabla 8: Tag de los compresores modelo ZT250.....	45
Tabla 9: Confiabilidad de los compresores.....	46
Tabla 10: Comportamiento de la confiabilidad.....	47
Tabla 11: Descripción de cada componente.....	47
Tabla 12: Información de diagramas y componentes.....	50
Tabla 13: Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de compresión de aire.....	52
Tabla 14: Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de lubricación.....	54
Tabla 15: Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de enfriamiento.....	55
Tabla 16: Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de accionamiento.....	57
Tabla 17: Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema eléctrico y control.....	59
Tabla 18: Cantidad de fallas y horas por sistema.....	60
Tabla 19: Componentes con mayor incidencia de fallas en los sistemas 1 y 2.....	61

Tabla 20: Determinación de los campos para criticidad de fallas	61
Tabla 21: Clasificación de tipos de falla	62
Tabla 22: Cuantificación de criticidad de los modos de falla	62
Tabla 23: Actividades de mantenimiento para modos de falla inadmisibles con frecuencia mayor a 1	65
Tabla 24: Actividades de mantenimiento para modos de falla urgentes con frecuencia mayor a 1	68
Tabla 25: Modificaciones a los planes de mantenimiento existentes.....	69
Tabla 26: Cálculo de la disponibilidad para los compresores	71
Tabla 27: Cantidad de fallas de acuerdo con su clasificación	72
Tabla 28: Modificatorias a los planes de mantenimiento	72
Tabla 29: Valores MTBF y MTTR inicial.....	73

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Tornillos helicoidales con desgaste de un compresor	7
Figura 2: Tipos de desalineamiento entre dos ejes	8
Figura 3: Tipos de ciclos de compresión	9
Figura 4: Variaciones del error humano durante el ciclo de vida de un sistema	10
Figura 5: Variación de confiabilidad y probabilidad de falla	21
Figura 6: Variación en las curvas de densidad de probabilidad y tasa de fallas debido al parámetro β	23
Figura 7: Pasos para la implementación de una metodología RCM	28
Figura 8: Compresor de pistón Atlas Copco	31
Figura 9: Tornillos helicoidales de un compresor tipo tornillo	32
Figura 10: Funcionamiento de espirales de un compresor scroll	32
Figura 11: Elemento compresor de un compresor de uña	33
Figura 12: Rodete de compresor centrífugo	34
Figura 13: Primer proceso del ciclo de compresión	35
Figura 14: Segundo proceso del ciclo de compresión	35
Figura 15: Tercer proceso del ciclo de compresión	36
Figura 16: Cuarto proceso del ciclo de compresión	36
Figura 17: Tipos de proceso de compresión	38
Figura 18: Diagrama p-V para un compresor de dos etapas	39
Figura 19: Principios de compresión en compresores de doble tornillo helicoidal	40
Figura 20: Vista transversal de un compresor de tornillos exento de aceite	41
Figura 21: Diagrama de procesos del desarrollo del trabajo de investigación	43
Figura 22: Componentes y flujos del compresor ZT250	48
Figura 23: Variación de disponibilidad de los compresores	73

Resumen

La presente investigación versa sobre la propuesta de una gestión de mantenimiento para una flota de compresores tipo tornillo helicoidal. Se escogió como objeto de estudio una flota de cinco compresores ZT250 de la marca Atlas Copco, representando el 22% de la flota total instalada.

La investigación pretende comprobar si una gestión de mantenimiento basada en RCM incrementa la disponibilidad de la flota de compresores.

Se emplean la metodología RCM, herramientas como el AMEF y análisis de criticidad de fallas. Gracias a su aplicación, encontramos que los sistemas críticos son los de lubricación, enfriamiento y eléctrico y control. Se clasifican los métodos de falla en inadmisibles, prioritarios y aceptables.

Se modifica la gestión de mantenimiento actual y mediante el empleo de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, se reducen los métodos de falla en motor ventiladores y enfriadores.

Posterior a la determinación de la nueva gestión de mantenimiento se calcula un incremento de la disponibilidad en 1.88% alcanzando el 99.30%, con un incremento en el costo de mantenimiento preventivo de 4900 USD anuales.

Palabras clave: compresores, mantenimiento, disponibilidad, confiabilidad, mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

Abstract

This research focuses on the proposal of a maintenance management for a fleet of helical screw compressors. A fleet of five ZT250 compressors made by Atlas Copco representing 22% of the total installed fleet were chosen as subjects of study.

The research attempts to determine whether an RCM based maintenance management increases the availability of a fleet of compressors.

The RCM methodology, tools like FMEA and failure criticality analysis are used. Through its application, it is determined that the critical systems are lubrication, cooling and electrical and control. Failure modes are classified as inadmissible, priority and acceptable.

Current maintenance management is modified and, through the application of preventive and predictive maintenance strategies, failure modes in motor fans and coolers are reduced.

After determining the new maintenance management, an increase in availability of 1.88% is estimated, reaching 99.30%, with an increase in preventive maintenance cost of USD 4900 per year.

Keywords: compressor, maintenance, availability, reliability, reliability centered maintenance (RCM).

Introducción

La presente investigación consta de cuatro capítulos a través de los cuales se presenta la propuesta de una gestión de mantenimiento para compresores tipo tornillo enfocada a mejorar la disponibilidad.

El capítulo uno, generalidades, presenta el estado actual sobre la gestión de mantenimiento y estrategias de mantenimiento en compresores a nivel global y nacional. También se presenta brevemente la necesidad de mantener una disponibilidad elevada en todos los equipos de una planta, incluyendo compresores, para que las empresas sean competitivas a nivel mundial.

Adicionalmente se define la metodología a usar y las herramientas. Se adopta el enfoque aplicado para desarrollar una gestión de mantenimiento basada en RCM, para incrementar la disponibilidad en cinco compresores tipo tornillo ubicados en una planta concentradora de una unidad minera a 3000 m.s.n.m.

El capítulo dos comprende el marco teórico necesario para que los lectores comprendan la teoría y fórmulas que se presentarán en posteriores capítulos. Iniciaremos definiendo la gestión de mantenimiento, así como sus diferentes tipos y modelos. Ahondaremos en los indicadores del mantenimiento, los cuales serán usados para comparar el estado de las variables de la investigación. Así mismo, se presenta información sobre los compresores y su relación con la termodinámica. De los compresores tipo tornillo, presentaremos su funcionamiento. Finalmente presentamos la metodología RCM y las preguntas que requieren ser respondidas para su aplicación.

El capítulo tres presenta el desarrollo del trabajo de suficiencia. Iniciamos definiendo los sistemas críticos de los compresores tipo tornillo ZT250. Recopilamos información sobre las fallas de los últimos 3 años. Se realiza el análisis de modos y efectos de falla para determinar el impacto y con la información obtenida realizamos un análisis de criticidad de fallas.

Con la tabla de criticidad de modo de fallas, las clasificamos en inadmisibles, prioritarias y aceptables. Dependiendo de la clasificación del modo de falla, su frecuencia e impacto en seguridad y medio ambiente, se definen estrategias de mantenimiento para evitarlas o reducir su criticidad.

Finalmente se compilan las estrategias, se añaden los materiales requeridos para los mantenimientos y el personal necesario, para definir una gestión de mantenimiento.

El capítulo cuatro presenta los resultados, encontrando la hipótesis positiva, una gestión de mantenimiento basada en RCM incrementa la disponibilidad, a costa de un incremento en costo y personal. En el apartado de recomendaciones, se sugiere la aplicación de la misma metodología a la totalidad de los compresores debido a su beneficio en la disponibilidad.

Capítulo I. Generalidades

1.1 Antecedentes de la investigación

En el artículo de Zhou, D. et al. (2021) titulado “Study on the maintenance scheduling model for compressor units of long-distance natural gas networks considering actual maintenance demands” los investigadores toman como objeto de estudio 31 compresores de una línea de distribución de gas en China para evaluar el impacto de las políticas de mantenimiento en la disponibilidad.

Previo a la implementación de la investigación, el mantenimiento se realizaba con un enfoque unitario, con una frecuencia determinada por horas de operación. La segura y estable operación de la distribución de gas está estrechamente relacionada a la disponibilidad de los compresores; por ello el objetivo de la investigación es incrementar la disponibilidad y reducir el costo de mantenimiento.

El mantenimiento propuesto por los investigadores considera la ubicación física de los compresores y la relación que tienen entre ellos, sea serie o paralelo, elaborando planes específicos para cada uno de los casos, tomando de referencia los planes de mantenimiento recomendados por los fabricantes. La inclusión de la relación entre compresores permite un mantenimiento multinivel que considera la flota de compresores como un conjunto en lugar de equipos individuales. Adicionalmente toman como estrategia el mantenimiento a condición, el cual emplea monitoreo constante mediante instrumentos para detectar fallas antes de que ocurran, sin caer en un sobre mantenimiento de los equipos.

La modificación del mantenimiento por horas de operación a un mantenimiento a condición, que adicionalmente considera la ubicación de los equipos y su relación, reduce el costo de mantenimiento en 37.9% si se considera una sola brigada de mantenimiento y en un 52.9% considerando múltiples brigadas. Sin embargo, al aplicar estrategias para incrementar la disponibilidad, se encuentra que un aumento del 1.6% de disponibilidad

requiere incrementar la inversión en 0.6% demostrando que los incrementos de disponibilidad son acompañados por incrementos de costo.

En el artículo de Odi-Owei, T. et al. (2023) titulado “Reliability-Centered Maintenance Analysis on a Single-Stage Water-Cooled Oil-Injection Screw Compressor” los investigadores buscan incrementar la confiabilidad de un compresor tipo tornillo refrigerado por agua de una sola etapa utilizando como fuente de información un histórico de fallas de los últimos dos años.

El plan de mantenimiento aplicado es basado en la metodología RCM. Inician identificando los componentes críticos que afecten seguridad, medio ambiente y la operación.

Posterior a ello definen los límites de estos componentes y hacen un esquema simplificado del compresor con ellos. Terminado los pasos anteriores inician con las preguntas 1 y 2 del RCM, llenando en una tabla las funciones y fallas de cada componente crítico. Se emplea análisis de modos de falla, efectos y análisis de criticidad (FMECA) a los componentes y mediante un análisis lógico de árbol (LTA) se definen las tareas de mantenimiento.

Finalmente se utiliza la fórmula de la confiabilidad en conjunto con el histórico de fallas para determinar la confiabilidad de cada componente y determinar una frecuencia de mantenimiento. Como resultado encuentra que el FMECA y LTA permiten responder las preguntas de la metodología RCM y definir actividades de mantenimiento para incluir en la gestión.

En el artículo de Patil y Qureshi (2023) titulado “Condition monitoring of screw compressors and induction motors in a food processing industry” se presenta la necesidad de implementar planes de monitoreo de condición de los compresores tipo tornillo.

Para la investigación se utilizaron sensores de vibración para recopilar información, la cual es almacenada y posteriormente procesada y evaluada, para tomar decisiones

respecto al mantenimiento. En equipos rotativos, el monitoreo de vibración permite detectar el 70% de las fallas.

En la investigación se realiza el monitoreo por vibración de un compresor tipo tornillo en los ejes horizontal, vertical y axial. Se comparan las mediciones obtenidas con la tabla de severidad de vibración, realizando actividades de mantenimiento solo cuando excede los valores normales. Las actividades son el alineamiento entre compresor y motor, el ajuste de pernos de la base y la lubricación en rodamientos.

Como conclusión se evidencia la necesidad de incluir un monitoreo de vibración periódico a los compresores, ya que permite detectar múltiples tipos de falla con anticipación.

En la tesis de Procil, M. (2020) titulada “Diseño e Implementación de un Sistema de monitoreo energético para red de aire comprimido en una planta industrial” el investigador diseña e implementa un sistema de monitoreo en la red de aire comprimido de una empresa del rubro de pinturas ubicada en Lima.

En la empresa se encuentran cuatro compresores, de los cuales, tres se encuentran en operación y uno sirve como reserva. En los tableros se encuentran equipos para arranque de los motores, sin embargo, no se tiene ninguna interfaz para visualizar el estado de los compresores.

En el análisis previo a la implementación, el investigador encuentra deficiencias en el control por parte de la empresa, respecto al consumo de energía de los compresores y el consumo de aire comprimido de la planta; sin embargo, si tiene controladas el consumo de energía, gas y agua. Se inicia identificando los compresores y su año de fabricación, posterior a ello diseña e instala un sistema para controlar el consumo mediante el uso de un transmisor de flujo, sensores de presión y pinzas amperimétricas. La información es enviada mediante protocolo de comunicación MODBUS y se recopila en un Human Machine Interface (HMI). Posterior a la implementación encuentra las características de consumo de las áreas de la planta. En la información recopilada se encuentra que: el

requerimiento de aire comprimido de los equipos de planta puede ser abastecido con dos compresores, el compresor número tres trabaja con mayor frecuencia e identifica el área con mayor consumo de aire comprimido.

Finalmente se ejecuta la recomendación de utilizar solo dos compresores y alternar los equipos en funcionamiento, de forma que el incremento de horas sea similar. Posterior a las recomendaciones se redujo el costo anual de la energía de los compresores en un 26% lo cual corresponde a \$16000.

En la tesis se evidencia la poca importancia que tiene la empresa sobre la red de aire comprimido y los compresores, ya que el implementar equipos para monitorear el consumo brinda recomendaciones que representan un ahorro significativo en el costo de energía eléctrica.

En la tesis de Arias y Chiroque (2021) titulada “El mantenimiento preventivo y su relación en la confiabilidad de máquinas compresoras en la planta de óxidos de Pasco S.A.C. Pasco” los investigadores buscan establecer la relación entre la confiabilidad y el mantenimiento preventivo, condición y autónomo. Tienen como objeto de estudio siete compresores de aire, en los que encuentran deficiencias como falta de repuestos, fallas por saturación de filtros, etc.

Respecto al mantenimiento preventivo, utilizando el histórico de fallas de los siete compresores, asignan criticidad a las actividades de mantenimiento y las incluyen en una programación. Se implementa un control de tareas pendientes (backlog) y control de horas de operación. Las actividades preventivas se ejecutan de acuerdo con una programación.

Respecto al mantenimiento basado en condición, proponen la instalación de sistemas de medición y auditorías de la red de aire comprimido. En la dimensión de mantenimiento autónomo, indican conocimientos básicos de operación del equipo, normativas de seguridad y actividades de inspección.

Finalmente se encuentra la relación entre las tres dimensiones de mantenimiento y la confiabilidad de los compresores, recomendando a la empresa dueña de los equipos la implementación del plan de mantenimiento generado.

En la tesis de Luna, J. (2019) titulada “Implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad de compresores estacionarios a tornillo en Toquepala” el investigador aplica la metodología RCM a un grupo de compresores de la unidad minera, buscando incrementar la disponibilidad del sistema de compresores a más del 98%.

El investigador inicia determinando los equipos críticos en los cuales continuará con la implementación de la metodología, encontrando dos compresores denominados CPT DELIX y CPT 15, el cual está encargado de suministrar aire comprimido a los filtros de la concentradora. Una vez definidos los equipos, se pasa a realizar las preguntas del RCM, identificando de dicha forma los sistemas o componentes críticos, el impacto y los requerimientos para su mantenimiento. Gracias a ello se modifica la frecuencia de las rutinas de mantenimiento e intervención del equipo.

Finalmente, se presenta una propuesta de plan de mantenimiento con ajuste de frecuencia, que en teoría incrementarían la disponibilidad de los equipos en un 1.6%.

En la tesis de Salazar, C. (2024) titulada “Plan de mantenimiento preventivo de la compresora Boge, que incida en la confiabilidad de la empresa Air Power Peru” el investigador busca incrementar la confiabilidad de la compresora Boge de la empresa Air Power Perú, mediante la implementación de un plan de mantenimiento preventivo.

Se inicia realizando el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) de los diversos sistemas del compresor, determinando la criticidad de los modos de falla. Para este compresor, los métodos de falla críticos e inadmisibles están relacionados con fallas en el sistema eléctrico, por ejemplo, bajo voltaje, corriente elevada, fallas en el disipador térmico o sobrecalentamiento.

Con la data recopilada se formula un plan de mantenimiento, el cual, al cambiar las frecuencias de inspección y una sustitución preventiva de componentes, incrementa la confiabilidad del compresor Boge en un 3% al reducir los tiempos de inactividad por mantenimiento no planificado.

1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio

Los compresores son equipos que se encuentran en constante operación para la producción de las industrias. Su requerimiento operacional elevado, así como las condiciones ambientales agresivas, generan múltiples problemas en su operación como la detención del equipo, problemas de carga, incrementos de temperatura (Vibrant, 2024) o fallas en los sistemas de lubricación, eléctrico y control (Sollant Group, 2021).

Los compresores, son equipos con piezas mecánicas susceptibles al desgaste. En los tornillos macho y hembra este desgaste puede ser ocasionado por una lubricación inadecuada, contaminación en el fluido, problemas de alineamiento o sobrecarga (Tecnología en Compresión de Occidente, 2024). Esto genera una pérdida de la eficiencia del compresor. En la Figura 1 se presenta los tornillos desgastados de un compresor, los cuales, para ser atendidos, requieren de un desmontaje mayor del equipo, incrementando los tiempos de reparación.

Figura 1:

Tornillos helicoidales con desgaste de un compresor

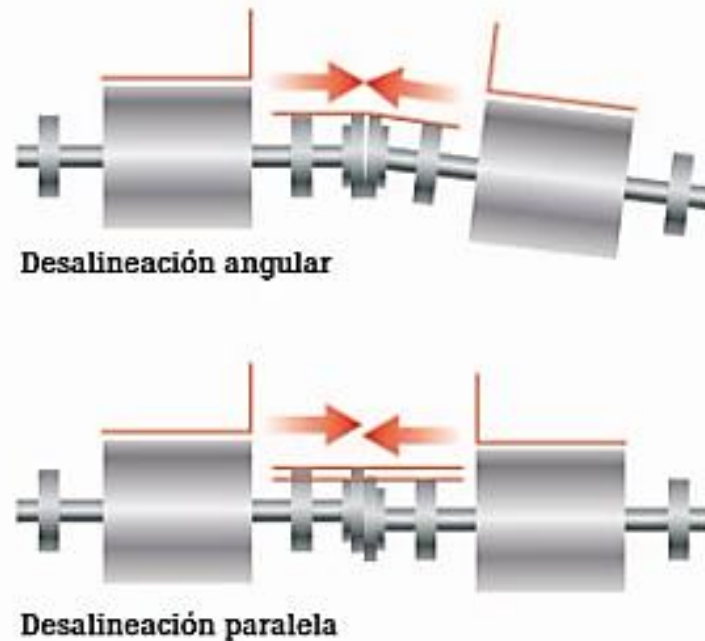


Nota: (Tecnología en Compresión de Occidente, 2024).

Al ser una máquina rotatoria genera vibración y el equipo se ve afectado negativamente cuando esta supera límites permisivos. El desbalance, desalineamiento en el eje, tornillos desajustados, problemas en los rodamientos o resonancia a velocidades críticas incrementan la vibración (Săvescu et al., 2023). El desalineamiento en el eje puede ser paralelo o angular, como se presenta en la Figura 2, e incluso con la instalación de acoplamientos flexibles, un eje desalineado transmitirá fuerzas cíclicas dañinas por el eje y dentro del motor (Fluke, n.d.). Detectar el origen del incremento de vibración es determinante para preservar el activo y se deben tomar las medidas correctivas correspondientes. Como ejemplo tenemos la investigación de Zhou, Y. (2012) donde la falta de acción frente a una vibración que excedió la amplitud límite del equipo terminó afectando al rotor del motor y detuvo la operación, concluyendo en una pérdida económica significativa.

Figura 2:

Tipos de desalineamiento entre dos ejes

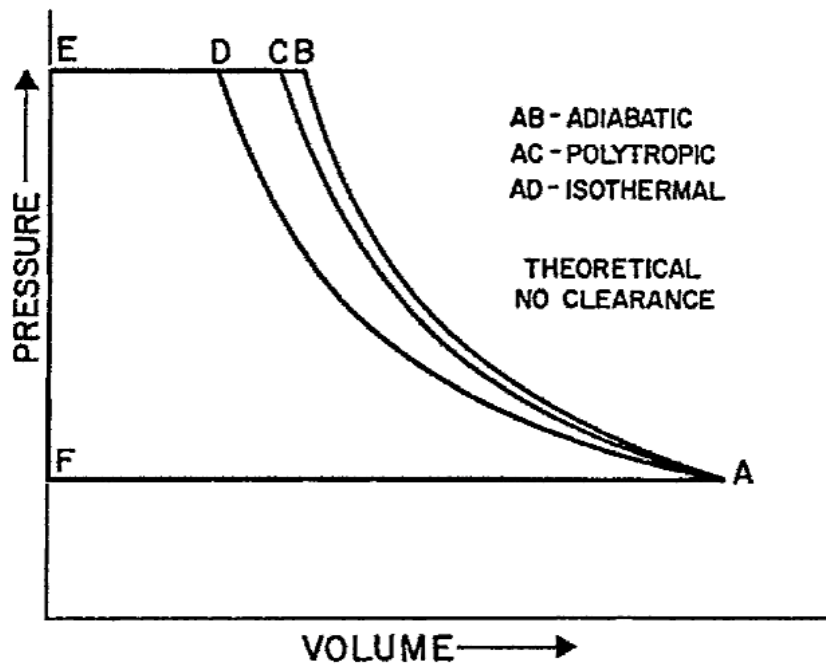


Nota: (Fluke, n.d.).

