

Aplicación del modelo RCM en la implementación de mantenimiento preventivo
en sistemas de transporte neumático fabricados por la empresa DAYOZ®.

Cristhian Camilo Paez Rozo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Octavio Andrés González Estrada

Doctor en ingeniería mecánica y materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional, sus enseñanzas y el sacrificio constante que me permitió llegar hasta aquí.

A mi hermana, por su compañía, apoyo y por ser siempre una fuente de ánimo en los momentos difíciles.

A mi esposa, por su amor, paciencia y comprensión infinita, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por ser mi compañera en cada paso de este camino.

A mi hijo, quien es mi mayor inspiración, el motor que me impulsa a ser mejor cada día y a luchar por un futuro lleno de oportunidades.

finalmente, gracias a mis suegros por ser parte esencial de este logro.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por brindarme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar con éxito esta importante etapa.

A Dayoz ®, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, así como por el apoyo y los conocimientos adquiridos durante el tiempo que formé parte de su equipo de trabajo, los cuales fueron fundamentales para la realización de esta monografía.

A la UIS, por su formación académica, por los conocimientos impartidos y por proporcionar las herramientas necesarias para mi crecimiento profesional.

A mis docentes y compañeros de especialización, por su orientación, conocimientos y valioso acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este trabajo, les expreso mi más profundo agradecimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
2.Objetivos.....	18
2.1.Objetivo General	18
2.2.Objetivos Específicos.....	18
3.Planteamiento del problema.....	19
4.Marco Teórico.....	19
4.1.Marco Conceptual	21
4.2.Marco legal	23
5.Metodología	23
5.1.Recolección de la información.....	23
5.2.Análisis de la información	24
5.3.Aplicación de la metodología RCM	24
5.4.Diseño y evaluación del plan de mantenimiento preventivo	25
6.Desarrollo de la metodología.....	25
6.1.Antecedentes	26
6.1.1.Modos de falla.....	28
6.1.2.Fallas mecánicas	29
6.1.2.1.Tipos de fallas mecánicas	29
6.1.2.2.Fallas térmicas	29
6.1.2.3.Tipos de fallas térmicas	30
6.1.3.Fallas por proceso	30

6.1.3.1.Tipos de fallas por proceso	30
6.1.4.Falla operativa.....	30
6.1.4.1.Tipos de fallas por operación.....	31
6.1.5.Falla funcional	31
6.1.5.1.Tipos de fallas funcionales.....	31
7.Recolección de la información.....	31
7.1.Organización de la DATA.	33
7.2.Análisis de los datos.....	36
8.Diseño del plan de mantenimiento preventivo bajo la metodología RCM.....	54
8.1.Fallas tempranas $\beta < 1$	55
8.1.1.Cronograma de actividades de mantenimiento clientes 2, 4 y 5.....	57
8.1.2.Conclusiones	60
8.2.Desgaste moderado $1 < \beta < 3$	60
8.2.1.Cronograma de actividades de mantenimiento clientes 1 y 7.....	61
8.2.2.Conclusiones	63
8.3.Desgaste severo $\beta \geq 3$	64
8.3.1.Cronograma de actividades cliente 3.	65
8.3.2.Conclusiones	66
8.3.3.Cronograma de Actividades cliente 6	67
8.3.4.Conclusiones	69
9.Matriz de ocurrencias.....	70
9.1.Explicación de las Matrices de ocurrencias.	71
9.1.1.Nivel 1 – Muy Baja Ocurrencia	71

9.1.2.Nivel 2 – Baja ocurrencia	72
9.1.3.Nivel 3 – Ocurrencia media	72
9.1.4.Nivel 4 – Alta ocurrencia	72
9.1.5.Nivel 5 – Muy alta ocurrencia	73
9.2.Conclusiones	73
9.3.Análisis AMFE	74
10.Matriz RCM bombas de vacío	75
11.Análisis económico estructurado de la propuesta del RCM	77
11.1.Evaluación del riesgo económico	78
12.Conclusiones	81
13.Recomendaciones	83