El calor es un efecto indeseable en el proceso de compresión, al menos en lo que respecta a los compresores y la transferencia de calor es la manera en que la naturaleza lleva los sistemas a la estabilidad (Pipalia et al., 2015). El problema de la temperatura en los compresores afecta la eficiencia del equipo. De acuerdo con las leyes de la termodinámica y los ciclos de compresión, la mayor eficiencia se obtiene cuando, durante el proceso de compresión, la temperatura se mantiene constante. En la Figura 3 se muestra el ciclo adiabático, politrópico e isotérmico, donde el menor trabajo para incremento de presión se da con el ciclo isotérmico, por lo que se busca acercarse a este ciclo teórico durante el funcionamiento.

Figura 3:

Tipos de ciclos de compresión



Nota: Bloch (2006a).

El incremento de temperatura entre las etapas de un compresor no solo reduce la eficiencia del proceso, sino que también desgasta componentes y reduce la vida útil del activo (Tecnología en Compresión de Occidente, 2024). Incluso, el uso de fluidos para refrigerar el compresor genera a su vez problemas que deben ser controlados. En el caso del agua, se debe minimizar las impurezas y sales que contiene, como indican Jurayev, R. et al (2023), mientras que el uso de aceites puede contaminar el aire. Fallas en los sistemas de refrigeración causan problemas en componentes mecánicos. Shahrivar (2005) en su investigación, encuentra que la fractura de un rotor de compresor con solo 603 horas de operación fue ocasionada por la expansión térmica de los componentes causada por un defecto en el sistema de enfriamiento.

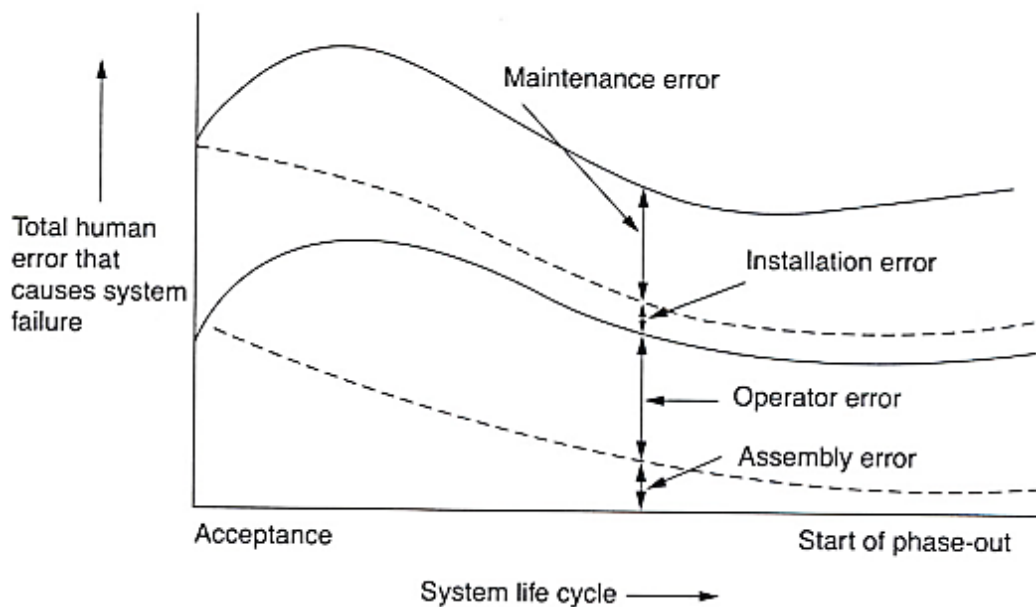
También debemos considerar a los ejecutores del mantenimiento, las personas, y como afectan en los resultados. Conocido como error humano en mantenimiento, es cualquier acción o inacción humana que exceda las tolerancias definidas por el sistema con el que interactúa el ser humano (Lorenzo, 1990) y se encuentra presente como una probabilidad en cada ejecución de mantenimiento, por lo que realizar una mayor cantidad

de intervenciones en un equipo no garantiza que fallará menos. La ocurrencia de errores humanos en la actividad de mantenimiento puede afectar el rendimiento y la seguridad del equipo de diversas maneras (Dhillon y Liu, 2006).

La ocurrencia de errores de mantenimiento, por error humano, incrementa con el envejecimiento del equipo debido al incremento en la frecuencia de intervenciones (Dhillon, 2002). En la Figura 4 se puede apreciar que al inicio de la operación los errores son ocasionados mayormente por errores en instalación o ensamblaje y con los años los errores en mantenimiento y operación incrementan en valor.

Figura 4:

Variaciones del error humano durante el ciclo de vida de un sistema



Nota: Dhillon (2002).

En el ámbito industrial peruano, se encuentra que no se brinda la importancia debida a los compresores y sistemas de aire comprimido. Se tienen casos de fallas catastróficas y reducción de disponibilidad del equipo (Salazar Crispín, 2024), empresas donde no se realiza el correcto dimensionado de los requerimientos de la planta, incurriendo en gastos excesivos (Procil Sánchez, 2020) y empresas que, por falta de conocimiento, manejan una política inadecuada, la cual conlleva a una baja disponibilidad (Alfaro Flores, 2019).

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema Principal

¿En qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM permitirá mejorar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025?

1.3.2 Problemas Específicos

¿En qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM permitirá mejorar el tiempo de operación de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025?

¿En qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM permitirá reducir el tiempo de reparación de fallas de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025?

1.4 Justificación e Importancia

El mundo globalizado en donde compiten las empresas actuales exige optimizar procesos, reducir las detenciones y generar un producto al menor precio. Por ello, se debe mantener la mayor disponibilidad de todos los equipos que intervienen en el proceso de producción incluyendo a los compresores, máquinas encargadas de suministrar aire comprimido.

La reducción de la disponibilidad debido a factores como el mantenimiento correctivo, exige la aplicación de una adecuada gestión de mantenimiento que tenga un balance entre el costo de implementación y los requerimientos de producción de la planta. La presente investigación versa sobre la propuesta de una gestión de mantenimiento, mostrando el procedimiento para la evaluación de los métodos de falla que generen un mayor impacto en la disponibilidad.

Como investigador, el procedimiento para el diseño de una gestión de mantenimiento presenta una secuencia de pasos que son una guía replicable en otros

equipos de la planta donde trabajo. Esto presenta un beneficio para el área de mantenimiento, ya que facilita la elaboración de planes de mantenimiento enfocados en incrementar la disponibilidad.

Para el diseño de la gestión de mantenimiento se evalúan los datos de fallas en cinco compresores tipo tornillo, instalados en una planta concentradora. Se tiene como base las recomendaciones del fabricante sobre el mantenimiento y la experiencia de personal especializado en el mantenimiento de compresores. Esta información se ingresa en una matriz y se asigna peso a cada tipo de falla, con lo cual se identifican los métodos con mayor impacto en la disponibilidad.

La investigación diseña una gestión de mantenimiento con planes para atender métodos de falla, la cual permite incrementar la disponibilidad de los compresores. Adicionalmente, se incluye el costo de implementar la gestión de mantenimiento.

Futuras investigaciones pueden tomar como base la gestión de mantenimiento presentada, implementarla en equipos y encontrar nuevos métodos de falla que impacten significativamente a la disponibilidad, ajustando el mantenimiento para abarcarlos. También se puede tomar los métodos de falla detectados y buscar la reducción de costo en la implementación o modificaciones de ingeniería a los compresores.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Proponer una gestión de mantenimiento basada en RCM para mejorar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025

1.5.2 Objetivo Específico

Analizar en qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM mejora el tiempo de operación de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025.

Analizar en qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM reduce el tiempo de reparación de fallas de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

Una gestión de mantenimiento basada en RCM permite incrementar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025

1.6.2 Hipótesis Específicas

Una gestión de mantenimiento basada en RCM mejora significativamente el tiempo de operación de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025.

Una gestión de mantenimiento basada en RCM reduce significativamente el tiempo de mantenimiento de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025.

1.7 Variables y Operacionalización de variables

1.7.1 Operacionalización de variables

En la tabla 1 se presentan las variables independientes y dependientes y el desglose de estas para la validación de la hipótesis.

Tabla 1:

Matriz de operacionalización de variables

Título: Propuesta de Gestión de mantenimiento basada en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para mejorar la Disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo, de una Planta Concentradora Minera en Tacna – Perú, en 2024							
1.00	VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALAS DE MEDICIÓN	UNIDAD DE MEDICION
1.10	INDEPENDIENTE (X):						
1.11	Gestión de mantenimiento basada en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (cualitativo)	Conjunto de actividades necesarias para mantener los activos físicos en la condición operativa deseada, seleccionadas utilizando las 7 preguntas del RCM	Actividades de mantenimiento con frecuencia y materiales definidos para asegurar la operatividad de los equipos.	Frecuencia de mantenimiento (cuantitativo)	Frecuencia	Intervalo	Horas.
				Costo (cuantitativo)	Costo de los materiales	Razón	Dólares
1.20	DEPENDIENTE (Y):						
1.21	Disponibilidad (cuantitativo)	Es la proporción de tiempo durante la cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado	La relación entre tiempo de operación y el tiempo de operación y el tiempo de reparación de falla	Tiempo de operación (cuantitativo)	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Intervalo	Horas
				Tiempo de reparación de falla (cuantitativo)	Tiempo medio de reparación (MTTR)	Intervalo	Horas

Nota. Elaboración propia.

1.8 Metodología de la Investigación

1.8.1 Unidades de Análisis

La presente investigación tendrá como unidad de análisis 5 compresores modelo ZT250 de la marca Atlas Copco, ubicados en una planta concentradora a 3000 m.s.n.m. Yacimiento minero ubicado en el departamento de Tacna, Perú.

Altura: entre los 2800 y 3200 m.s.n.m.

Clima: seco con escasas lluvias

Temperatura: oscila entre los -4°C y + 20°C

Humedad relativa: 41.12%

1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación

La presente investigación adopta un enfoque aplicado, ya que empleará el mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) con el fin de incrementar la disponibilidad de compresores.

Se emplearán herramientas de la metodología RCM para identificar los componentes críticos de los sistemas y su impacto, con el objetivo de detectar y predecir fallas. Además, se incorporarán conceptos de confiabilidad y gestión de mantenimiento.

Con la información recopilada, se modificará la gestión de mantenimiento actual, con el propósito de reducir la tasa de fallas e incrementar la disponibilidad de diseño. Este proceso implica el cambio de las rutinas de inspección, catalogación de materiales, el stock de almacén y la frecuencia de mantenimiento.

El alcance de la investigación es correlacional, ya que busca determinar el impacto de una gestión de mantenimiento, basada en RCM, en la disponibilidad de los compresores.

Se medirán los valores de tiempo medio entre fallas, tiempo de reparación y disponibilidad de los compresores previa y posteriormente a la aplicación de la nueva gestión de mantenimiento.

1.8.3 *Diseño de la Investigación*

El diseño de la investigación es no experimental debido a que se tomarán datos en una misma población sin manipulación ni control de las variables por parte del investigador. Los datos serán tomados en un momento único, con el objetivo de establecer relaciones o impacto entre las variables.

1.8.4 *Fuentes de Información*

Como fuente de información se tienen los planes de mantenimiento preventivo de compresores ZT250, el histórico de fallas de los últimos 3 años de los compresores.

Adicionalmente se toma como referencia el conocimiento de personal técnico y supervisores.

1.8.5 *Población y Muestra*

La población son compresores de doble tornillo rotativo utilizados en minería.

La muestra son cinco compresores modelo ZT250 de la marca Atlas Copco.

1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se recopila información de los equipos en el Anexo 2, el cual consiste en la ficha técnica de los compresores ZT250.

En el Anexo 3 se recopilan los eventos de detención del equipo por mantenimiento correctivo, incluyendo la duración de la detención, el sistema y componente afectado. Los datos para el llenado se toman del registro del módulo de control instalado en los compresores.

1.8.7 Análisis y Procesamiento de Datos

Primero se desglosan los sistemas y componentes mantenibles, a los cuales se realizará el análisis de modos y efectos de falla, AMEF, en una tabla. Con ayuda del histórico de fallas, se determinan los sistemas con mayor incidencia en la disponibilidad y a dichos sistemas se realiza el análisis de criticidad de fallas.

Se clasifican las fallas y dependiendo de sus características se determina la estrategia de mantenimiento conveniente para su eliminación o reducción.

Posterior a ello, se realiza la determinación de materiales necesarios para la ejecución de la nueva gestión de mantenimiento y se define la estrategia respecto al abastecimiento de los repuestos.

Finalmente se determina la disponibilidad teórica que alcanzarían los compresores, posterior a la aplicación de la gestión de mantenimiento diseñada.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Bases Teóricas

2.1.1 *Gestión de mantenimiento*

Pintelon y Parodi-Herz (2008) en su artículo titulado "Maintenance: An Evolutionary Perspective" definen como mantenimiento al conjunto de actividades necesarias para mantener los activos físicos en la condición operativa deseada o para restaurarlos a esta condición.

Desde su creación, el mantenimiento ha evolucionado para atender los requerimientos de las industrias. Inicialmente consistía en reparaciones y reemplazo de componentes, sin embargo, la competitividad entre las empresas requería que las industrias no se detengan, ya no era rentable operar el equipo hasta el fallo.

En respuesta a dicha necesidad, se implementan estrategias de mantenimiento para evitar las fallas catastróficas mediante el cambio de componentes de acuerdo con un cronograma. En años posteriores se requiere reducir los tiempos de mantenimiento, para lo cual se desarrollan estrategias que permiten predecir el fallo de componentes y evitar caer en un mantenimiento excesivo.

En la actualidad, el mantenimiento se estudia en conjunto con la optimización del ciclo de vida del activo, maximizando la disponibilidad y confiabilidad, a la vez que se reducen los costos de mantenimiento.

2.1.2 *Tipos de mantenimiento*

Existen múltiples denominaciones a los tipos de mantenimiento, los cuales pueden ser clasificados en dos tipos de actividades, por mantenimiento correctivo y por mantenimiento de precaución, donde englobaremos el mantenimiento preventivo, predictivo, proactivo.

Determinar a qué tipo de mantenimiento corresponde una actividad es complicado y depende del contexto en el que se realiza. A continuación, presentamos características de cada uno de los tipos de mantenimiento.

2.1.2.1 Mantenimiento correctivo.

Se realiza posterior a una falla en el equipo o pérdida de función importante para la producción. Es de naturaleza reactiva y son usualmente causados por fallas difíciles de predecir. Tenemos como ejemplo el cambio de una luminaria.

2.1.2.2 Mantenimiento de precaución.

Buscan reducir la probabilidad de falla de los componentes, anticipándose o evitándolas. Tenemos entre ellas, el mantenimiento preventivo, que sigue rutinas específicas de cambio de componentes o actividades de mantenimiento con un cronograma para evitar fallas. Por otro lado, tenemos el mantenimiento predictivo, el cual emplea instrumentos para predecir la ocurrencia de fallas. Requiere de una evaluación para identificar los parámetros que indiquen problemas principales en el equipo. El mantenimiento de precaución también engloba actividades como la lubricación, la inspección y registro de datos, que se realizan durante el funcionamiento de los equipos y usualmente son realizadas por el operador, como en el Total Productive Maintenance (TPM) o brigadas de mantenimiento de primera línea.

2.1.3 Modelos de mantenimiento

García S. (2003) en su libro "Organización y gestión integral de mantenimiento: Manual práctico para la implantación de sistemas de gestión avanzados de mantenimiento industrial" nos presenta la necesidad de analizar el equipo y definir los modelos de mantenimiento que se van a ejecutar en sus componentes o sistemas. Para ello se tienen distintos modelos de mantenimiento, los cuales comprenden una combinación de los tipos de mantenimiento.

Se recomienda que toda gestión de mantenimiento involucre inspección visual y lubricación periódica de los equipos, debido a la importancia de estas actividades y su bajo costo. Una vez definida una frecuencia de intervención, dependiendo de las características operacionales, se puede escoger uno de los siguientes modelos.

2.1.3.1 Modelo correctivo.

Adicional a la lubricación e inspección visual, solo realiza reparaciones de averías. Usualmente aplicado a equipos con baja criticidad, donde no es rentable destinar más recursos de mantenimiento.

2.1.3.1.1 Modelo condicional.

Al igual que en el modelo anterior, se opera al equipo hasta que se requiera reparar averías; con la salvedad de que se realizan pruebas o ensayos para detectar posibles anomalías. Es utilizado en equipos con poco uso o con baja probabilidad de falla.

2.1.3.1.2 Modelo sistemático.

Al modelo anterior, se le adicionan tareas preventivas y predictivas. Se realiza el reemplazo de componentes de acuerdo con un cronograma y se aplican métodos de predicción de falla. El resultado de los ensayos es evaluado y se definen actividades de mantenimiento de mayor envergadura de ser necesarios. En este modelo se presenta una planificación a largo plazo.

2.1.3.1.3 Modelo de alta disponibilidad.

Aplicado cuando se requiere una disponibilidad elevada, por encima del 90%. Se realiza en equipos que no pueden detenerse debido a su importancia en la operación. Estos equipos presentan intervalos extensos entre los mantenimientos; teniendo, por ejemplo, equipos de mantenimiento anual.

Es por este motivo que se requiere una exhaustiva medición de parámetros para definir las fechas de intervención y su duración. Comprende el reemplazo de componentes de desgaste a fin de que el equipo recupere sus características de confiabilidad y mantenibilidad de fabricación e incremente su disponibilidad

En caso de averías, se busca extender la vida del equipo hasta el siguiente mantenimiento programado y no necesariamente la reparación total.

2.1.4 Variables del mantenimiento

Torres, L. (2005) en su libro titulado "Mantenimiento su implementación y gestión" define características confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, las cuales son

intrínsecas de los equipos y sirven para evaluar y controlar el mantenimiento. El objetivo del mantenimiento es devolver y mantener los equipos a sus parámetros de fabricación.

Presentaremos indicadores importantes para el mantenimiento, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR).

2.1.4.1 Disponibilidad.

Según Torres, L. (2005) “Es la proporción de tiempo durante la cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado” (p. 20).

Se calcula mediante la Ecuación 1; la disponibilidad $D(t)$ es la fracción entre el tiempo de operación TO menos la sumatoria de los tiempos de paro TA y el tiempo de operación TO . Los tiempos de paro comprenden el tiempo de detención y el tiempo de reparación del equipo.

$$D(t) = \frac{TO - \sum TA}{TO} \quad (1)$$

En función de los indicadores, que serán explicados más adelante, se calcula la disponibilidad de acuerdo con la Ecuación 2.

$$D(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2)$$

2.1.4.2 Mantenibilidad.

Según Torres, L. (2005) “Es la probabilidad de que una máquina, equipo o un sistema pueda ser reparado a una condición especificada en un periodo de tiempo dado, en tanto su mantenimiento sea realizado de acuerdo con ciertas metodologías y recursos determinados con anterioridad” (p. 20).

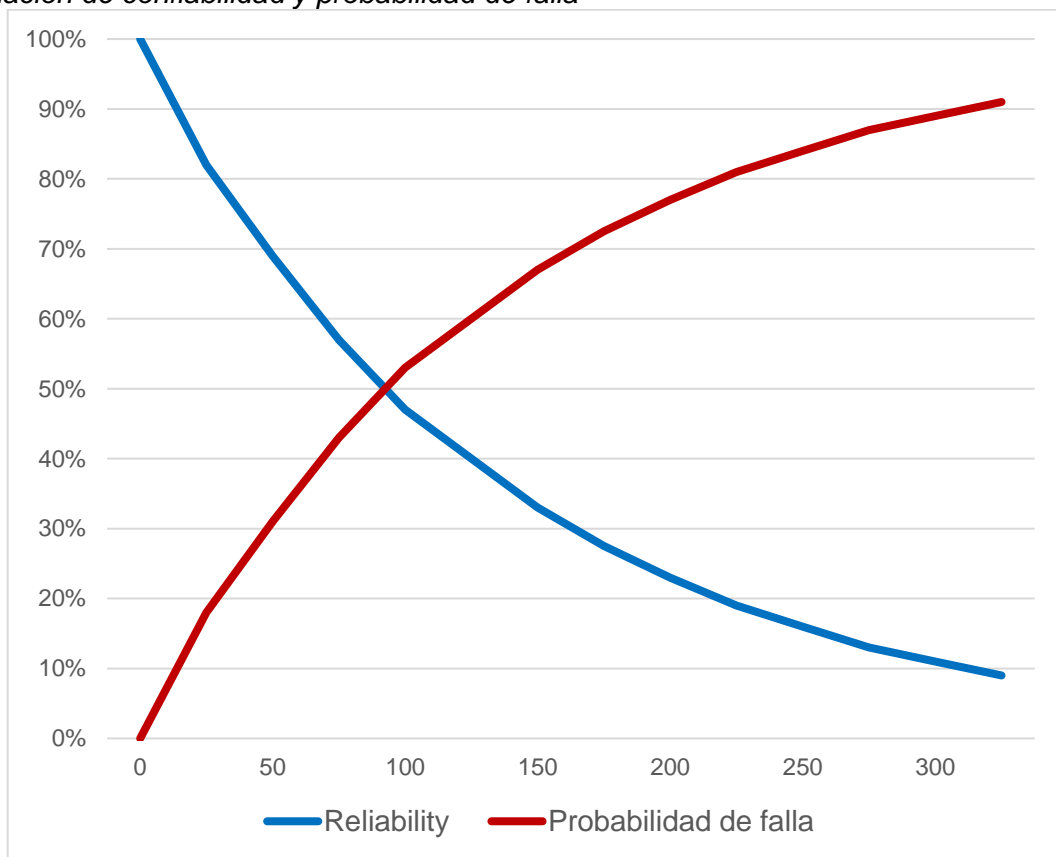
Es una característica del equipo o sistema y depende del diseño, esto quiere decir que la mantenibilidad es un parámetro que se define en la fabricación e implementación del equipo.

2.1.4.3 Confiabilidad.

En la presentación de Murillo, W. (2021) titulada “Análisis de Confiabilidad de Equipos Reliability Analysis – RAM” se define la confiabilidad es la probabilidad de que un equipo o sistema desempeñe la función requerida en un periodo de tiempo, en condiciones normales y estables de operación. Como se aprecia en la Figura 5 la confiabilidad $R(t)$, por la palabra en inglés reliability, se reduce con el tiempo y está determinada con la Ecuación 3, donde λ es tasa de falla. La probabilidad de falla $F(t)$ es el complemento de la confiabilidad, expresado en la Ecuación 4.

Figura 5:

Variación de confiabilidad y probabilidad de falla



Nota: Murillo (2021).

$$R(t) = e^{(-\lambda t)} \quad (3)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (4)$$

2.1.4.4 Tiempo medio entre fallas (MTBF).

En inglés Mean Time Between Failure, es el intervalo de tiempo promedio entre la ocurrencia de fallas y se calcula con la Ecuación 5.

$$MTBF = \frac{\sum \text{tiempo entre fallas}}{\text{Número de fallas}} \quad (5)$$

La inversa del MTBF se denomina tasa de fallas y se calcula con la Ecuación 6.

$$\text{Tasa de fallas} = \lambda = 1/MTBF \quad (6)$$

Habiendo definido λ en función del MTBF, podemos actualizar la ecuación de la confiabilidad como se expresa en la Ecuación 7.

$$R(t) = e^{(-t/MTBF)} \quad (7)$$

2.1.4.5 Tiempo medio para reparar (MTTR).

Denominado por las siglas en inglés Mean Time to Repair, es el tiempo promedio para reparar un equipo y se calcula con la Ecuación 8. Al igual que con el MTBF, la inversa del MTTR se conoce como la tasa de reparación y se calcula con la Ecuación 9.

$$MTTR = \frac{\sum \text{tiempo de reparación}}{\text{número de reparaciones}} \quad (8)$$

$$\text{Tasa de reparación} = \mu = 1/MTTR \quad (9)$$

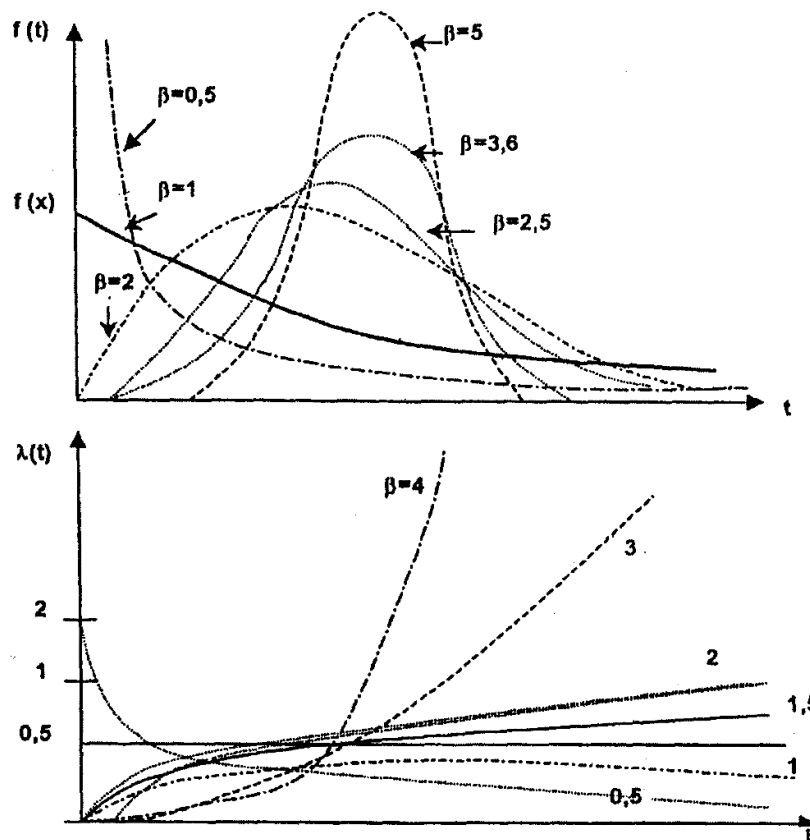
2.1.5 Distribución Weibull en fiabilidad

En el libro de Torres, L. (2005) titulado “Mantenimiento Su implementación y gestión” nos presentan la distribución Weibull, la cual permite estimar la distribución que caracteriza a un conjunto de componentes. Tiene como ventaja los tres parámetros que

permiten ajustar la curva, permite cubrir los periodos de madurez del componente, desde la juventud hasta el envejecimiento. En la Figura 6 podemos ver el efecto de la variación de uno de sus parámetros, β , cuando $\eta = 2$ y $\gamma = 0$, mostrando la flexibilidad de la distribución Weibull.

Figura 6:

Variación en las curvas de densidad de probabilidad y tasa de fallas debido al parámetro β



Nota: Torres (2005).

Requiere de un histórico de fallas, donde denominamos TBF al intervalo entre dos fallas de averías. Con este valor, se puede estimar la función de repartición $F(t)$. Mediante el uso de tablas se puede evaluar el MTBF y conocer el parámetro

La densidad de probabilidad $f(t)$ se representa con la Ecuación 10.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta}} \text{ siendo } t \geq \gamma \quad (10)$$

β : se llama parámetro de forma $\beta > 0$

η : se llama parámetro de escala $\eta > 0$

γ : se llama parámetro de posición $-\infty < \gamma < +\infty$

La función de repartición $F(t)$ queda representada como en la Ecuación 11, mientras que la confiabilidad $R(t)$ se encuentra definida por la Ecuación 12.

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \quad (11)$$

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \quad (12)$$

La tasa instantánea de fallo $\lambda(t)$ se calcula de acuerdo con la Ecuación 13 donde los parámetros de forma y escala son mayores a cero y el tiempo t es mayor o igual al parámetro de posición.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} \quad (13)$$

Dependiendo del valor obtenido de β se determina la etapa de vida del componente. Si es menor a 1 se encuentra en juventud, si es igual a uno se encuentra en independencia del proceso y si es mayor a uno está en fase de obsolescencia. Adicionalmente si β es igual a 3.5 la distribución es normal.

Es de interés determinar el tipo de vida esperado o tiempo de vida nominal de los componentes, lo cual se conoce como L_{10} unidad de tiempo donde la confiabilidad es de 0.90. En la Ecuación 14 vemos L_{10} , se encuentra reemplazando en la ecuación de la confiabilidad $R(t)$ por 0.90.

$$L_{10} = \gamma + \eta \cdot \ln(0.105)^{1/\beta} \quad (14)$$

En la práctica, para determinar los parámetros se inicia recopilando información del histórico de fallas, encontrando los TBF y ordenándolos de forma creciente. Cuando los datos son menores a 20, la in fiabilidad $F(t)$ se calcula con la Ecuación 15.

$$F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (15)$$

Se tabula los valores de $F(i)$ calculados y con apoyo de una carta de Weibull se calcula el valor de los parámetros.

2.1.6 Análisis de modos de falla

En el libro de PCManagement (2001) titulado “Manual del ingeniero de mantenimiento” muestra la clasificación de las fallas de acuerdo con su impacto en fallas catastróficas como la ruptura de componentes mecánicos o cortocircuito de componentes eléctricos y fallas por cambios de parámetros.

De acuerdo con la tasa de fallas, la vida de un equipo se puede dividir en tres etapas, temprana, madura y ancianidad. Inicialmente decreciente, luego constante y finalmente creciente.

2.1.6.1 Fallas primarias.

Resultado de una deficiencia de un componente expuesto a condiciones de operación dentro de su rango de diseño.

2.1.6.2 Fallas secundarias.

Se presentan cuando las condiciones de operación son diferentes a las de diseño, pudiendo ser evitadas si los parámetros se controlan, por ejemplo, velocidad, temperatura, vibración, corriente, etc. Pueden ser clasificadas en

Fallas con causa común: cuando un evento afecta múltiples componentes generando su falla, pueden ser naturales como terremotos o por defecto de otros componentes como fallas en equipos de aire acondicionado.

Fallas propagadas; cuando la falla de un componente genera la falla únicamente de un segundo componente.

Fallas por error humano: generadas durante el diseño, instalación, operación, mantenimiento e inspección de los equipos.

2.1.7 Método de asignación de criticidad de fallas

En el artículo de Gasca, M. et al. (2017) “Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial” los investigadores presentan un método para realizar el cálculo del índice de criticidad de las fallas, relacionando la frecuencia de fallas (FF) con su consecuencia (CF), de acuerdo con lo expresado en la Ecuación 16, donde CF es la sumatoria de los valores indicados en las Tablas 2, 3, 4, 5 y 6.

$$IC = FF \times CF = FF \times (IP + SS + CR + TR + TO) \quad (16)$$

El valor asignado a cada variable depende de un consenso entre especialista y varía dependiendo del componente a evaluar.

Tabla 2:

Asignación de valor de FF

Frecuencia de fallas (FF)	Valor
Menor a 1 por año	1
Entre 2 y 12 por año	2
Entre 13 y 52 por año	3
Más de 52 por año	4

Nota. Datos obtenidos de Gasca et al. (2017).

Tabla 3:

Asignación de valor de IP

Impacto en la producción (IP)	Valor
Menor al 25%	1
25% de impacto	2
50% de impacto	3
75% de impacto	4

Nota. Datos obtenidos de Gasca et al. (2017).

Tabla 4:*Asignación de valor de SS*

Seguridad y salud (SS)	Valor
No hay algún riesgo de lesión	1
Lesiones leves (son asistidas dentro de la fábrica, no hay incapacidad)	2
Lesiones significativas (incapacidad entre 1 y 30 días)	3
Lesiones de incapacidad parcial o permanente (mayor de 30 días)	4

Nota. Datos obtenidos de Gasca et al. (2017).

Tabla 5:*Asignación de valor de CR*

Costos de reparación (CR)	Valor
Menos de 1.000 dólares	1
Entre 1.000 y 5.000 dólares	2
Entre 5.001 y 10.000 dólares	3
Más de 10.000 dólares	4

Nota. Datos obtenidos de Gasca et al. (2017).

Tabla 6:*Asignación de valor de TR*

Tiempo de reparación (TR)	Valor
Opcionalmente	1
Un turno de trabajo	2
Dos turnos de trabajo	3
Totalmente	4

Nota. Datos obtenidos de Gasca et al. (2017).

2.1.8 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

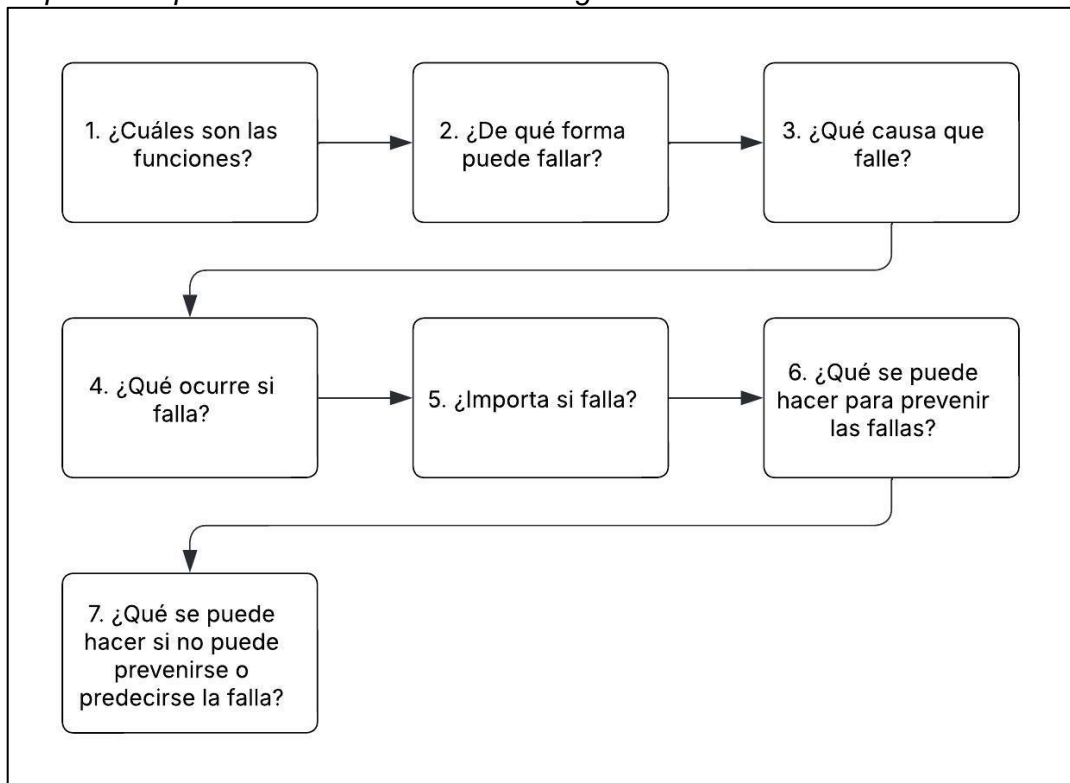
En el artículo de Moubray, J. (2021) titulado “Mantenimiento centrado en la confiabilidad” nos presentan la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, el cual es un método que lista pasos para determinar los requerimientos del mantenimiento de los elementos físicos en su contexto operacional, de forma que los equipos continúen desempeñando las funciones deseadas.

Es necesario enfatizar que el RCM es en esencia mantenimiento y como tal solo puede asegurar que los equipos consigan su confiabilidad inherente, es decir que la confiabilidad es un parámetro de diseño y con mantenimiento no puede ser incrementada, solo devuelta.

Desde su creación, se han creado variantes del RCM, adaptándolo a las necesidades de las empresas. Sin embargo, la norma SAE JA1011 Fundamentos del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) indica que existen siete preguntas que deben ser respondidas en un proceso para que este pueda considerarse RCM, los cuales están representados de forma secuencial en la Figura 7.

Figura 7:

Pasos para la implementación de una metodología RCM



Nota. Elaboración propia

2.1.8.1 ¿Cuáles son las funciones?

Se define el funcionamiento deseado del equipo dentro de la operación, poniendo énfasis en la cuantificación de los estándares.

2.1.8.2 ¿De qué forma puede fallar?

Se analizan y describen las fallas funcionales del equipo.

2.1.8.3 ¿Qué causa que falle?

Se identifican los modos de falla con mayor probabilidad e impacto. Es importante identificar la causa raíz.

2.1.8.4 ¿Qué sucede cuando falla?

Se registran los efectos de las fallas en caso de ocurrencia.

2.1.8.5 ¿Qué ocurre si falla?

Posterior a la respuesta y registro de las primeras cuatro preguntas, se procede a clasificar las fallas de acuerdo con su importancia. Se clasifican en consecuencias de las fallas no evidentes, en la seguridad y medio ambiente, operacionales y no operacionales.

Este paso sirve de base para definir el comportamiento que ejecutaremos frente a cada una de ellas.

2.1.8.6 ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?

Para el incremento de disponibilidad, únicamente el mantenimiento preventivo a intervalos fijos no es necesariamente el óptimo, se debe realizar tareas que permitan reducir las consecuencias de las fallas o evitarlas. El RCM define tipos de tareas preventivas:

Tareas a condición: técnicas que permiten detectar fallas potenciales antes de que se conviertan en fallas funcionales, llamadas a condición por que el equipo continúa en operación mientras se satisfaga los estándares de funcionamiento. Hace uso de inspecciones e instrumentación.

Tareas de reacondicionamiento cíclico y de sustitución: cuando se realizan inspecciones o cambios a frecuencias determinadas. Utilizado cuando no se puede predecir la falla o el tiempo entre su detección y ocurrencia es corto.

2.1.8.7 ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?

El RCM combina la evaluación de la consecuencia con la selección de la tarea. Si no se encuentra una actividad de mantenimiento que reduzca la falla comparativamente al esfuerzo de su ejecución, el RCM recomienda “a falta de” el rediseño de los componentes donde se presenta la falla.

El RCM busca optimizar las tareas de mantenimiento, ejecutándolas solamente cuando sean necesarias, ya que muchas actividades de mantenimiento no consiguen resultados significativos.

2.1.9 Compresores

En el e-book de Atlas Copco Perú (n.d.) titulado “Guía completa sobre compresores de aire” nos presentan las características de los compresores, su funcionamiento e importancia.

En las industrias se utiliza aire comprimido principalmente como energía para almacenar y transmitir, como en el uso de herramientas neumáticas, llamado aire energético y aire activo, cuando entra en contacto directo con el producto. Para aprovechar la energía del aire, es necesario de equipos especiales, capaces de incrementar la presión. Estos equipos son los compresores, los cuales transforman energía eléctrica en energía mecánica, la cual al reducir el espacio en el que el aire se encuentra, incrementan su presión.

Los compresores se clasifican de acuerdo con su método para comprimir el aire. Compresores de desplazamiento positivo, los cuales encierran un volumen de gas y mediante la reducción del volumen encapsulado, incrementan la presión. Los compresores dinámicos, en cambio, aspiran aire en un rodete de compresión que gira a altas velocidades, posterior a ello, se descarga a través de un difusor, donde la energía cinética se transforma en presión estática.

2.1.9.1 Compresores de pistón.

Son compresores sencillos, en donde un pistón comprime el aire dentro de un cilindro. Económicos y útiles cuando la demanda es baja, debido a que el uso prolongado eleva la temperatura y desgasta los múltiples componentes. En la Figura 8 se muestra un compresor de pistón de la marca Atlas Copco.

Figura 8:

Compresor de pistón Atlas Copco



Nota: Atlas Copco Perú (n.d.).

2.1.9.2 Compresores de tornillo rotativo.

La compresión se realiza entre dos tornillos, llamados rotores macho y hembra. Son accionados por el rotor macho (si es inyectado por aceite) o por un engranaje de sincronismo (cuando están exentos de aceite). El aire es absorbido y desplazado a través de un espacio que reduce su volumen.

Presentan un costo inicial elevado, pero son más eficientes, requieren menos mantenimiento y tienen mayor disponibilidad que los compresores de pistón. En la Figura 9 se muestran los tornillos de un compresor.

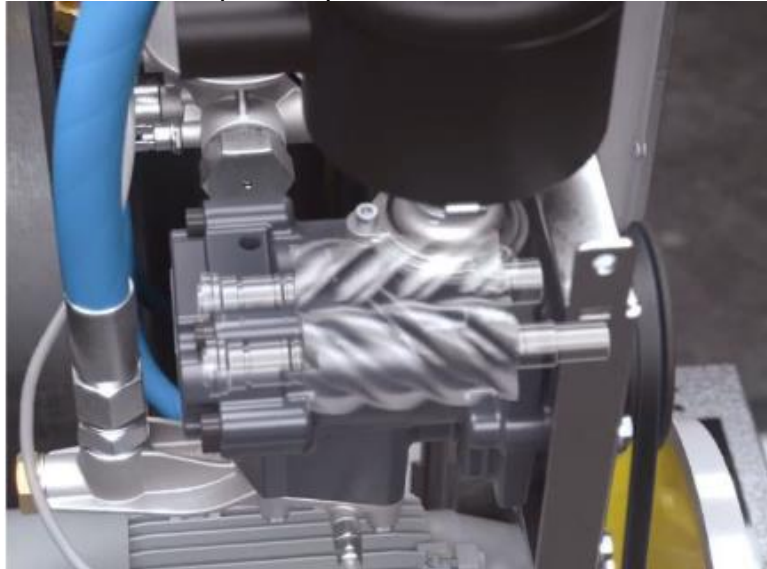
2.1.9.3 Compresores Scroll.