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Registro de llamadas de los clientes.	32
Tabla 2 Data del Cliente 1	33
Tabla 3 Datos del Cliente 2.....	33
Tabla 4 Datos del Cliente 3.....	34
Tabla 5 Datos del cliente 4.....	34
Tabla 6 Datos del cliente 5.....	34
Tabla 7 Datos del cliente 6.....	35
Tabla 8 Datos del cliente 7.....	35
Tabla 9 Datos del cliente 1, organizados en un histograma.....	36
Tabla 10 Datos del cliente 2, organizados en un histograma.....	39
Tabla 11 Datos del cliente 3, organizados en un histograma.....	42
Tabla 12 Datos del cliente 4, organizados en un histograma.....	44
Tabla 13 Datos del cliente 5, organizados en un histograma.....	47
Tabla 14 Datos del cliente 6, organizados en un histograma.....	49
Tabla 15 Datos del cliente 7, organizados en un histograma.....	52
Tabla 16 Escala de ocurrencias.....	70
Tabla 17 Ocurrencias asignadas a los valores beta.....	70
Tabla 18 Ocurrencias asignadas a los clientes.....	71
Tabla 19 Matriz AMFE Sistemas de transporte neumáticos/bomba de vacío.	74
Tabla 20 Matriz RCM – Bombas de Vacio con nivel de riesgo	75
Tabla 21 Matriz RCM – complemento interpretación nivel del riesgo	76

Tabla 22 Costo sin RCM y con RCM Propuesto	77
--	----

Tabla 23 Costos beneficio.....	78
--------------------------------	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Bomba de vacío por lóbulos. DAYOZ® DZ-3000-3	27
Figura 2 Bomba de vacío regenerativa.	27
Figura 3 Bomba de vacío Venturi DZ-1000-2	28
Figura 4 Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 9.	37
Figura 5 Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 10.	39
Figura 6 Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 11.	42
Figura 7 Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 12.	45
Figura 8 Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 13.	47
Figura 9 Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 14.	50
Figura 10 Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 15.	52
Figura 11 Cronograma de actividades diarias para cliente 2, 4 y 5. Arranque	57
Figura 12 Cronograma de actividades semanales para cliente 2, 4 y 5. Estabilización.....	58
Figura 13 Cronograma de actividades mensual para cliente 2, 4 y 5. Operación controlada	59
Figura 14 Cronograma de actividades semestral para cliente 2, 4 y 5. Régimen normal	60
Figura 15 Cronograma de actividades mensual para clientes 1 y 7, Control Inicial	62
Figura 16 Cronograma de actividades semestral para cliente 1 y 7, Seguimiento de desgaste	62
Figura 17 Cronograma de actividades anual para cliente 1 y 7, Operación optimizada.....	63
Figura 18 Cronograma de actividades por horas para cliente 3, Hard Time	65
Figura 19 Cronograma de actividades semanales para cliente 3, Basado en condición	66
Figura 20 Cronograma de actividades semanales para cliente 6, Monitoreo intensivo.....	68
Figura 21 Cronograma de actividades semanales para cliente 6, Control de degradación.....	68

Figura 22 Cronograma de actividades semanales para cliente 6, Intervención programada 69

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Datos de fallas.

Apéndice B. Análisis Weibull.

Apéndice C. Matriz de ocurrencia.

Apéndice D. Matriz AMFE.

Apéndice E. Matriz RCM.

Apéndice F. Cronogramas de mantenimiento.

Glosario

AMFE (Análisis de Modos y Efectos de Falla): Herramienta que permite identificar, analizar y priorizar los modos de falla, sus efectos y causas, con el fin de definir acciones de mantenimiento.

Confiabilidad: probabilidad de que un sistema o componente, para cumplir la función requerida bajo condiciones específicas durante un periodo determinado.

Consecuencia de falla: impacto que genera la falla en términos operativos, económicos, ambientales o de seguridad.

Consecuencias: indicador que mide el impacto o severidad de un modo de falla.

Cronograma de Mantenimiento: planificación de actividades en función del tiempo, condición o vida útil de los equipos.

Desgaste: proceso de deterioro progresivo de los componentes debido al uso y condiciones de operación.