Compresores de desplazamiento positivo. La compresión se genera en una cámara donde están instalados una espiral fija y una espiral móvil accionada por un motor. Al girar, aire ingresa y queda atrapado entre las espirales. A medida que va girando, el espacio se reduce hasta que llega al centro, donde a través de una válvula antirretorno es expulsado. En la Figura 10 se aprecia la espiral fija (de color gris), la espiral móvil (de color azul) y el

aire capturado entre ellas. En el centro se encuentra la vía por donde será expulsado el aire comprimido.

Figura 9:

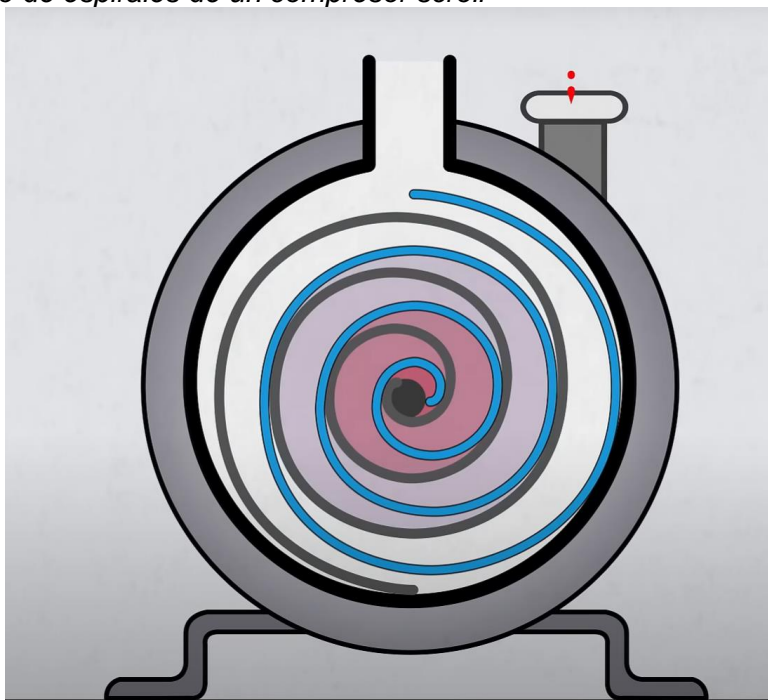
Tornillos helicoidales de un compresor tipo tornillo



Nota: Atlas Copco Perú (n.d.).

Figura 10:

Funcionamiento de espirales de un compresor scroll



Nota: Atlas Copco Perú (n.d.).

2.1.9.4 Compresores de diafragma.

Cuentan con diafragma de accionamiento mecánico, utilizados para bajo flujo y presión, o de accionamiento hidráulico, utilizados para aplicaciones de alta presión.

2.1.9.5 Compresores de uña.

Similares a los compresores de tornillo, cuentan con dos rotores en forma de uña, sincronizados que al girar entre si extraen y comprimen el aire. Proporcionan aire con alta pureza, por ello son los compresores escogidos para industrias de rubro alimentario, sanitario, farmacéutico o electrónica. En la Figura 11 se presentan los rotores de un compresor de uña.

Figura 11:

Elemento compresor de un compresor de uña



Nota: Atlas Copco Perú (n.d.).

2.1.9.6 Compresores de paletas.

Constan de un rotor con paletas radiales y móviles en forma de hoja, montado excéntricamente en la carcasa. La compresión se genera cuando las paletas se presionan contra las paredes del estator (debido al giro del rotor). Son utilizados en sectores agrícolas y energética.

2.1.9.7 Compresores centrífugos.

Es un compresor dinámico, caracterizado por la descarga radial del flujo. El aire es aspirado en un rodete con hojas radiales. Al girar el rodete, el aire es expulsado hacia el

perímetro del rodete, incrementando su presión y su velocidad. Antes de que el aire sea conducido a la siguiente etapa, pasa a través de un difusor y una voluta, donde la energía cinética se convierte en presión. En la Figura 12 se presenta el rodete de un compresor centrífugo. Se caracterizan por alcanzar velocidades entre las 15000 y 100000 revoluciones por minuto (rpm).

Figura 12:

Rodete de compresor centrífugo



Nota: Atlas Copco Perú (n.d.).

2.1.10 Leyes de termodinámica y ecuaciones

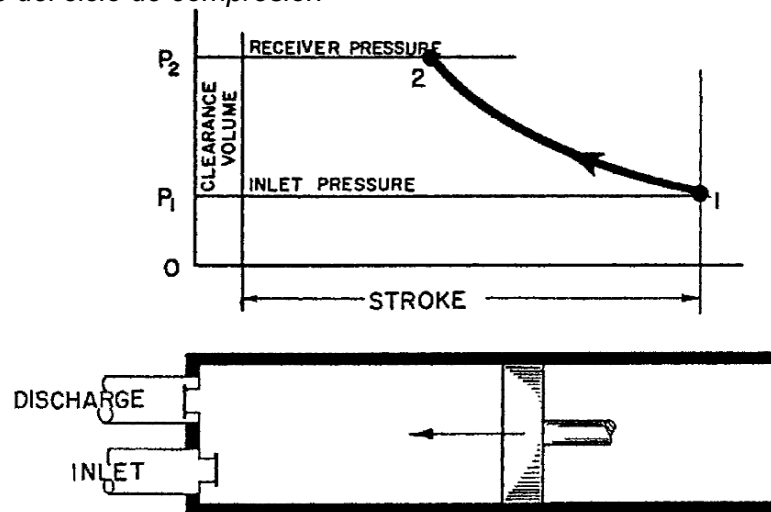
En el libro de Bloch, H. (2006a) titulado “A practical guide to compressor technology” se describe el proceso termodinámico de un compresor. Iniciamos tomando un elemento compresor, como lo es un pistón y graficamos en el diagrama P-V (presión versus volumen) el comportamiento del gas durante el funcionamiento del pistón. El pistón cuenta con 2 válvulas, una de ingreso y una de salida, las cuales se abren a presiones definidas.

En la Figura 13 el pistón se mueve hacia la izquierda, reduciendo el volumen del gas, incrementando de esta forma la presión, hasta llegar a la presión en que la válvula de

descarga se apertura. En la imagen Figura 14 el pistón continúa con su desplazamiento hacia la izquierda y al estar abierta la válvula de descarga, se reduce el volumen manteniendo la presión. En la imagen Figura 15 se cierra la válvula de descarga y el pistón inicia su desplazamiento hacia la derecha, incrementando el volumen, reduciendo la presión. Finalmente, se apertura la válvula de ingreso y el pistón continúa su desplazamiento hacia la derecha, incrementando el volumen y manteniendo la presión.

Figura 13:

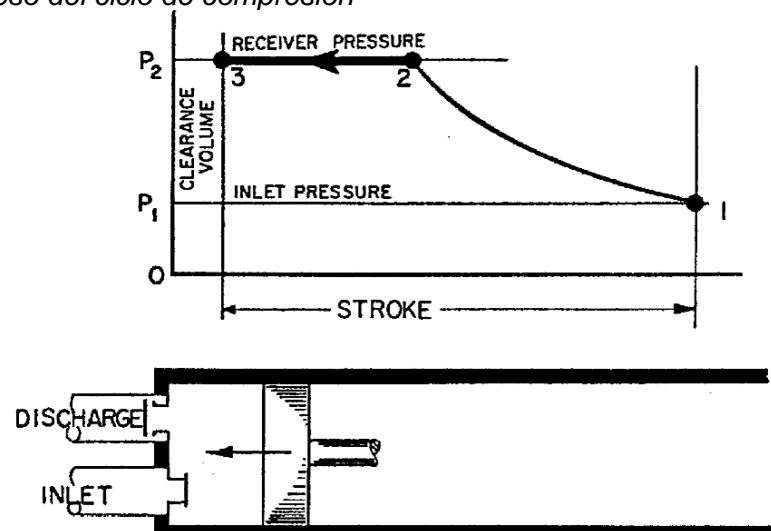
Primer proceso del ciclo de compresión



Nota: Bloch (2006a).

Figura 14:

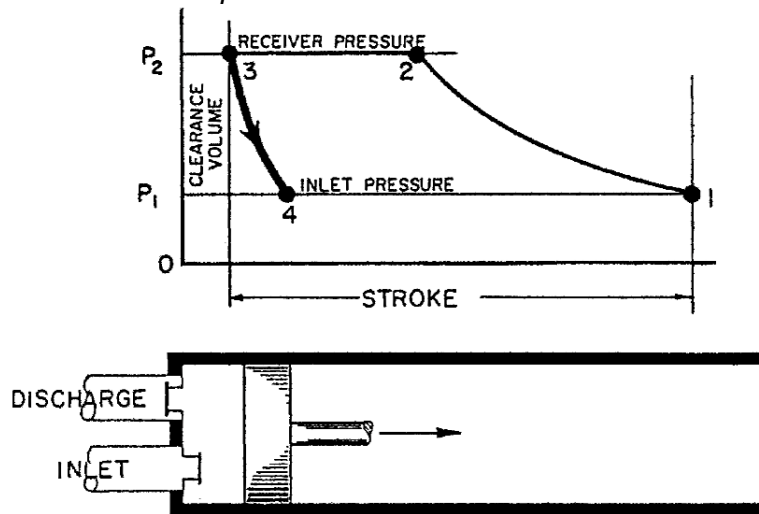
Segundo proceso del ciclo de compresión



Nota: Bloch (2006a).

Figura 15:

Tercer proceso del ciclo de compresión

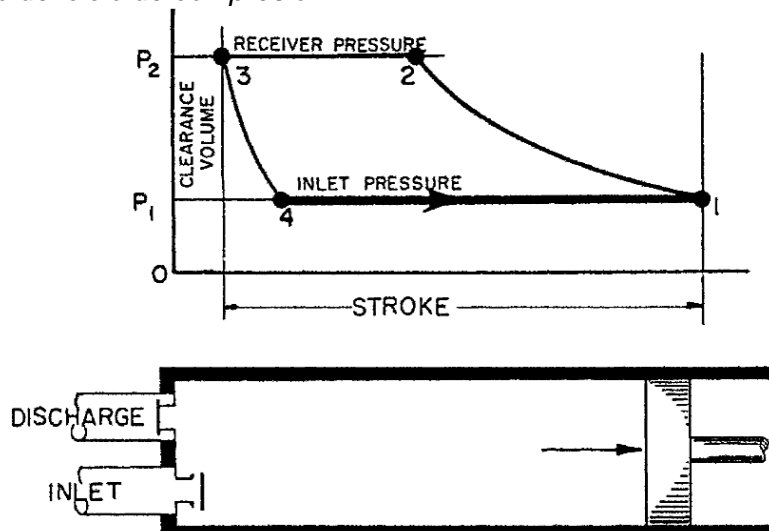


Nota: Bloch (2006a).

En la imagen Figura 16 se tiene graficado en el diagrama P-V las líneas que corresponden al comportamiento de un compresor. Donde la presión de ingreso es la presión ambiental o de otro proceso de compresión, como cuando se tienen múltiples etapas.

Figura 16:

Cuarto proceso del ciclo de compresión



Nota: Bloch (2006a).

Existen restricciones en la presión de salida si se desean incrementos elevados y una sola etapa de compresión. Para comprender mejor se requiere explicar las leyes de la termodinámica y algunas ecuaciones.

2.1.10.1 Primera ley de la termodinámica.

Nos dice que la energía no puede ser creada ni destruida durante un proceso, como lo es la compresión de un gas, sino que la energía se convierte de uno a otro tipo.

2.1.10.2 Segunda ley de la termodinámica.

Indica que el calor no puede pasar de un cuerpo de menor temperatura a uno de mayor temperatura a menos que existan fuerzas externas. Esto quiere decir que existe una irreversibilidad en los procesos o que la entropía (energía no utilizable) siempre incrementa. Sin embargo, existen procesos teóricos donde se mantiene constante como en el proceso adiabático.

2.1.10.3 Leyes para gases perfectos.

En gases ideales se cumplen las siguientes leyes que, si bien son teóricas, sirven de base para los cálculos reales, en los cuales se añaden factores para su corrección.

Ley de Boyle: A temperatura constante, el volumen (V) de un gas es inversamente proporcional a la presión (p), como se presenta en la Ecuación 17. Esta es la ley que siguen las curvas isotérmicas.

$$p_2V_2 = p_1V_1 = \text{constante} \quad (17)$$

Ley de Charles: A presión constante, el volumen (V) de un gas es directamente proporcional a la temperatura (T) como se presenta en la Ecuación 18.

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1} = \text{constante} \quad (18)$$

Ley de Amonton: A volumen constante, la presión (p) de un gas es directamente proporcional a la temperatura (T) como se presenta en la Ecuación 19.

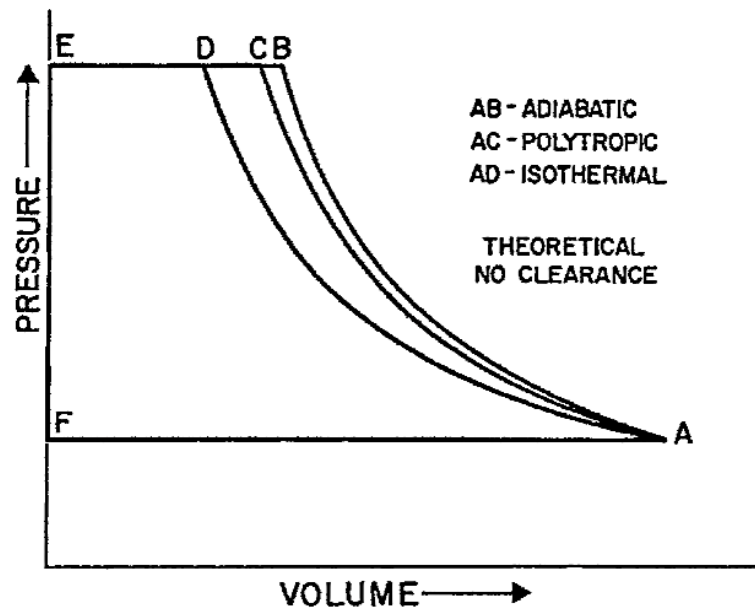
$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1} = \text{constante} \quad (19)$$

2.1.10.4 Ciclos de compresión.

Tenemos dos ciclos teóricos entre los que la compresión real da lugar. En la Figura 17 se muestra el proceso isotérmico AD, el cual es el que requiere menor trabajo en el ciclo y representaría un ahorro si solo consideramos el proceso de compresión. También tenemos el proceso casi adiabático (la variación de la entropía es mínimo) que se define con la Ecuación 20 donde k es el ratio del calor específico. El proceso de compresión sigue un ciclo politrópico que tiene la Ecuación 21 donde n es un valor determinado de forma experimental.

Figura 17:

Tipos de proceso de compresión



Nota: Bloch (2006a).

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k \quad (20)$$

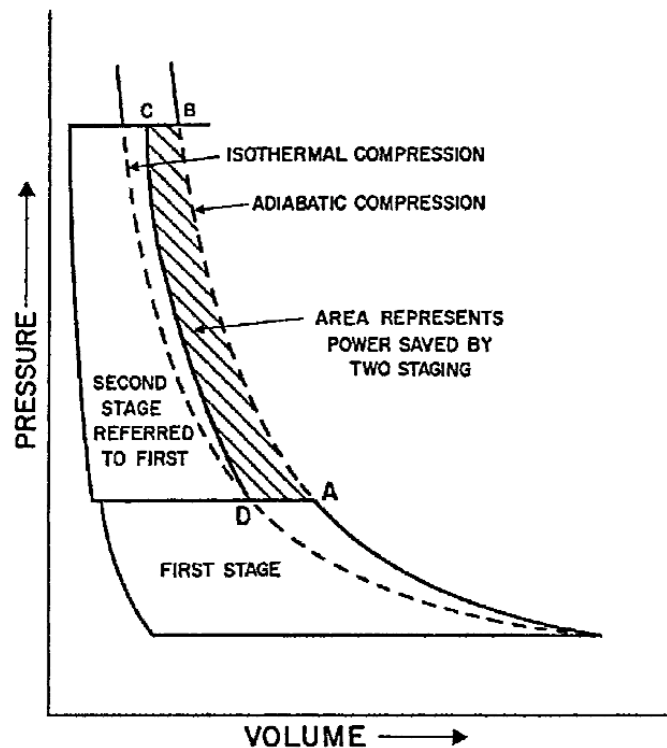
$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad (21)$$

2.1.10.5 Compresión con múltiples etapas.

Existen beneficios al realizar la compresión con múltiples etapas, entre ellas tenemos una menor temperatura de salida y un ahorro de energía. Como se aprecia en la Figura 18 el área sombreada es la reducción de trabajo requerido, lo que supone un ahorro económico. Existe una relación de compresión en cada etapa si asumimos un enfriamiento entre etapas, la ecuación que nos permite encontrar la relación es la Ecuación 22 donde r_s es la compresión en cada etapa, s es el número de etapas y r_t es la relación de compresión total.

Figura 18:

Diagrama p-V para un compresor de dos etapas



Nota: Bloch (2006a).

$$r_s = \sqrt[s]{r_t} \quad (22)$$

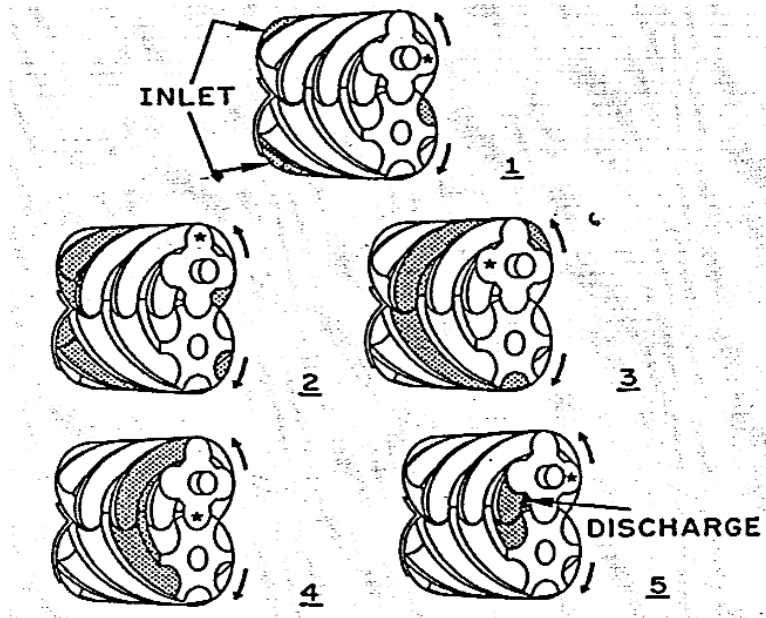
2.1.11 Compresor de doble tornillo helicoidal

En el libro de Bloch, H. (2006b) titulado "Compressors and modern process applications" se presenta el funcionamiento de los compresores de doble tornillo. Son

compresores de desplazamiento positivo, que cuentan con dos tornillos helicoidales, un macho y una hembra, que al entrelazarse generan la compresión. El gas ingresa a través de un puerto de entrada y llena las ranuras a lo largo del rotor hembra. Durante el funcionamiento los lóbulos del rotor macho ingresan en las cavidades reduciendo el volumen, incrementando la presión. Una vez alcanzada la presión de diseño, se apertura la cubierta final y el gas comprimido es expulsado. En la Figura 19 se muestra el proceso de ingreso y descarga

Figura 19:

Principios de compresión en compresores de doble tornillo helicoidal

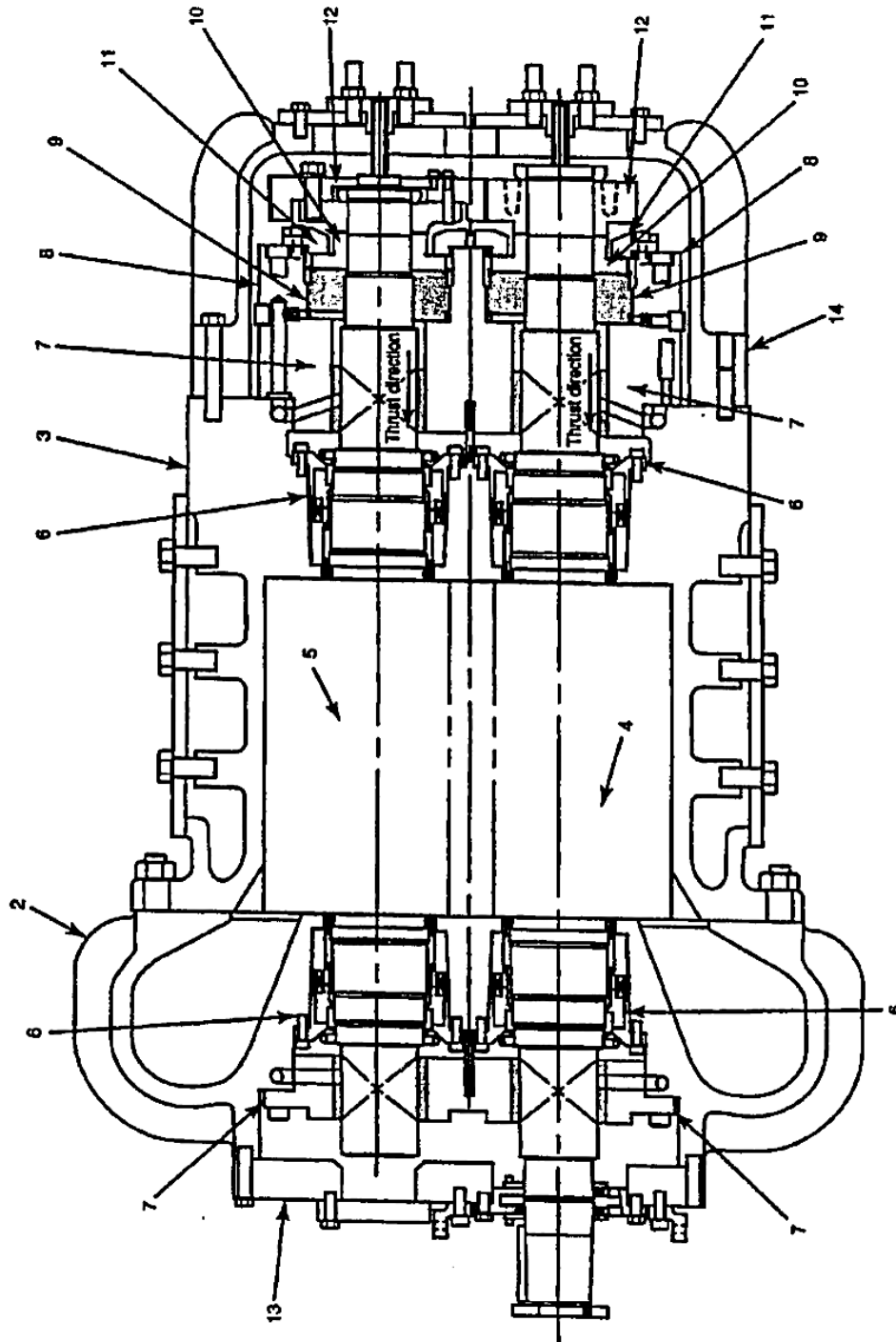


Nota: Bloch (2006b).

En la Figura 20 tenemos una distribución estándar de un compresor de doble tornillo helicoidal sin aceite. Tenemos los siguientes componentes: 1 compresor, 2 ingreso a carcasa, 3 carcasa, 4 rotor macho, 5 rotor hembra, 6 sello de eje, 7 rodamiento radial, 8 carcasa de cojinete de empuje, 9 cojinete de empuje, 10 collarín de empuje, 11 placa de empuje, 12 engranaje de sincronización, 13 cubierta de succión, 14 cubierta de descarga.

Figura 20:

Vista transversal de un compresor de tornillos exento de aceite



Nota: Bloch (2006b).

2.2 Marco conceptual: Definición de términos o conceptos

Compresor: Máquina encargada de transformar la energía eléctrica en aire comprimido utilizando tornillos rotativos para elevar la presión.

Planta: Instalación donde se elaboran productos al combinar el trabajo humano con las máquinas.

Presión: Magnitud física escalar que mide la fuerza aplicada en una unidad de superficie. En compresores, representa la medida de resistencia al caudal generado y utiliza como unidad PSI.

Confiabilidad: Es la probabilidad del correcto funcionamiento de una máquina o sistema, dentro de un determinado periodo de tiempo.

Mantenimiento: Conjunto de operaciones necesarios para que los equipos funcionen de acuerdo con los requerimientos de su diseño.

Disponibilidad: Es la probabilidad de que un equipo esté en condiciones de funcionar en un momento en el tiempo. Se expresa como porcentaje del tiempo que el equipo está operativo.

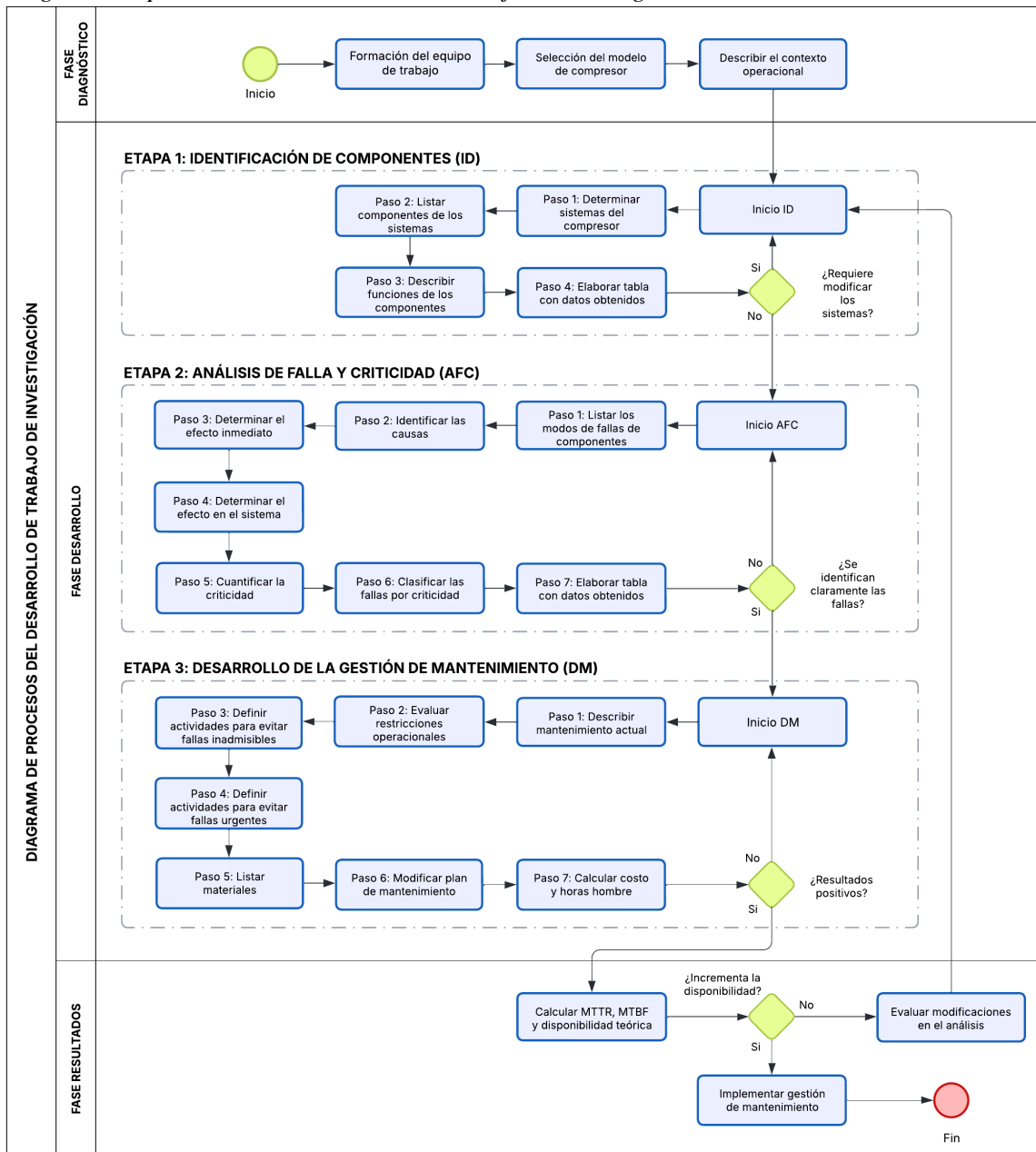
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Descripción operacional de los compresores

Realizaremos los pasos indicados en la Figura 21 Diagrama de procesos del desarrollo del trabajo de investigación.

Figura 21:

Diagrama de procesos del desarrollo del trabajo de investigación



Nota. Elaboración propia

Utilizamos de base las siete preguntas del RCM y AMEF, el cual facilita el análisis y la cuantificación de las fallas. Posterior a ello se definen las modificaciones al proceso, y las actividades de mantenimiento. También se calcula el stock requerido en almacén para la ejecución de los mantenimientos.

Iniciamos el desarrollo de la investigación evaluando los compresores. En la planta concentradora, se emplean 7 modelos de compresores en una flota de 17 en total. Los compresores tienen un mismo tiempo de vida, impacto ambiental y criticidad para la operación, por ello, para escoger el modelo al cual se realizará el diseño de la gestión de mantenimiento se considera al que tenga la mayor representación dentro de la flota total, dicha información está presentada en la Tabla 7.

Tabla 7:

Cantidad de compresores por modelo

Modelo	Equipos instalados	Porcentaje (%)
ZT250	5	29.4
Modelo 2	3	17.6
Modelo 3	2	11.8
Modelo 4	2	11.8
Modelo 5	2	11.8
Modelo 6	2	11.8
Modelo 7	1	5.9

Nota. Elaboración propia.

Para la investigación se escoge el modelo ZT250, teniendo un impacto en el 29.4% de la flota. Adicionalmente, posterior a la implementación y evaluación de resultados de esta investigación, se puede replicar fácilmente en el Modelo 2, el cual tiene el 17.6% de la flota y presenta una fabricación similar a la del ZT250 la diferencia es que produce menor caudal de aire comprimido, por lo que algunos componentes eléctricos varían en capacidad, sin embargo, el estudio de criticidad de fallas y métodos para su eliminación, así como los planes de mantenimiento pueden ser replicados. Efectivamente la investigación tiene un impacto en el 29.4% de la flota y es fácilmente replicable en un 17.6% adicional, llegando a un 47%.

Los compresores ZT250 son compresores de tornillo refrigerados por aire, cuentan con dos etapas de compresión y son accionados por un motor eléctrico. Los cinco compresores ZT250 están ubicados en una sala separada de las plantas de producción. La sala no cuenta con un sistema de circulación de aire forzado, sino que tiene solamente aperturas en la zona superior para la ventilación. Los cinco compresores presentan las mismas características de diseño. Los tags de los equipos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8:

Tag de los compresores modelo ZT250

Modelo	TAG
ZT250	ZT250/1
ZT250	ZT250/2
ZT250	ZT250/3
ZT250	ZT250/4
ZT250	ZT250/5

Nota. Elaboración propia.

En el Anexo 2 se encuentran las especificaciones de los compresores ZT250 y el motor eléctrico que lo acciona.

Los compresores trabajan en paralelo entregando aire comprimido para el proceso de producción, alimentando plantas de proceso, colectores de polvo y otros sistemas periféricos y también alimentan a una red de planta, para el uso de herramientas neumáticas. De acuerdo con el diseño tres compresores se encargarían de los requerimientos de la planta, con un cuarto compresor operando esporádicamente cuando la planta lo requiera. Con las expansiones y modificaciones, el cuarto compresor está operando de forma constante. No es de extrañar que, en futuros años, sea requerida la operación de los cinco de forma continua.

Actualmente no se cuenta con un sistema que, ante una reducción de la producción de aire comprimido, priorice las áreas que son alimentadas y automáticamente detenga la alimentación a las de menor criticidad. La evaluación del impacto en la pérdida de producción no es objeto de estudio de la presente investigación, se tiene como referencia que la detención de dos compresores significa un impacto ambiental por el efecto en los

colectores de polvo, así como un posible impacto en un 50% de la producción (dependiendo de la duración de la detención). El impacto es suficiente para justificar la necesidad de asegurar la operatividad de 4 compresores

Para calcular dicha operatividad, se calcula la probabilidad de que 4 compresores operen y se suma la probabilidad de que los 5 estén operando. Se tiene la Ecuación 23 para determinar la confiabilidad, donde N es el número total de compresores en paralelo, n es el número de compresores operativos y R(t) es la confiabilidad de cada uno. Considerando que la confiabilidad de cada compresor es la misma, la confiabilidad del sistema se calcula de la siguiente forma:

$$R = R(t)^n \times (1 - R(t))^{(N-n)} \quad (23)$$

Los resultados para cada uno de los casos se encuentran presentados en la Tabla 9. Dichos resultados son multiplicados por la cantidad de casos que existen, que se obtiene de la combinatoria de la cantidad de compresores en la cantidad total.

Tabla 9:

Confiabilidad de los compresores

Compresores	Cantidad de combinaciones	Confiabilidad de cada caso	Confiabilidad
0	1	0.00%	0.00%
1	5	0.00%	0.00%
2	10	0.01%	0.11%
3	10	0.21%	2.14%
4	5	4.07%	20.36%
5	1	77.38%	77.38%

Nota. Confiabilidad de la combinatoria de cinco compresores en paralelo. Se considera disponibilidad individual del 95%. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 10 presenta el comportamiento de la confiabilidad del sistema frente a diferentes valores de confiabilidad para cada compresor.

Tabla 10:*Comportamiento de la confiabilidad*

Confiabilidad individual	Confiabilidad del sistema
80.00%	73.73%
85.00%	83.52%
90.00%	91.85%
95.00%	97.74%
97.00%	99.15%

Nota. Elaboración propia.

3.2 Funcionamiento y sistemas

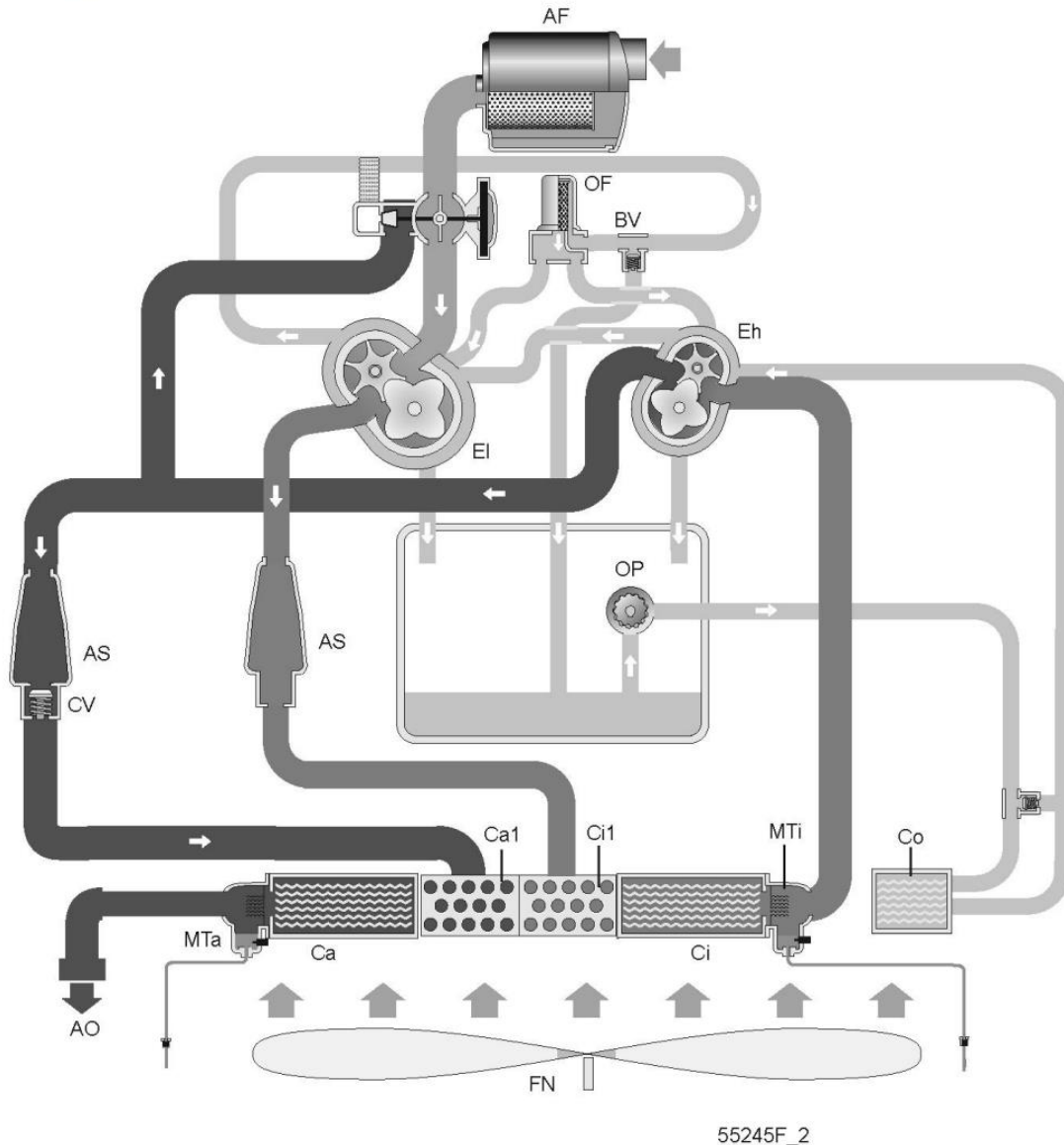
Determinado el equipo a evaluar, se realiza la descomposición de sus sistemas, hasta llegar a los componentes. Para ello debemos comprender el funcionamiento del equipo. La Figura 22 presenta los componentes y flujos del compresor ZT250. En la Tabla 11 se presenta la descripción de cada componente.

Tabla 11:*Descripción de cada componente*

Referencia	Nombre
AF	Filtro de aire
AO	Salida de aire
AS	Silenciador
BV	Válvula Bypass
Ca1	Pre-postenfriador
Ca	Postenfriador
Ci1	Pre-interenfriador
Ci	Interenfriador
Co	Enfriador de aceite
CV	Válvula check
Eh	Elemento compresor de alta presión
Ei	Elemento compresor de baja presión
FN	Ventilador
MTa	Trampa de humedad de postenfriador
MTi	Trampa de humedad de interenfriador
OF	Filtro de aceite
OP	Bomba de aceite

Nota: NMA Industrial Services (n.d.).

Figura 22:
Componentes y flujos del compresor ZT250
Flow diagram



Flow diagram of ZT 110 up to ZT 275 compressors and ZT 132 VSD up to ZT 315 VSD compressors

Nota: NMA Industrial Services (n.d.).

El aire ingresa a través de un filtro (AF) y es comprimido en la primera etapa de compresión (EI). Posterior a ello pasa a través de un silenciador (AS), es enfriado (Ci1 y Ci) y pasa a la segunda etapa de compresión (Eh), posterior a la cual pasa nuevamente por un silenciador (AS), una válvula check (CV) y enfriadores (Ca1 y Ca). Finalmente es descargado (AO).

El aceite para lubricación es bombeado (OP) y enfría los elementos compresores sin entrar en contacto con el aire. En su sistema tiene un filtro (OF) antes de ingresar a los

rodamientos y engranajes de sincronismo y tiene una válvula que se apertura si la presión del aceite incrementa por encima de un valor específico.

La refrigeración de los enfriadores de aire y aceite se realiza por aire mediante el uso de ventiladores.

Adicionalmente cuenta con purgas automáticas que detectan el nivel de agua en la trampa de humedad, llegando a un nivel determinado el sistema apertura la purga gracias a una válvula solenoide. Es importante mantener el correcto funcionamiento de la purga, ya que evita la generación de agua y el ingreso de esta a los elementos compresores.

Para realizar el proceso de carga y descarga del compresor, se apoya en válvulas solenoides.

Durante el desarrollo de la investigación se realizará la codificación de los sistemas en letras, componentes en números y modos de falla en números, separados por un punto. Como ejemplo tenemos el modo de falla A.02.03 que corresponde al sistema A, componente 02.

La información de los diagramas, así como el desglose en componentes se encuentra presentado en la Tabla 12, donde se divide al compresor en 5 sistemas y se incluyen los ítems mantenibles que los componen.

El sistema de compresión de aire es compuesto por los elementos por donde se traslada el aire, desde su captura hasta su expulsión, así como los tornillos.

El sistema de lubricación se encarga de lubricar los rodamientos en los elementos de compresión, así como refrigerar externamente la carcasa de los elementos de compresión.

El sistema de enfriamiento está compuesto por los ventiladores y los intercambiadores de calor.

El sistema de accionamiento está compuesto por los componentes que generan la potencia y los que se encargan de transmitir dicha potencia.

Finalmente, el sistema eléctrico y control está compuesto por los sensores que monitorean al compresor, así como los componentes eléctricos encargados del accionamiento del motor.