Distribución de Weibull: modelo estadístico utilizados para analizar el comportamiento de fallas en el tiempo, permitiendo identificar patrones como fallas tempranas, aleatorias y por desgaste.

Efecto de falla: consecuencia inmediata que se presenta cuando ocurre un modo de falla en el sistema.

Falla funcional: incapacidad de un sistema o componente para cumplir con la función requerida bajo condiciones operativas establecidas.

Fatiga: daño acumulativo en los materiales causado por esfuerzos cíclicos repetidos.

Mantenimiento correctivo: acciones realizadas después de que ocurre una falla para restaurar la funcionalidad del equipo.

Mantenimiento predictivo: estrategia basada en el monitoreo de condición del equipo para anticipar las fallas y actuar antes de que ocurran.

Mantenimiento Preventivo: conjunto de actividades que se realizan antes de que ocurran una falla para reducir su probabilidad.

Mantenimiento proactivo: enfoque orientado a eliminar las causas raíz de las fallas, evitando su recurrencia.

Modo de falla: forma específica en la que ocurre una falla, describiendo la causa técnica que origina la pérdida de la función.

Monitoreo de condición: seguimiento continuo de variables como vibración, temperatura o presión para detectar fallas.

Nivel de riesgo (O x C): indicador que combina la ocurrencia y la consecuencia para determinar la criticidad de un modo de falla y priorizar acciones de mantenimiento.

Ocurrencia: indicador que presenta la frecuencia con la que ocurre un modo de falla.

Parámetro β (beta): parámetro de forma de la distribución de Weibull que indica el tipo de comportamiento de falla de un equipo ($\beta < 1$: fallas tempranas, $\beta \approx 1$: aleatorias, $\beta > 1$: desgaste).

Parámetro η (eta): Parámetro de escala de la distribución de Weibull que representa la vida característica del equipo, es decir, el tiempo en el cual aproximadamente el 63,2% de los elementos han fallado.

RCM (Reability Centered Maintenance): metodología de mantenimiento orientada a organizar que los sistemas cumplan funciones mediante la identificación de fallas, sus causas y la definición de estrategias optimas de mantenimiento.

Sistema de transporte neumático: Sistema que usa aire a presión o vacío para transportar materiales a través de tuberías.

Resumen

Título: Aplicación del modelo RCM en la implementación de mantenimiento preventivo en sistemas de transporte neumático fabricados por la empresa DAYOZ®.*

Autor: Cristhian Camilo Paez Rozo**

Palabras Clave: MTBF, MTTR, RCM, WUEIBULL, Transporte neumático, AMFE

Descripción: Esta monografía desarrolla la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM, en sistemas de transporte neumático, específicamente en las bombas generadoras de vacío o presión según la aplicación, con el propósito de mejorar la confiabilidad operativa, reducir la ocurrencia de fallas y optimizar la gestión del mantenimiento. Para ello, se empleó un análisis de confiabilidad basado en la distribución de Weibull, el cual permitió, caracterizar el comportamiento de la falla de los equipos mediante el parámetro β , clasificando los modos de fallas tempranas, aleatorias y por desgaste.

Adicionalmente, se desarrolló una matriz de ocurrencia para cuantificar la frecuencia de las fallas, la cual, junto con el análisis de consecuencias, permitió determinar el nivel de riesgo mediante el indicador O x C, facilitando la priorización de los modos de fallas más críticos.

Como resultado, se definieron estrategias de mantenimiento basadas en RCM, incluyendo enfoques proactivos, preventivos y predictivos, así como reemplazos programados para condiciones de desgaste severo. Finalmente, se establecieron cronogramas de mantenimiento adaptados, tanto tradicionales como dinámicos basados en condición y vida útil, logrando una gestión más eficiente y orientada a la confiabilidad de activos.

* Degree Work

** School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Advisor: Octavio Andrés González Estrada, Doctor en ingeniería mecánica y materiales.