Tabla 12:

Información de diagramas y componentes

Sistema	Código ítem	Componente	Función
A. Compresión de aire	A.01	Filtro de aire	Capturar partículas en el aire, evitando su ingreso al circuito de compresión de aire
A. Compresión de aire	A.02	Elemento compresor de baja	Ejecutar la primera etapa de compresión de aire
A. Compresión de aire	A.03	Elemento compresor de alta	Ejecutar la segunda etapa de compresión de aire
A. Compresión de aire	A.04	Silenciadores	Reducir el ruido generado por la expansión de aire comprimido y ayuda a mantener un flujo uniforme
A. Compresión de aire	A.05	Válvula check	Impide el retorno de aire comprimido al elemento compresor de alta
A. Compresión de aire	A.06	Mangueras / tuberías	Transmisión del aire comprimido en el sistema
A. Compresión de aire	A.07	Válvula solenoide	regula las fases de carga y descarga del compresor Optimiza el consumo energético
A. Compresión de aire	A.08	Salida de aire	Descarga de aire comprimido a red de aire comprimido
A. Compresión de aire	A.09	Válvulas de seguridad	Reducir la presión del sistema
B. Lubricación	B.01	Bomba de aceite	Recirculación del aceite en el sistema de lubricación y refrigeración.
B. Lubricación	B.02	Filtro de aceite	Capturar impurezas en el circuito de lubricación
B. Lubricación	B.03	Indicador de nivel	Presentar el nivel del tanque de almacenamiento de lubricante
B. Lubricación	B.04	Mangueras / tuberías	Transmitir lubricante a rodamientos Enfriar exterior de elementos de compresión
B. Lubricación	B.05	Válvula de alivio	Descargar el lubricante en el tanque ante un incremento de presión en el sistema
B. Lubricación	B.06	Tanque de almacenamiento de lubricante	Almacenar el lubricante
C. Enfriamiento	C.01	Pre-Inter enfriador	Reducción de temperatura previo a la primera etapa de enfriamiento

C. Enfriamiento	C.02	Inter enfriador	Reducción de temperatura previo al ingreso a la segunda etapa de compresión
C. Enfriamiento	C.03	Pre post enfriador	Reducción de temperatura previo a la segunda etapa de enfriamiento
C. Enfriamiento	C.04	Post enfriador	Reducción de temperatura previo a la expulsión del aire al ambiente
C. Enfriamiento	C.05	Enfriador de aceite	Reducción de temperatura del aceite en el sistema de lubricación
C. Enfriamiento	C.06	Válvulas solenoide de drenaje	Eliminar la condensación en los enfriadores
C. Enfriamiento	C.07	Ventiladores	Circulación forzada de aire
C. Enfriamiento	C.08	Motor de ventilador	Accionar los ventiladores para la circulación de aire
D. Accionamiento	D.01	Motor	Accionar los dos elementos de compresión y la bomba de circulación de aceite
D. Accionamiento	D.02	Amortiguador de goma	Absorber la vibración del motor
D. Accionamiento	D.03	Eje de transmisión	Transfiere la potencia del motor al engranaje de transmisión
D. Accionamiento	D.04	Rodamientos	Permite la transmisión sin fricción
D. Accionamiento	D.05	Engranaje de transmisión	Transfiere la potencia del motor a los piñones de los elementos de compresión
D. Accionamiento	D.06	Piñones de elementos de compresión	Transfiere la potencia del engranaje de transmisión a los elementos de compresión
D. Accionamiento	D.07	Acople	Conexión entre motor y eje de transmisión
D. Accionamiento	D.08	Gomas para acople	Absorber impacto y desalineamiento del acople
E. Eléctrico y control	E.01	Contactores	Accionamiento de motor principal, motores de ventiladores, cambio de fases
E. Eléctrico y control	E.02	Relé de sobre corriente	Protección contra sobre corriente
E. Eléctrico y control	E.03	Fusible	Proteger al sistema ante picos de corriente
E. Eléctrico y control	E.04	Ventilador de tablero	Refrigeración de componentes eléctricos
E. Eléctrico y control	E.05	Arrancador	Arranque progresivo y reducción de picos de corriente
E. Eléctrico y control	E.06	Botones de emergencia	Detener el compresor
E. Eléctrico y control	E.07	Transformador	Alimentación de componentes de control y motor de ventiladores
E. Eléctrico y control	E.08	Filtros	Capturar partículas en el aire, evitando su ingreso al tablero
E. Eléctrico y control	E.09	ELEKTRONIKON MK5 GRAPHIC PLUS	Control de carga y descarga del compresor

			Envío de alarmas
E. Eléctrico y control	E.10	Sensores de presión	Detección de presión en compresor
E. Eléctrico y control	E.11	Sensores de temperatura	Medir temperatura en motor
E. Eléctrico y control	E.12	Módulo SPM-MK5-100	Monitoreo en tiempo real de presión y temperatura Comunicación

Nota. Elaboración propia.

3.3 Análisis de modos y efectos de falla

A continuación, realizamos el Análisis de modos y efectos de falla (AMEF), el cual permitirá responder las preguntas 2, 3 y 4 del RCM. En las siguientes tablas se enumeran las fallas utilizando los códigos de componente indicados en la tabla previa.

En la Tabla 13 presentamos los modos de falla, causa y efectos en los componentes encargados de la compresión del aire, como efecto recurrente encontramos la reducción de la presión entregada o reducción del caudal.

Tabla 13:

Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de compresión de aire

Cod. falla	Modo de falla	Causa de falla	Efecto inmediato	Efecto sistema
A.01.01	Desgaste del filtro	Envejecimiento del material	Ingreso de partículas contaminantes al sistema	Acelera el desgaste de componentes como rotores, silenciadores
A.01.02	Saturación del filtro	Partículas contaminantes	Reducción de flujo de aire en el circuito de compresión de aire	Reducción de caudal entregados por el compresor
A.02.01	Desgaste de rotores	Envejecimiento del material, fricción por partículas contaminantes	Disminución de la presión de salida	Pérdida de la eficiencia
A.02.02	Desgaste, endurecimiento de sellos	Envejecimiento del material	Disminución de la presión de salida	Pérdida de la eficiencia
A.02.03	Fisura de carcasa	Vibración elevada por desalineamiento o daño en rodamientos	Pérdida de presión en el sistema	Contaminación de aceite en el aire
A.03.01	Desgaste de rotores	Envejecimiento del material, fricción por partículas contaminantes	Disminución de la presión de salida	Pérdida de la eficiencia

A.03.02	Desgaste, endurecimiento de sellos	Envejecimiento del material	Disminución de la presión de salida	Pérdida de la eficiencia
A.03.03	Fisura de carcaza	Vibración elevada por desalineamiento o daño en rodamientos	Pérdida de presión en el sistema	Contaminación de aceite en el aire
A.04.01	Obstrucción de espuma	Acumulación de partículas	Incremento de presión en elementos de compresión, reducción del caudal	Pérdida de la eficiencia
A.04.02	Desgaste de espuma	Envejecimiento del material	Incremento de los decibelios	Ruido elevado
A.04.03	Corrosión de carcaza	Humedad ambiental elevada, condensación de agua	Pérdida de presión en el sistema	Reducción de caudal entregados por el compresor
A.05.01	Desgaste, deformación de componentes internos	Envejecimiento del material	Retorno de aire a alta presión	Compresor no ingresa a modo descarga
A.05.02	Corrosión de componentes metálicos	Humedad ambiental elevada, condensación de agua	Pérdida de presión en el sistema	Reducción de caudal entregados por el compresor
A.05.03	Obstrucción	Partículas contaminantes	Retorno de aire a alta presión	Compresor no ingresa a modo descarga
A.06.01	Corrosión	Humedad ambiental elevada, condensación de agua	Pérdida de presión en el sistema	Reducción de caudal entregados por el compresor
A.06.02	Deformación	Vibración elevada en componentes	Alteración al flujo	Sin impacto significativo
A.06.03	Obstrucción	Partículas contaminantes	Incremento de presión en sistema	Pérdida de la eficiencia
A.06.04	Perforaciones	Envejecimiento del material, Desgaste por vibración, temperatura	Pérdida de presión en el sistema	Reducción de caudal entregados por el compresor
A.07.01	Falla en la bobina electromagnética	Quemadura	Pérdida de control en ciclos de carga y descarga	Incremento del consumo energético
A.07.01	Obstrucción	Partículas contaminantes	Pérdida de control en ciclos de carga y descarga	Incremento del consumo energético
A.07.02	Fuga en los sellos	Envejecimiento del material	Pérdida de control en ciclos de carga y descarga	Incremento del consumo energético

A.08.01	Desgaste de componente	Envejecimiento del material, ambiente agresivo	Pérdida de presión en el sistema	Reducción de caudal entregados por el compresor
A.09.01	Fugas	Envejecimiento del material	Pérdida de presión en el sistema	Reducción de caudal entregados por el compresor
A.09.02	Obstrucción	Partículas contaminantes	Incremento de presión	Pérdida de la eficiencia

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 14 presentamos el análisis de los componentes del sistema de lubricación. Uno de los efectos de las fallas en este sistema es la fuga de lubricante, el cual debe ser evitado debido a su impacto ambiental.

Tabla 14:

Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de lubricación

Cod. falla	Modo de falla	Causa de falla	Efecto inmediato	Efecto sistema
B.01.01	Desgaste de componentes internos	Envejecimiento del material Aceite contaminado	Pérdida de presión en el sistema de lubricación	Eleva la temperatura en elementos de compresión y sus rodamientos
B.02.01	Desgaste del filtro	Envejecimiento del material	Ingreso de partículas contaminantes al sistema	Acelera el desgaste de componentes, reducción de propiedades como viscosidad
B.02.02	Saturación del filtro	Partículas contaminantes	Incremento de presión en sistema de lubricación	Se reduce la lubricación en rodamientos
B.02.03	Fugas	Envejecimiento del material, Desgaste por vibración	Pérdida de lubricante	Detención del compresor Contaminación ambiental
B.03.01	Nula visibilidad	Contaminación interna o externa	Impide verificar el nivel del aceite	Impide verificar fugas de aceite
B.04.01	Deformación	Vibración elevada en componentes	Alteración al flujo	Sin impacto significativo
B.04.02	Obstrucción	Partículas contaminantes	Incremento de presión en sistema	Incremento de temperatura

B.04.03	Perforaciones	Envejecimiento del material, Desgaste por vibración, temperatura	Pérdida de lubricante	Detención del compresor Contaminación ambiental
B.05.01	Fugas	Envejecimiento del material	Pérdida de presión en el sistema de lubricación, no ingresa a rodamientos	Incremento en la temperatura de rodamientos
B.05.02	Bloqueo	Partículas contaminantes en el lubricante	Incremento de presión en sistema de lubricación	Detención del compresor
B.06.01	Perforaciones	Envejecimiento del material, Desgaste por vibración, temperatura	Pérdida de lubricante	Detención del compresor Contaminación ambiental
B.06.02	Bajo nivel de aceite	Evaporación de aceite Drenaje incorrecto	Pérdida de lubricante	Contaminación ambiental

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 15 presentamos el análisis de los componentes del sistema de enfriamiento. Este sistema permite mantener la eficiencia del compresor mediante la reducción de temperatura entre etapas.

Tabla 15:

Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de enfriamiento

Cod. falla	Modo de falla	Causa de falla	Efecto inmediato	Efecto sistema
C.01.01	Corrosión	Condensación de agua en líneas de aire	Emisión de partículas en el flujo de aire	Daño a componentes del sistema de compresión de aire
C.01.02	Desgaste, fisuras	Acumulación de partículas	Fuga de aire caliente	Incremento de temperatura en el interior del compresor
C.01.03	Obstrucción	Acumulación de partículas	Incremento de presión	Detención de compresor por presión elevada
C.01.04	Reducción del intercambio de calor	Material impregnado en superficie	Incremento de temperatura	Pérdida de la eficiencia
C.02.01	Corrosión	Condensación de agua en líneas de aire	Emisión de partículas en el flujo de aire	Daño a componentes del sistema de compresión de aire

C.02.02	Desgaste, fisuras	Acumulación de partículas	Fuga de aire caliente	Incremento de temperatura en el interior del compresor
C.02.03	Obstrucción	Acumulación de partículas	Incremento de presión	Detención de compresor por presión elevada
C.02.04	Reducción del intercambio de calor	Material impregnado en superficie	Incremento de temperatura	Pérdida de la eficiencia
C.03.01	Corrosión	Condensación de agua en líneas de aire	Emisión de partículas en el flujo de aire	Daño a componentes del sistema de compresión de aire
C.03.02	Desgaste, fisuras	Acumulación de partículas	Fuga de aire caliente	Incremento de temperatura en el interior del compresor
C.03.03	Obstrucción	Acumulación de partículas	Incremento de presión	Detención de compresor por presión elevada
C.03.04	Reducción del intercambio de calor	Material impregnado en superficie	Incremento de temperatura	Pérdida de la eficiencia
C.04.01	Corrosión	Condensación de agua en líneas de aire	Emisión de partículas en el flujo de aire	Daño a componentes del sistema de compresión de aire
C.04.02	Desgaste, fisuras	Acumulación de partículas	Fuga de aire caliente	Incremento de temperatura en el interior del compresor
C.04.03	Obstrucción	Acumulación de partículas	Incremento de presión	Detención de compresor por presión elevada
C.04.04	Reducción del intercambio de calor	Material impregnado en superficie	Incremento de temperatura	Pérdida de la eficiencia
C.05.01	Desgaste, fisuras	Envejecimiento del material Vibración elevada	Emisión de partículas en el sistema de lubricación, fuga de aceite Pérdida de lubricante	Daño a rodamientos de elementos de compresión, pérdida de nivel de lubricante Detención del compresor
C.05.02	Obstrucción	Acumulación de partículas	Incremento de temperatura del compresor	Detención del compresor por temperatura elevada Contaminación ambiental

C.05.03	Reducción del intercambio de calor	Material impregnado en superficie	Incremento de temperatura	Pérdida de la eficiencia
C.06.01	Bloqueo	Acumulación de partículas, daño en cableado eléctrico	Acumulación de humedad	Corrosión en mangueras, tuberías, enfriadores
C.07.01	Detención de ventilador	Corriente elevada por daño en rodamientos, desbalance en las aspas	Incremento en temperatura de compresor	Detención del compresor por temperatura elevada
C.07.02	Desbalance de ventilador	Material impregnado en superficie	Incremento de vibración	Incremento en amperaje de motor
C.08.01	Trip por sobre corriente	Desbalance en ventilador, daño en rodamientos, perturbaciones eléctricas, daño en bobinado	Detención de ventiladores	Detención del compresor por temperatura elevada

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 16 presentamos el análisis de los componentes del sistema de accionamiento, compuesto por componentes mecánicos para transmisión de potencia.

Tabla 16:

Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema de accionamiento

Cod. falla	Modo de falla	Causa de falla	Efecto inmediato	Efecto sistema
D.01.01	Falla eléctrica, sobrecalentamiento	Amperaje elevado, daño en bobinado	Detención del compresor	Detención del compresor
D.01.02	Daño en rodamiento	Envejecimiento del material, vibración elevada	Incremento de amperaje	Posible detención del compresor Daño en el bobinado
D.01.03	No enciende	Alteraciones en la alimentación de energía	Detención del compresor	Detención del compresor
D.01.04	Bajo aislamiento	Envejecimiento del material Daño en bobinado	Incremento de temperatura	Detención del equipo
D.02.01	Desgaste	Envejecimiento del material	Incremento de vibración en motor	Daños en rodamientos de motor

D.03.01	Desalineamiento	Vibración excesiva	Incremento en el torque requerido por el motor	Incremento de temperatura y corriente en el motor
D.03.02	Fractura del eje	Envejecimiento del material	Detención del compresor	Detención del compresor
D.04.01	Desgaste	Envejecimiento del material, lubricación deficiente	Aumento de fricción	Incremento de temperatura y corriente en el motor
D.05.01	Desgaste en los dientes del engranaje	Envejecimiento del material, cargas elevadas, contaminación	Pérdida de la eficiencia	Detención del motor
D.05.02	Fractura	Vibración elevada por desalineamiento	Pérdida de transferencia de potencia	Detención del compresor
D.06.01	Desgaste en los dientes del piñón	Envejecimiento del material, cargas elevadas, contaminación	Vibración elevada	Reducción de la eficiencia, desalineamiento en componentes
D.06.02	Fractura	Vibración elevada por desalineamiento	Pérdida de transferencia de potencia	Detención del compresor
D.07.01	Desgaste, fractura	Envejecimiento del material, cargas elevadas, contaminación	Detención del compresor	Detención del compresor
D.07.02	Desalineamiento	Vibración excesiva, instalación incorrecta	Incremento en el torque requerido por el motor	Incremento de temperatura y corriente en el motor
D.08.01	Endurecimiento	Envejecimiento del material, temperatura elevada	Incremento de la vibración	Daño en rodamientos

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 17 presentamos el análisis de los componentes del sistema eléctrico y de control, susceptible a perturbaciones en la red de alimentación de energía y contaminación.

Tabla 17:*Modos, causas y efectos de fallas en los componentes del sistema eléctrico y control*

Cod. falla	Modo de falla	Causa de falla	Efecto inmediato	Efecto sistema
E.01.01	Falso contacto	Mal apriete en conectores	Detención del compresor	Detención del compresor
E.01.02	Cortocircuito	Perturbaciones en la red Desgaste de contacto	Detención del compresor	Detención del compresor
E.02.01	Accionamiento ante parámetros no especificados	Ajuste incorrecto de relé	Detención del compresor	Detención del compresor
E.02.02	Cortocircuito	Perturbaciones en la red	Detención del compresor	Detención del compresor
E.03.01	Fundición del fusible	Sobre corriente o cortocircuito	Detención del compresor	Detención del compresor
E.04.01	Desbalance en ventilador	Material impregnado en superficie	Incremento de vibración	Incremento en amperaje de motor
E.04.02	Detención de ventilador	Corriente elevada por daño en rodamientos, desbalance en las aspas	Incremento de temperatura en tablero	Daño a componentes eléctricos
E.05.01	Cortocircuito	Perturbaciones en la red	Detención del compresor	Detención del compresor
E.05.02	Falso contacto	Mal apriete en conectores	Detención del compresor	Detención del compresor
E.06.01	No realiza activación	Envejecimiento del material	No se puede realizar la detención de emergencia	Sin efecto mayor en el compresor
E.07.01	Sobrecalentamiento	Partículas contaminantes Desgaste de aislamiento	Incremento de temperatura Variaciones en la alimentación	Daño a componentes eléctricos
E.07.02	Cortocircuito	Envejecimiento del material	Detención del compresor	Detención del compresor
E.08.01	Desgaste del filtro	Envejecimiento del material	Ingreso de partículas contaminantes al sistema	Incrementa la probabilidad de cortocircuito en tablero
E.08.02	Saturación del filtro	Partículas contaminantes	Reducción de flujo de aire en el tablero	Incremento de temperatura en el tablero
E.09.01	Cortocircuito	Polución, puntos calientes	Pérdida de control de fases carga / descarga en compresor	Detención del compresor

E.09.02	Falso contacto	Mal apriete en conectores	Pérdida de control de fases carga / descarga en compresor	Detención del compresor
E.09.03	Desconfiguración	Fluctuación en la alimentación Intervención incorrecta	Detención del compresor	Detención del compresor
E.10.01	Degradación	Envejecimiento del material Vibración elevada	Pérdida de lecturas	Detención del compresor
E.11.01	Degradación	Envejecimiento del material Vibración elevada	Pérdida de lecturas	Pérdida de elementos de protección del compresor
E.12.01	Falso contacto	Mal apriete en conectores	Pérdida de señal de instrumentos	Detención del compresor
E.12.02	Cortocircuito	Polución, puntos calientes	Pérdida de señal de instrumentos Pérdida de comunicación	Detención del compresor

Nota. Elaboración propia.

3.4 Análisis de criticidad

Se recopiló información de las fallas de los últimos tres años que generen una detención de los equipos, la cual se compiló en la tabla del Anexo 3. En dicho anexo se presenta la fecha de la falla, el equipo, la duración y el componente que falló. De acuerdo con la clasificación presentada en el desarrollo de la investigación y la Tabla 12, se asignó también el sistema al que corresponde. Un resumen de la información se presenta en la Tabla 18, donde presentamos el sistema, el número de fallas y la duración total de la detención de los equipos.

Tabla 18:

Cantidad de fallas y horas por sistema

Sistema	Número de fallas	Duración total de las fallas (horas)
Compresión de aire	0	0
Lubricación	9	23
Enfriamiento	11	41
Accionamiento	0	0
Eléctrico y control	7	21

Nota. Elaboración propia.

Adicionalmente, se presentan los componentes con mayor incidencia de fallas en la Tabla 19, incluyendo el total de las horas inoperativas de los equipos. Se encuentra que los motores de ventilador tienen el mayor impacto en las horas de detención de los compresores.

Tabla 19:

Componentes con mayor incidencia de fallas en los sistemas 1 y 2

Sistema	Componente	Cantidad de fallas	Duración total de las fallas (horas)
Enfriamiento	Motor de ventilador	6	24
Enfriamiento	Enfriador	4	14
Eléctrico y control	Sensor de presión	3	6
Eléctrico y control	Contactador principal	3	12

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se realiza la cuantificación de la criticidad de las fallas. Para ello, se han identificado los campos que tienen influencia en la criticidad y se asigna valores a sus características, lo cual se encuentra en la Tabla 20.