Abstract

Title: Application of the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Model for the Implementation of Preventive Maintenance in Pneumatic Transport Systems Manufactured by DAYOZ®*

Author(s): Cristhian Camilo Paez Rozo**

Key Words: MTBF, MTTR, RCM, WUEIBULL, Pneumatic Transport, AMFE

Description: This monograph explores the application of Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology to pneumatic conveying systems, specifically vacuum or pressure pumps depending on the application, with the aim of improving operational reliability, reducing failure rates, and optimizing maintenance management. To achieve this, a reliability analysis based on the Weibull distribution was employed. This analysis allowed for the characterization of equipment failure behavior using the β parameter, classifying failure modes as early, random, and due to wear. Additionally,

an occurrence matrix was developed to quantify failure frequency. This matrix, along with consequence analysis, enabled the determination of risk levels using the O x C indicator, facilitating the prioritization of the most critical failure modes.

As a result, RCM-based maintenance strategies were defined, including proactive, preventive, and predictive approaches, as well as scheduled replacements for severe wear conditions. Finally, adapted maintenance schedules were established, both traditional and dynamic based on condition and useful life, achieving more efficient management and oriented towards asset reliability.

* Degree Work

**School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Advisor: Octavio Andrés González Estrada, Doctor en ingeniería mecánica y materiales.

Introducción

En la actualidad, los sistemas de transporte neumático en plantas de producción, presentan una notable ausencia de planes de mantenimiento; esto conlleva a que las empresas desarrollen una cultura y una gestión reactiva, donde los equipos que componen los sistemas de transporte neumático son llevados a falla recurriendo con frecuencia al mantenimiento correctivo. Se resalta que algunas organizaciones implementan contingencias para este tipo de mantenimiento, ya que demanda tiempos prolongados de intervención, lo que impacta directamente operatividad de las líneas de producción.

De acuerdo a la información adquirida uno de los factores que agravan esta problemática, es la falta de planeación integrada entre mantenimiento y producción, sumado al desconocimiento técnico sobre los equipos que componen un sistema de transporte neumático tales como sopladores, motores eléctricos, válvulas, sensores, actuadores, tuberías y sistemas de control; esta brecha técnica impide establecer políticas de mantenimiento enfocadas en la seguridad y la prolongación de la vida útil de los activos.

En gran parte del territorio nacional, es notable que los sistemas de transporte neumático cuentan con ausencia de planes de mantenimiento preventivo, lo cual ocasiona paradas prolongadas que afectan económicamente la organización como en algunos casos extremos, la carencia de estos planes de mantenimiento puede derivar en pérdidas de contratos con clientes multinacionales, comprometiendo la reputación y competitividad de las organizaciones.

El implementar un plan de mantenimiento preventivo, permite forjar una planeación con el fin de reducir las paradas imprevistas, mejorando la seguridad operativa; esto facilita la sincronización con los ciclos productivos, optimizando recursos y minimizando riesgos.

Basándonos en el modelo de (RCM), DAYOZ® propone una metodología que permita a las organizaciones definir políticas de mantenimiento alineadas con la criticidad de sus activos; este modelo permite identificar funciones, modos de falla y consecuencias operativas, con antelación, para definir y realizar una planeación de actividades de mantenimiento que aseguren la capacidad operativa de los sistemas de transporte neumático, minimizando costos y riesgos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo bajo la metodología RCM, que permita la reducción de paros imprevistos y los repetitivos mantenimientos correctivos en los sistemas de transporte neumático DAYOZ, incrementando su confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa.

2.2. Objetivos Específicos

Realizar una valoración en los sistemas de transporte neumático DAYOZ, recurriendo a los historiales de fallas presentadas y mantenimientos realizados, con el fin de identificar las principales causas que llevan a la falla, paros imprevistos y mantenimientos correctivos.

Diseñar un plan de mantenimiento de acuerdo a los resultados arrojados del análisis realizado en el RCM, estableciendo frecuencias y procedimientos optimizando la disponibilidad y la vida útil del activo.

Evaluar la eficiencia de el plan de mantenimiento preventivo que se implementó, ayudados por el análisis y seguimiento de los indicadores de gestión como (MTTR, MTBF y disponibilidad), para medir el impacto que este plan ha tenido en la eficiencia operativa de los sistemas de transporte neumático.

3. Planteamiento del problema

DAYOZ, es una empresa dedicada a la fabricación de sistemas de transporte neumático por vacío o por presión, en fase densa o fase diluida, con más de 20 años de ser constituida. Uno de los principales problemas en los sistemas de transporte neumático es la carencia del mantenimiento preventivo, esto se evidencia en un 95% de todos los clientes, debido a que las organizaciones no dimensionan el nivel de criticidad de los sistemas de transporte neumático en sus líneas de producción y/o poco conocimiento técnico en este método de transporte de materias primas a pesar de que se realizan capacitaciones; esto hace que la mayoría de sistemas los dejen ir a falla o manejen el correctivo. Por eso se ha tomado la iniciativa de realizar la venta de planes de mantenimiento preventivo aplicando la metodología del RCM.

Idea de investigación – problema

El alto volumen de llamadas de los clientes durante lo transcurrido del año, por paradas de los sistemas de transporte neumático, ya sea por filtros, el blower o el daño en alguno de sus instrumentos de control (válvulas, presostatos y componentes eléctricos).

Pregunta de investigación

¿Cómo puede la metodología RCM aplicada en planes de mantenimiento preventivo implementados por DAYOZ, contribuir a la reducción de paros imprevistos y mantenimientos correctivos en los sistemas de transporte neumático?

4. Marco Teórico

En la presente investigación se adoptan enfoques contemporáneos de la gestión del mantenimiento industrial, con énfasis en estrategias preventivas y basadas en confiabilidad, como fundamento para el diseño de planes de mantenimiento aplicados a sistemas de transporte

neumático. “En este contexto, la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) se posiciona como una herramienta clave para la toma de decisiones en la gestión de activos” (Moubray, 1997).

“El RCM propone una estrategia sistemática orientada a identificar las funciones críticas de los sistemas, analizar las fallas funcionales y evaluar los modos y efectos de falla, permitiendo establecer tareas de mantenimiento alineadas con la criticidad y el impacto operativos de los equipos” (SAE Internacional, 2009).

“Este enfoque facilita la optimización de recursos, la priorización de intervenciones y la reducción de fallas no planificadas, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa” (Smith & Hawkins, 2004).

“Adicionalmente, estudios recientes en el área de mantenimiento industrial han evidenciado la evolución del RCM hacia enfoques más integrados con mantenimiento predictivo y analítica de datos, fortaleciendo la toma de decisiones basada en condición y el incremento de la confiabilidad operativa” (Lee et al. 2014; Carvalho et al., 2019).

Estas tendencias permiten mejorar indicadores clave como la disponibilidad, el tiempo medio entre falla (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), consolidando modelos de mantenimiento más proactivos y eficientes.

En este sentido, la aplicación del RCM en sistemas de transporte neumático representa una oportunidad para estructurar planes de mantenimientos más eficientes, orientados a garantizar la seguridad, la disponibilidad y continuidad operativa de los activos, contribuyendo a la mejora continua de los procesos industriales.

4.1. Marco Conceptual

Este proyecto tiene su fundamentado en función de los conceptos esenciales de la ingeniería de mantenimiento, los cuales están orientados a la mejora de la confiabilidad y la disponibilidad de los sistemas de transporte neumático, los principales conceptos que enmarcan la investigación son los siguientes:

- Mantenimiento

Este se define como, la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante un ciclo de vida de un activo, destinadas a mantenerlo o devolverlo a un estado en el que pueda realizar la función requerida. ¹

- Mantenimiento Correctivo

Este es el que se ejecuta una vez ocurre la falla; su objetivo es la restauración del equipo, aunque en algunos casos es necesario, su uso permanente indica una gestión reactiva, generando así paros no programados impactando los costos que este tipo de mantenimiento demanda.

- Mantenimiento preventivo

Corresponde a las actividades planeadas que se ejecutan en ciertos tiempos programados bajo los criterios establecidos con el fin de reducir las probabilidades de fallas o el mal desempeño de un activo; este tipo de mantenimiento busca anticiparse a la ocurrencia de alguna falla mediante inspecciones, limpieza, lubricación y cambio de partes mantenibles programadas, mejorando así la confiabilidad y prolongando la vida útil de los equipos.