Tabla 20:

Determinación de los campos para criticidad de fallas

Valor	Frecuencia de fallas (FF)	Impacto en la producción (IP)	Seguridad y salud (SS)	Medio ambiente (MA)	Detectabilidad (DT)	Tiempo de reparación (TR)
1	No ha sucedido	Sin impacto en la producción	Sin riesgo de lesión	Sin riesgo al medio ambiente	Inspección visual	Menos de 1 hora
2	Menos de 2 al año	Reducción del 30% caudal de aire	Accidente no incapacitante	-	Medición con instrumentos o múltiples componentes con misma falla	Menos de 6 horas
3	Menos de 5 al año	Reducción del 60% caudal de aire	Accidente con tiempo perdido	Impacto suelo o aire	Ensayos no destructivos con detención del equipo	Menos de 12 horas
4	Más de 5 al año	Detención del equipo	Accidente fatal	-	Desmontaje de componentes y análisis en taller especializado	Más de 12 horas

Nota. Elaboración propia.

Para cuantificar la criticidad de las fallas, utilizaremos el Índice de Criticidad (IC), el cual se calcula mediante la Ecuación 24.

$$IC = FF \times (IP + SS + MA + DT + TR) \quad (24)$$

En la Tabla 21 se presentan los tipos de falla utilizados en la investigación, las cuales son: inadmisible, prioritaria y aceptable. En el caso de las fallas inadmisibles, incluimos también aquellas que tengan un valor de tres a más en los campos de seguridad y medio ambiente.

Tabla 21:

Clasificación de tipos de falla

Ítem	Tipo de falla	Característica
1	Inadmisible	Mayor igual a 20 o SS >=3 MA >= 3
2	Prioritaria	IC mayor igual a 14
3	Aceptable	IC menor a 14

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 22 se asignan los pesos de las fallas en cada uno de los campos. Se calcula el índice de criticidad y se añade el tipo de falla para cada uno de los códigos de falla.

Tabla 22:

Cuantificación de criticidad de los modos de falla

Cod. falla	FF	IP	SS	MA	DT	TR	IC	Tipo
A.01.01	1	1	1	1	1	1	5	Aceptable
A.01.02	1	3	1	1	1	1	7	Aceptable
A.02.01	1	3	1	1	4	4	13	Aceptable
A.02.02	1	2	1	1	4	4	12	Aceptable
A.02.03	1	2	1	3	1	4	11	Inadmisible
A.03.01	1	3	1	1	4	4	13	Aceptable
A.03.02	1	2	1	1	4	4	12	Aceptable
A.03.03	1	2	1	3	1	4	11	Inadmisible
A.04.01	1	1	1	1	1	1	5	Aceptable
A.04.02	1	1	3	1	1	1	7	Inadmisible

A.04.03	1	3	1	1	1	2	8	Aceptable
A.05.01	1	1	1	1	1	2	6	Aceptable
A.05.02	1	2	1	1	1	2	7	Aceptable
A.05.03	1	1	1	1	2	1	6	Aceptable
A.06.01	1	2	2	1	1	2	8	Aceptable
A.06.02	1	1	2	1	1	2	7	Aceptable
A.06.03	1	1	2	1	2	2	8	Aceptable
A.06.04	1	2	2	1	1	2	8	Aceptable
A.07.01	1	1	1	1	2	2	7	Aceptable
A.07.01	1	1	1	1	2	1	6	Aceptable
A.07.02	1	1	2	1	2	2	8	Aceptable
A.08.01	1	2	2	1	1	2	8	Aceptable
A.09.01	1	2	2	1	2	2	9	Aceptable
A.09.02	1	1	1	1	2	1	6	Aceptable
B.01.01	1	4	1	1	2	2	10	Aceptable
B.02.01	1	1	1	1	1	1	5	Aceptable
B.02.02	2	4	1	1	1	1	16	Prioritaria
B.02.03	1	4	1	3	1	1	10	Inadmisible
B.03.01	2	1	1	1	1	1	10	Aceptable
B.04.01	1	1	1	1	1	3	7	Aceptable
B.04.02	1	1	2	1	2	3	9	Aceptable
B.04.03	1	4	2	3	1	3	13	Inadmisible
B.05.01	1	1	1	3	2	2	9	Inadmisible
B.05.02	1	4	1	1	2	2	10	Aceptable
B.06.01	1	4	2	3	1	4	14	Inadmisible
B.06.02	3	4	1	3	1	2	33	Inadmisible
C.01.01	2	1	1	1	2	3	16	Prioritaria
C.01.02	3	2	3	1	2	3	33	Inadmisible
C.01.03	1	4	1	1	2	3	11	Aceptable
C.01.04	1	1	1	1	1	2	6	Aceptable
C.02.01	2	1	1	1	2	3	16	Prioritaria
C.02.02	3	2	3	1	2	3	33	Inadmisible
C.02.03	1	4	1	1	2	3	11	Aceptable
C.02.04	1	1	1	1	1	2	6	Aceptable
C.03.01	2	1	1	1	2	3	16	Prioritaria
C.03.02	3	2	3	1	2	3	33	Inadmisible
C.03.03	1	4	1	1	2	3	11	Aceptable
C.03.04	1	1	1	1	1	2	6	Aceptable
C.04.01	2	1	1	1	2	3	16	Prioritaria
C.04.02	3	2	3	1	2	3	33	Inadmisible
C.04.03	1	4	1	1	2	3	11	Aceptable
C.04.04	1	1	1	1	1	2	6	Aceptable
C.05.01	1	4	1	1	2	3	11	Aceptable

C.05.02	1	4	1	1	3	3	12	Aceptable
C.05.03	1	3	1	1	1	2	8	Aceptable
C.06.01	2	1	1	1	1	2	12	Aceptable
C.07.01	3	4	1	1	1	3	30	Inadmisible
C.07.02	2	3	2	1	1	2	18	Prioritaria
C.08.01	3	4	1	1	1	3	30	Inadmisible
D.01.01	1	4	2	1	2	3	12	Aceptable
D.01.02	1	2	1	1	2	3	9	Aceptable
D.01.03	1	4	1	1	2	3	11	Aceptable
D.01.04	1	4	1	1	3	3	12	Aceptable
D.02.01	1	1	1	1	2	2	7	Aceptable
D.03.01	1	1	1	1	2	2	7	Aceptable
D.03.02	1	4	2	1	1	4	12	Aceptable
D.04.01	1	1	1	1	2	3	8	Aceptable
D.05.01	1	4	1	1	2	3	11	Aceptable
D.05.02	1	4	1	1	3	3	12	Aceptable
D.06.01	1	3	1	1	2	2	9	Aceptable
D.06.02	1	4	2	1	3	2	12	Aceptable
D.07.01	1	4	1	1	3	3	12	Aceptable
D.07.02	1	1	1	1	2	3	8	Aceptable
D.08.01	1	1	1	1	1	3	7	Aceptable
E.01.01	2	4	2	1	2	2	22	Inadmisible
E.01.02	2	4	2	1	2	2	22	Inadmisible
E.02.01	1	4	1	1	2	2	10	Aceptable
E.02.02	1	4	2	1	2	2	11	Aceptable
E.03.01	1	4	1	1	2	2	10	Aceptable
E.04.01	1	1	1	1	1	1	5	Aceptable
E.04.02	1	1	1	1	1	1	5	Aceptable
E.05.01	2	4	2	1	2	2	22	Inadmisible
E.05.02	2	4	2	1	2	2	22	Inadmisible
E.06.01	1	1	4	1	1	1	8	Inadmisible
E.07.01	1	1	2	1	1	2	7	Aceptable
E.07.02	1	4	2	1	1	2	10	Aceptable
E.08.01	2	3	1	1	1	1	14	Prioritaria
E.08.02	2	3	1	1	1	1	14	Prioritaria
E.09.01	1	4	2	1	2	2	11	Aceptable
E.09.02	1	4	2	1	2	1	10	Aceptable
E.09.03	1	4	1	1	2	2	10	Aceptable
E.10.01	2	4	1	1	2	2	20	Prioritaria
E.11.01	1	1	1	1	2	2	7	Aceptable
E.12.01	1	4	2	1	2	1	10	Aceptable
E.12.02	1	4	2	1	2	2	11	Aceptable

Nota. Elaboración propia.

3.5 Plan de mantenimiento

Definimos las modificaciones al plan de mantenimiento preventivo dependiendo del tipo de falla que hemos detectado en el apartado previo. Para ello revisamos lo indicado por el fabricante en su manual, donde indican las siguientes actividades:

- Diarias: Verificar alarmas, drenado de purga de condensado.
- Semanal: revisar el nivel de aceite, verificar fugas en los componentes.
- Trimestral: Limpieza de compresor, revisar enfriadores.

Adicionalmente se realiza el cambio de los siguientes componentes dependiendo de las horas de funcionamiento:

- 4000 horas: cambio de filtros y válvula antirretorno.
- 8000 horas: cambio de filtros, válvula antirretorno, válvula de regulación carga y llenado de lubricante.
- 16000 horas: Adicionalmente a mantenimiento de 8000 horas, se realiza el cambio de silenciadores, diafragma de válvulas, anillos para enfriadores, cambio de goma de acople de transmisión y reparación de la bomba de aceite.

Revisamos los componentes que presentan una falla inadmisibles y presentamos una actividad que evite o reduzca la probabilidad de falla. Primero revisamos los tipos de falla inadmisibles con una frecuencia mayor a 1, los cuales son presentados en la Tabla 23.

Tabla 23:

Actividades de mantenimiento para modos de falla inadmisibles con frecuencia mayor a 1

Componente	Cod. falla	Modo de falla	IC	Comentario	Actividad	Duración de la actividad (horas)
Tanque de almacenamiento de lubricante	B.06.02	Bajo nivel de aceite	33	Incremento de temperatura por bajo nivel	Llenado de aceite	1
Pre Inter enfriador	C.01.02	Desgaste, fisuras	33	Fuga en anillos	Cambio de anillos	4

Inter enfriador	C.02.02	Desgaste, fisuras	33	Fuga en anillos	anillos	4
Pre post enfriador	C.03.02	Desgaste, fisuras	33	Fuga en anillos	Cambio de anillos	4
Post enfriador	C.04.02	Desgaste, fisuras	33	Fuga en anillos	Cambio de anillos	4
Ventiladores	C.07.01	Detención de ventilador	30	Generado por acumulación de polvo en las aspas	Cambio de componente	4
Motor de ventilador	C.08.01	Trip por sobre corriente	30	Generado por desbalance de ventilador	Cambio de componente	4
Contactores	E.01.01	Falso contacto	22	Ajuste de terminales	Realizar ajuste de terminales durante paradas	0.5
Contactores	E.01.02	Cortocircuito	22	Cambio de componente	No se tiene histórico suficiente para el análisis	2
Arrancador	E.05.01	Cortocircuito	22	Cambio de componente	No se tiene histórico suficiente para el análisis	2
Arrancador	E.05.02	Falso contacto	22	Ajuste de terminales	Realizar ajuste de terminales durante paradas	0.5

Nota. Modos de falla con una frecuencia mayor a 1 por año. Fuente: Elaboración propia.

Para la falla B.06.02 se realizará un mantenimiento preventivo, realizando el llenado de aceite en los mantenimientos de 4000 horas y durante la inspección se realizará el registro del nivel, para tener una trazabilidad y determinar si hay fuga en el sistema de lubricación. Las fallas C.01.02, C.02.02, C.03.02 y C.04.02 ocurren por fuga de aire en los anillos de los enfriadores, se entiende que las condiciones ambientales no son las apropiadas para estos anillos y están fallando antes del tiempo estimado, para ello se realizará el cambio durante el mantenimiento de 8000 horas en lugar de 16000. La detención de los motor ventiladores por picos de amperaje causados por desbalance no es

atendida en los planes de mantenimiento existentes. Por ello se incluirá el cambio dichos componentes en el mantenimiento de 16000 horas y se cambia el ensamble completo motor con ventilador para reducir el tiempo de mantenimiento.

Respecto a los componentes eléctricos, no se tiene un histórico de fallas suficiente para determinar una frecuencia óptima de cambio de componentes, sin embargo, se sabe que los arrancadores fallaron pasando los 5 años de operación. Considerando que el mantenimiento mayor, denominado overhaul, de los equipos se recomienda realizarse a las 80000 horas o 10 años de operación, el cambio de los arrancadores a la mitad de su tiempo de vida se encuentra aceptable. Respecto a los contactores, su falla depende de la polución en el ambiente y la cantidad de activaciones que hayan realizado, se puede incluir en un plan de pruebas preventivas durante los mantenimientos de 4000 horas, sin embargo, mediante mantenimiento no se puede asegurar la eliminación de su método de falla. De acuerdo con lo indicado por la metodología, no se realizará una actividad específica y se debería considerar una modificación de ingeniería, como crear presión positiva dentro del tablero para reducir la polución.

Respecto a las fallas inadmisibles con frecuencia 1, se encuentra que los planes de mantenimiento actuales son óptimos para evitar un mantenimiento correctivo. Sin embargo, para las fallas A.02.03, A.03.03, B.04.03 y B.06.01 se realizarán inspecciones visuales y ensayos no destructivos durante los mantenimientos programados. La atención a las fallas inadmisibles A.04.02, B.05.01, y E.06.01 se encuentran en los planes de mantenimiento actuales.

A continuación, analizaremos las fallas con criticidad Urgente y una frecuencia mayor a 2. En la Tabla 24 presentamos la falla con la actividad correspondiente y la duración.

Tabla 24:*Actividades de mantenimiento para modos de falla urgentes con frecuencia mayor a 1*

Componente	Cod. falla	Modo de falla	IC	Comentario	Actividad	Duración de la actividad (horas)
Filtro de aceite	B.02.02	Saturación del filtro	16	Saturación prematura	Cambio de filtro	1
Pre inter enfriador	C.01.01	Corrosión	16	Presencia de óxido en la purga de agua	Cambio de enfriador	12
Inter enfriador	C.02.01	Corrosión	16	Presencia de óxido en la purga de agua	Cambio de enfriador	12
Pre post enfriador	C.03.01	Corrosión	16	Presencia de óxido en la purga de agua	Cambio de enfriador	12
Post enfriador	C.04.01	Corrosión	16	Presencia de óxido en la purga de agua	Cambio de enfriador	12
Ventiladores	C.07.02	Desbalance de ventilador	18	Debido a polución en aspas	Limpieza de aspas	1
Filtros	E.08.01	Desgaste del filtro	14	En el tablero eléctrico	Cambio de filtro	0.5
Filtros	E.08.02	Saturación del filtro	14	En el tablero eléctrico	Cambio de filtro	0.5
Sensores de presión	E.10.01	Degradación	20	Fallas en el sensor	No se tiene histórico suficiente para el análisis	2

Nota. Modos de falla con una frecuencia mayor a 1 por año. Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de la Tabla 24 encontramos la necesidad de incluir actividades simples como el cambio de filtros de aceite y de tablero, así como la limpieza de aspas de ventiladores. Actividades relacionadas a la contaminación del ambiente. Respecto a los enfriadores, el cambio de los componentes durante actividades de mantenimiento preventivo es inviable debido a la duración de la actividad; se recomienda el monitoreo de la condición y alargar la vida útil del componente hasta un mantenimiento mayor.

Respecto a los métodos de falla aceptables, no se realizarán modificaciones a los planes de mantenimiento.

3.6 Gestión de mantenimiento

Con la finalidad de no modificar las horas de intervención de los equipos, se ajustó el cambio de componentes de manera preventiva para componentes con criticidad elevada y que tenían una frecuencia entre intervenciones extensa o que su método de detección de falla no era sencillo.

En la Tabla 25 presentamos las modificaciones a los planes de mantenimiento existentes incluyendo actividades, duración, material y el costo aproximado.

Tabla 25:

Modificaciones a los planes de mantenimiento existentes

Plan de mantenimiento (horas)	Actividades incluidas	Duración (horas)	Material	Costo Adicional USD
4000	Llenado de aceite y registro de nivel	0.5	Grasa Roto Z	1000
4000	Cambio de filtro de aceite	0.5	Filtro de aceite	
4000	Ajuste de terminales Termografía a tablero	0.5	No requiere	
8000	Cambio de anillos en enfriadores Inspección de enfriadores	3	Anillos reten	1550
8000	Cambio de filtro de tablero eléctrico	0.5	Filtro rectangular	
16000	Cambio de 2 motor ventilador	6	Motor ventilador	3250
32000	Cambio de arrancadores	1	Arrancador suave	6000
Mensual No implica detención	Toma de muestra de aceite para análisis de lubricante	0.5	No requiere	-
Mensual No implica detención	Toma de muestra de agua de purgas de humedad	0.5	No requiere	-

Nota. Elaboración propia.

Es necesario indicar que los mantenimientos deben ser realizados por dos personas, por motivos de seguridad y para cumplir los tiempos de mantenimiento.

Respecto al abastecimiento de materiales para los mantenimientos preventivos, utilizamos la metodología JIT (justo a tiempo), la cual indica solicitar materiales para la fecha de ejecución de mantenimiento. En el caso de los compresores se solicitan los materiales con 4 meses de anticipación, ya que es el tiempo promedio de entrega del proveedor.

Para componentes con fallas tipo inadmisibles tenemos a los enfriadores, motor ventiladores, contactores y arrancadores, se siguen las siguientes estrategias:

- Componentes eléctricos: Se mantiene 1 en stock para atender emergencias, debido a lo errático de sus fallas y que no se tiene histórico para determinar una frecuencia de cambio.
- Enfriadores: Se solicita la compra del componente cuando se encuentre desgaste externo durante las inspecciones.
- Para los motor ventiladores: Se mantiene 2 unidades en taller, los cuales serán utilizados durante los mantenimientos de 16000 horas. Los ventiladores retirados se reparan y quedan como repuesto para el siguiente mantenimiento de compresor.

Gracias al cambio de forma preventiva de los componentes, se logra reducir el tiempo de detección de falla, tiempo de preparación de material y otros relacionados con el mantenimiento correctivo.

Procedemos a realizar el cálculo de la disponibilidad, utilizando la ecuación presentada en el Marco Teórico, tiempo medio entre fallas sobre la sumatoria del tiempo medio entre fallas y el tiempo medio de reparación. En la investigación, calcularemos la disponibilidad de forma teórica, tomando el histórico de fallas y retirando del cálculo los tiempos de reparación de los componentes a los cuales atendimos en los nuevos planes de mantenimiento. En la Tabla 26 se presentan los valores de MTBF, MTTR y disponibilidad obtenidos.

Tabla 26:*Cálculo de la disponibilidad para los compresores*

Compresor	MTBF	MTTR	Disponibilidad
ZT250/1	236.5	2.00	99.16%
ZT250/2	396	1.50	99.62%
ZT250/3	155	2.67	98.31%
ZT250/4	789	3.00	99.62%
ZT250/5	852	2.00	99.77%

Nota. Elaboración propia.

Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados

4.1 Resultados

Para el análisis, se dividió al compresor modelo ZT250 en 5 sistemas y 43 componentes. Se identifican 95 modos de falla para los componentes de los compresores, las cuales se clasifican en inadmisibles, prioritarias y aceptables. La cantidad de cada uno y el porcentaje que representan se encuentra en la Tabla 27.

Tabla 27:

Cantidad de fallas de acuerdo con su clasificación

Tipo de falla	Cantidad	Porcentaje
Inadmisible	19	20%
Prioritaria	9	9%
Aceptable	67	71%

Nota. Elaboración propia

Se encuentran 11 modos de falla inadmisibles en el histórico de fallas de los compresores. Estos modos de falla son atendidos tomando de base las preguntas 6 y 7 del RCM, proponiendo actividades de mantenimiento que sean añadidas al plan de mantenimiento actual, para minimizar el impacto en la operación. En la Tabla 28 presentamos las modificaciones principales a los planes de mantenimiento, las cuales representan un incremento de 19600 USD en las 32000 horas del ciclo de mantenimiento.

Tabla 28:

Modificatorias a los planes de mantenimiento

Plan de mantenimiento (horas)	Actividad adicional	Incremento de duración (horas)	Incremento de costo (USD)
4000	Llenado de aceite y registro de nivel Cambio de filtro de aceite Ajuste de terminales Termografía a tablero	1.5	1000
8000	Cambio de anillos en enfriadores Inspección de enfriadores Cambio de filtro de tablero eléctrico	3.5	1550

16000	Cambio de 2 motor ventilador	6	3250
32000	Cambio de arrancadores	1	6000

Nota. Elaboración propia

Mediante la implementación una gestión de mantenimiento basada en RCM, obtenemos un incremento en el MTTR, MBTF y disponibilidad de los compresores evaluados. En la Tabla 29 se presenta la variación de los indicadores MTTR y MTBF, encontrando una variación positiva.

Tabla 29:

Valores MTBF y MTTR inicial y final

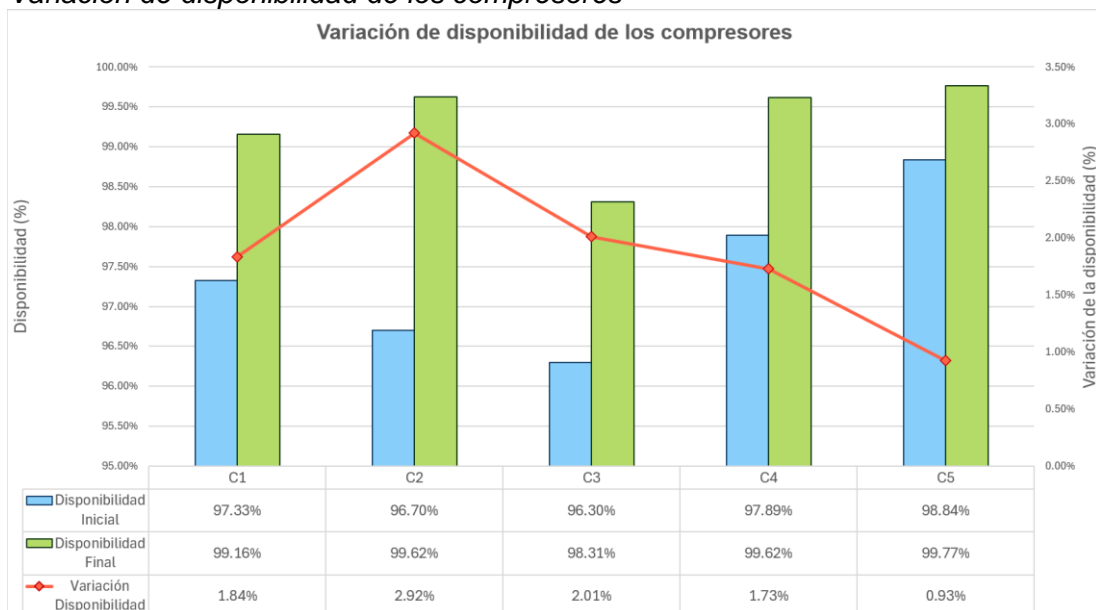
Compresor	MTBF Inicial (horas)	MTBF Final (horas)	MTTR Inicial (horas)	MTTR Final (horas)
C1	118.25	236.5	3.25	2.00
C2	99.00	396	3.38	1.50
C3	78.00	155	3.00	2.67
C4	157.80	789	3.40	3.00
C5	213.00	852	2.50	2.00

Nota. Elaboración propia

En la Figura 23 se presenta la disponibilidad inicial y final de cada uno de los compresores evaluados, así como la variación porcentual de la disponibilidad, encontrando un incremento en cada uno de los compresores.

Figura 23:

Variación de disponibilidad de los compresores



Nota. Elaboración propia

4.2 Contrastación de hipótesis

La hipótesis de la investigación es que una gestión de mantenimiento basada en RCM permite incrementar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025. Los datos encontrados en el apartado de resultados indican que la hipótesis es positiva, encontrando un incremento de disponibilidad promedio del 1.88% en los cinco compresores. El incremento del MTBF y la reducción del MTTR indican que las hipótesis específicas son positivas.

Los resultados obtenidos demuestran la relación entre los parámetros de operación y el mantenimiento de los equipos, validando lo encontrado por Arias y Chiroque (2021). Adicionalmente se confirma que el incremento de la disponibilidad viene asociado a un incremento del costo de mantenimiento.

Para obtener resultados positivos, es importante realizar un correcto análisis de modos de falla de los componentes y asignación de criticidad. El proceso puede ser iterativo en caso no se obtengan resultados positivos.

La confirmación de la hipótesis demuestra que una gestión de mantenimiento basado en RCM permite un incremento de disponibilidad de cinco compresores ZT250.

4.3 Discusión de resultados

Para obtener un incremento promedio del 1.88% de la disponibilidad se tomó de base el RCM. Para dar respuesta a las preguntas del RCM utilizamos la metodología AMEF, la cual permite responder las cinco primeras, de acuerdo con lo indicado por Odi-Owei, T. et al. (2023).

Respecto a la detección de fallas, no se consideró la instalación de instrumentación adicional a la que se entregó de proyecto. Si bien, el monitoreo por vibración sugerido por Patil y Qureshi (2023) permitiría detectar fallas en los ventiladores, la intervención a los equipos se realiza cada 4000 horas y se escoge el reemplazo de los equipos de forma preventiva durante uno de los mantenimientos programados.

El incremento de 1.88% en la disponibilidad obtenido mediante la propuesta de la gestión de mantenimiento, es similar a lo encontrado por Luna, J. (2019) que obtuvo un

incremento de 1.6% y Zhou, D. et al. (2021) que incrementó la disponibilidad en un 1.6% pero con un aumento del 0.6% en el costo del mantenimiento. En la investigación, el incremento de la disponibilidad requiere un incremento de 1.5, 3.5 y 6 horas en los mantenimientos preventivos y que los mantenimientos de 8000 horas y 16000 horas deben ser realizados por dos personas. También supone un incremento de 9800 USD en los mantenimientos preventivos en un periodo de 2 años.

Gracias a la investigación, se encuentra que el plan de mantenimiento sugerido por el fabricante es sólido, logrando una disponibilidad de 97.41% en promedio. Mientras que la aplicación de la gestión de mantenimiento logra una disponibilidad teórica de 99.30%. Es necesario verificar si el impacto en la falla de los compresores amerita el incremento del costo. Para el caso de estudio, considerando que una falla en los compresores implica la detención de los colectores de polvo, la justificación proviene de minimizar un impacto ambiental.

CONCLUSIONES

El uso del RCM y metodologías de evaluación de fallas como el AMEF en combinación, suponen un método exhaustivo para el análisis de fallas. Se utilizó una variante del RCM para agilizar el procesado de data, ya que es una de las debilidades de la metodología. El análisis únicamente en sistemas que presenten fallas, permite incrementar de manera rápida la disponibilidad, sin embargo, no se están considerando posibles métodos de falla importantes en los otros sistemas. La descomposición en sistemas y componentes mantenibles facilita el análisis de los métodos de falla, sus causas y métodos para detección.

Se determinan los materiales requeridos para las modificaciones en los mantenimientos. No se requiere cálculo de stock en almacén de los materiales, debido a que son requeridos de forma puntual para los mantenimientos. Los componentes con métodos de falla inadmisibles son requeridos de mantener 1 unidad en stock. Para ítems reparables, se tienen unidades de repuesto, las cuales agilizan la ejecución del mantenimiento.

Mediante la investigación se determina el incremento teórico de la disponibilidad en un 1.88% en promedio, pasando del 97.41% al 99.30%, asociado a un incremento de 4900 USD anuales en el mantenimiento preventivo y la necesidad de 2 personas por mantenimiento.

Se considera positiva la hipótesis y se aplicará la nueva gestión de mantenimiento a los compresores. La nueva disponibilidad evitará detenciones de los colectores de polvo, protegiendo el medio ambiente y asegurará el abastecimiento a la planta de producción, evitando detenciones por desabastecimiento de aire comprimido.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar nuevamente el análisis una vez aplicada la nueva gestión de mantenimiento, actualizando la tabla de criticidad de fallas, para ajustar la gestión de mantenimiento a las condiciones cambiantes de la planta.

Se recomienda la implementación de la presente gestión de mantenimiento en los compresores de la planta concentradora. Adicionalmente se sugiere replicar el estudio en la totalidad de la flota de compresores, gracias a sus resultados satisfactorios.

Durante el análisis de falla se encuentran fallas sin un método de detección ni estrategia de cambio adecuada. En estos casos se recomienda realizar modificaciones de ingeniería a los compresores para evitar las fallas.

Se recomienda comparar los pesos asignados en la tabla de criticidad de falla con otras empresas, para evaluar el impacto que tiene en la determinación de fallas y la modificación a la gestión de mantenimiento.

REFERENCIAS

- Alfaro Flores, W. R. (2019). *Gestión de mantenimiento basado en el riesgo para incrementar la confiabilidad de las máquinas de la empresa ZINSAC del Perú S.A.C.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstreams/dca52802-b492-4bce-9eab-9b5c3baf1e53/download>
- Arias Santillan, C. A., & Chiroque Sullon, P. M. (2021). *El mantenimiento preventivo y su relación en la confiabilidad de máquinas compresoras en la planta de Óxidos de Pasco S.A.C. Pasco 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Privada Telesup]. <https://repositorio.utelesup.edu.pe/bitstream/UTELESUP/2391/1/ARIAS%20SANTILLAN%20CESAR%20ALBERTO-CHIROQUE%20SULLON%20PERCY%20MANUEL.pdf>
- Atlas Copco Perú. (n.d.). *Ebook: Guía completa sobre compresores de aire*. Atlas Copco. Retrieved April 21, 2025, from <https://www.atlascopco.com/es-pe/compressors/guides-and-ebooks/guide-air-compressors>
- Bloch, H. P. (2006a). *A practical guide to compressor technology* (2.^a ed.). John Wiley & Sons. <http://bayanbox.ir/view/6712824880144571426/a-practical-guide-to-compressor-technology.pdf>
- Bloch, H. P. (2006b). *Compressors and Modern Process Applications*. John Wiley & Sons. <https://es.scribd.com/document/242742643/Compressor-and-Modern-Process-Application-Bloch-pdf>
- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach* (1.^a ed.). CRC Press LLC. <https://doi.org/10.1201/9781420031843>
- Dhillon, B. S., & Liu, Y. (2006). Human error in maintenance: A review. In *Journal of Quality in Maintenance Engineering* (Vol. 12, Issue 1). <https://doi.org/10.1108/13552510610654510>

- Fluke. (n.d.). *13 causas comunes del fallo del motor*. Fluke. Retrieved July 16, 2025, from <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/motores-accionamientos-bombas-compresores/13-causas-comunes-del-fallo-del-motor>
- García Garrido, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento: Manual práctico para la implantación de sistemas de gestión avanzados de mantenimiento industrial*. Ediciones Díaz de Santos.
- Gasca, M. C., Camargo, L. L., & Medina, B. (2017). Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial. *Información Tecnológica*, 28(4), 111–124. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000400014>
- Jurayev, R., Xatamova, D., & Pardayeva, S. (2023). Increasing the operating efficiency of mining compressor installations on the basis of improving the cooling, lubrication and air suction system. *E3S Web of Conferences*, 414. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341703016>
- Lorenzo, D. K. (1990). *A Manager's Guide to Reducing Human Errors: Improving Human Performance in the Chemical Industry*. Chemical Manufacturers Association. https://books.google.com.pe/books/about/A_Manager_s_Guide_to_Reducing_Human_Errors.html?id=vBZjHQAACAAJ&redir_esc=y
- Luna Turpo, J. P. (2019). *Implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad de compresores estacionarios a tornillo en Toquepala* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstreams/4814ec4b-cc3d-41bf-a4a1-f0e5a5c0abad/download>
- Murillo, W. (2021). *Análisis de Confiabilidad de Equipos Reliability Analysis - RAM*. https://www.pcmangement.es/editorial/management_sp/Manual%20ingeniero%20mantenimiento.pdf
- NMA Industrial Services. (n.d.). *Atlas Copco Oil Free Air Compressors Z160-250 Instructions Manual*. Scribd. Retrieved April 30, 2025, from <https://es.scribd.com/document/562007959/Z160-250-Instruction-Manual>

- Odi-Owei, T. M., Ofodu, J. C., Saturday, E. G., & Torbira, M. S. (2023). Reliability-Centered Maintenance Analysis on a Single-Stage Water-Cooled Oil-Injection Screw Compressor. *International Journal of Scientific Engineering and Science*, 7(12), 57–63. <http://ijses.com/wp-content/uploads/2023/12/96-IJSES-V7N11.pdf>
- Patil, R. S., & Qureshi, A. M. (2023). Condition monitoring of screw compressors and induction motors in a food processing industry. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 10(3), 451–454. <https://mail.irjet.net/archives/V10/i3/IRJET-V10I371.pdf>
- PCManagement. (2001). *Manual del ingeniero de mantenimiento: Gestión moderna del mantenimiento*. https://www.pcmmanagement.es/editorial/management_sp/Manual%20ingeniero%20mantenimiento.pdf
- Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An Evolutionary Perspective. *Springer Series in Reliability Engineering*, 8, 21–48. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_2
- Pipalia, V. F., Shukla, D. D., & Mehta, N. C. (2015). Investigation on reciprocating air compressors - A review. *International Journal of Recent Scientific Research*, 6(12), 7735–7739. https://www.researchgate.net/profile/Nirajkumar-Mehta/publication/293121333_INVESTIGATION_ON_RECIPROCATING_AIR_COMPRESSORS_-_A_REVIEW/links/5841167a08ae2d217560d33d/INVESTIGATION-ON-RECIPROCATING-AIR-COMPRESSORS-A-REVIEW.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn9
- Procil Sanchez, M. A. (2020). *Diseño e Implementación de un Sistema de monitoreo energético para red de aire comprimido en una planta industrial* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3771/Mijael%20Procil_Tesis_Titulo%20Profesional_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Salazar Crispín, G. T. (2024). *Plan de mantenimiento preventivo de la compresora Boge, que incida en la confiabilidad de la empresa Air Power Peru* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/11817/T010_70853719_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Săvescu, C., Petrescu, V., Comeagă, D., Vlăducă, I., Nechifor, C., & Niculescu, F. (2023). Vibration Analysis of a Twin-Screw Compressor as a potential source for Piezoelectric Energy Harvesting. *Rev. Roum. Sci. Techn.-Électrotechn. et Énerg*, 68(3), 253–258.
<https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2023.68.3.1>
- Shahrivar, A., & Abdolmaleki, A. R. (2005). Failure of a screw compressor shaft. *Engineering Failure Analysis*, 13(4), 698–704.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2004.10.021>
- Sollant Group. (2021). *6 Common Troubleshootings for Screw Air Compressors*.
<https://sollantcompressor.com/cscrew-air-compressors/>
- Soporte y Compañía. (2021). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*.
<https://soporteicia.com/system/files/articulos-pdf/rcm-articulo-mantenimiento-centrado-confiabilidad-03-dic-2021.pdf>
- Tecnología en Compresión de Occidente. (2024, April 19). *Principales Fallas en los Compresores de Tornillo Rotativo*. <https://tecencompresion.com/principales-fallas-en-los-compresores-de-tornillo-rotativo/>
- Torres, L. (2005). *Mantenimiento Su implementación y gestión* (2.^a ed.). Córdoba Universitatis.
https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/22146/mod_resource/content/1/01%20Leandro%20Torres%20-%20Mto.%20Implementaci%C3%B3n%20y%20Gesti%C3%B3n.rar?forcedownload=1
- Vibrant. (2024). *Screw Air Compressor in Coal Mining Industry*.
<https://www.vibmac.com/screw-air-compressor-in-coal-mining-industry/>

- Zhou, D., Huang, D., Jia, X., Li, T., Wang, C., Wang, D., & Ren, Y. (2021). Study on the maintenance scheduling model for compressor units of long-distance natural gas networks considering actual maintenance demands. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *94*, 104065. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104065>
- Zhou, Y., Song, Z., Zhao, H., & Mi, S. (2012). Vibration fault analysis in screw compressor and foundation. *Applied Mechanics and Materials*, *166–169*, 1072–1075. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.1072>

Anexos


	Pág.
ANEXO A: Matriz de Consistencia.....	1
ANEXO B: Ficha técnica de los compresores ZT250 Atlas Copco.....	2
ANEXO C: Histórico de fallas de compresores.	3

ANEXO A: Matriz de Consistencia.

Título: Propuesta de gestión de mantenimiento basada en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025						
LINEA DE INVESTIGACIÓN	PROBLEMA DE ESTUDIO	PROBLEMAS	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES Y DIMENSIONES	DISEÑO METODOLÓGICO
Gestión de Operación y sistemas de mantenimiento electromecánicos		Problema general: ¿En qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM permitirá mejorar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025?	Hipótesis general: Una gestión de mantenimiento basada en RCM permite incrementar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025	Objetivo general: Proponer una gestión de mantenimiento basada en RCM para mejorar la disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025	Variable independiente: Gestión de mantenimiento basada en RCM (cualitativo) Dimensiones: ▪ Frecuencia de mantenimiento (cuantitativo) ▪ Costo (cuantitativo)	Enfoque: Aplicado Tipo de Investigación: Aplicada Nivel de Investigación: Correlacional Métodos: Inductivo, histórico Población y Muestra:
		Objeto de estudio	Problemas específicos: ▪ ¿En qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM permitirá mejorar el tiempo de operación de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025? ▪ ¿En qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM permitirá reducir el tiempo de reparación de fallas de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025?	Hipótesis específicas: ▪ Una gestión de mantenimiento basada en RCM mejora significativamente el tiempo de operación de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025. ▪ Una gestión de mantenimiento basada en RCM reduce significativamente el tiempo de mantenimiento de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025.	Objetivos específicos: ▪ Analizar en qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM mejora el tiempo de operación de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025. ▪ Analizar en qué medida una gestión de mantenimiento basada en RCM reduce el tiempo de reparación de fallas de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025.	Variable dependiente: Disponibilidad (cuantitativo) Dimensiones: ▪ Tiempo de operación (cuantitativo) ▪ Tiempo de reparación de falla (cuantitativo)
Flota de compresores tipo tornillo	<i>Subóptima disponibilidad de una flota de compresores tipo tornillo de una planta concentradora minera en Tacna - Perú en 2025</i>					

Nota. Elaboración propia.

ANEXO B: Ficha técnica de los compresores ZT250 Atlas Copco.

COMPRESOR ATLAS COPCO ZT250		
Serie	Tag	
	ZT250/1	
		
Datos del compresor		
Marca	Atlas Copco	
Modelo	ZT250	
Tipo	Libre de aceite	
Refrigeración	Aire	
N° etapas	2	
Caudal de aire	1144.7	acfm
Presión de trabajo	9	bar
	131	psig
Datos del motor		
Marca	Siemens	
Modelo	1PC3004-3AB60-4JA1	
Potencia	231.2	kW
	310	hp
Voltaje	480 V	
Peso	8100 kg	
Eficiencia	95.2 %	
Datos de los ventiladores		
Cantidad	2	
Voltaje	480 V	
Comentarios		

Nota. Elaboración propia.

ANEXO C: Histórico de fallas de compresores.

Histórico de fallas de los cinco compresores ZT250 desde el 2023.

Fecha	Modelo	Sistema	Tiempo de parada (horas)	Evento
02/05/2025	ZT250/5	Lubricación	2	Fuga de aceite en carcaza
18/04/2025	ZT250/1	Enfriamiento	2	Óxido en enfriador
03/03/2025	ZT250/2	Lubricación	1	Fuga de aceite en carcaza
28/02/2025	ZT250/4	Eléctrico y control	3	Tablero contaminado
27/01/2025	ZT250/2	Lubricación	6	Deficiente lubricación
12/01/2025	ZT250/2	Lubricación	2	Válvula dañada
03/12/2024	ZT250/1	Lubricación	3	Deficiente lubricación
27/07/2024	ZT250/4	Enfriamiento	4	Motor ventilador desbalanceado
18/05/2024	ZT250/1	Lubricación	2	Sensor de presión dañado
13/05/2024	ZT250/1	Eléctrico y control	6	Contactador principal dañado
09/05/2024	ZT250/5	Eléctrico y control	2	Tablero contaminado
29/04/2024	ZT250/2	Enfriamiento	4	Motor ventilador desbalanceado
16/04/2024	ZT250/2	Eléctrico y control	2	Sensor de presión dañado
16/04/2024	ZT250/2	Eléctrico y control	4	Contactador principal dañado
15/04/2024	ZT250/2	Enfriamiento	4	Motor ventilador desbalanceado
13/04/2024	ZT250/3	Enfriamiento	4	Motor ventilador desbalanceado
10/04/2024	ZT250/3	Eléctrico y control	2	Sensor de presión obstruido
23/01/2024	ZT250/3	Enfriamiento	3	Purga obstruida
04/12/2023	ZT250/5	Eléctrico y control	2	Contactador principal dañado
01/06/2023	ZT250/5	Enfriamiento	4	Motor ventilador desbalanceado
07/05/2023	ZT250/3	Enfriamiento	4	Añillos de intercambiador resecos
06/05/2023	ZT250/3	Lubricación	2	Filtro saturado
24/04/2023	ZT250/2	Enfriamiento	4	Añillos de intercambiador resecos
28/03/2023	ZT250/4	Enfriamiento	4	Añillos de intercambiador resecos
22/03/2023	ZT250/4	Lubricación	2	Filtro saturado

06/03/2023	ZT250/3	Lubricación	3	Válvula de precarga dañada
18/02/2023	ZT250/4	Enfriamiento	4	Motor ventilador desbalanceado

Nota. Elaboración propia.