- Mantenimiento centrado en confiabilidad

¹AENOR. (2018). *UNE-EN 13306:2018. Mantenimiento. Terminología de mantenimiento*. Asociación Española de Normalización.

Este es un proceso que ayuda a las organizaciones a optimizar sus actividades de mantenimiento y mejorar la confiabilidad de los equipos, el RCM debe ser parte esencial de la estrategia de mantenimiento de cualquier organización ya que esta puede ayudar a reducir tiempos de inactividad, mejorar la seguridad y prolongar el ciclo de vida de los activos.

El proceso RCM incluye la identificación de funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos y consecuencias, para luego definir la estrategia de mantenimiento preventivo.

Indicadores de gestión

Estos ayudan a evaluar la efectividad del plan de mantenimiento implementado los más relevantes son:

- MTBF
- MTTR
- Disponibilidad

Estos indicadores permitirán medir la eficiencia de las estrategias del mantenimiento y su impacto en la continuidad operacional.

Sistemas de transporte neumático

Es un conjunto de equipos diseñados para transportar materias primas en polvo, granos o pellets; desde un origen a un destino.

Sus componentes principales incluyen blowers, motores eléctricos, válvulas, tuberías, filtros sensores y PLC.

RCM aplicado a los sistemas de transporte neumático

La aplicación de esta metodología en los sistemas de transporte neumático permite identificar la criticidad de los equipos y partes que son esenciales para el funcionamiento de este, para así establecer tareas de mantenimiento preventivo y minimizar paradas no programadas.

4.2. Marco legal

Las normas que respaldan esta monografía se componen de normas nacionales y normas de alto nivel, las cuales están basadas en seguridad de la operación, confiabilidad, gestión de los activos y gestión de la calidad; para la metodología RCM podemos encontrar normas que respaldan esta metodología las cuales son: ISO 5500, ISO 9001:2015, ISO 45001, ISO 14224 (análisis de datos) y La ISO 31000 (Evaluación de la criticidad y fallas). Por lo anterior, la monografía se encuentra vinculada de manera directa e indirecta a las normas nombradas anteriormente, para así garantizar la calidad en el desarrollo de los planes de mantenimiento preventivo con la metodología RCM.

5. Metodología

5.1. Recolección de la información

Histórico de mantenimientos correctivos realizados a los sistemas de transporte neumático de DAYOZ y a las solicitudes realizadas por los clientes en los últimos 2 años, ya sea por correo o por llamadas o vía WhatsApp.

Los datos deben incluir:

- fecha de la solicitud
- fecha fin de servicio
- Equipo y componente que fallo de este

- Costo del mantenimiento

5.2. Análisis de la información

Análisis estadístico Descriptivo

En este análisis se calcularán promedios, frecuencias, porcentajes y el comportamiento mediante una tendencia la cual nos mostraran su comportamiento futuro y así se podrá realizar la planeación bajo parámetros más técnicos e información que sustente el porqué de la ejecución del plan de mantenimiento preventivo bajo la metodología RCM.

Emplearemos gráficos de Pareto con el fin de identificar el nivel de criticidad de los equipos este apoyado también mediante el modelo de WUEIBULL.

5.3. Aplicación de la metodología RCM

De acuerdo a los resultados obtenidos con los análisis y graficas, aplicamos el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) a los equipos que de acuerdo a los resultados sean considerados críticos; para la implementación del modelo RCM se deben de tener en cuanto estos principales resultados arrojados por el análisis:

- Descripción de las funciones y las fallas de estas
- Identificación de los efectos y modos de falla (AMEF)
- Estimación de los efectos de las fallas
- Selección de actividades preventivas

Se tiene como fin la determinación de acciones más efectivas para la prevención de fallas y mantener un índice de confiabilidad alto de los equipos de los sistemas de transporte neumático.

5.4. Diseño y evaluación del plan de mantenimiento preventivo

En esta parte de la etapa 2, se realizará el plan de mantenimiento preventivo, teniendo en cuenta los siguiente:

- Tareas específicas de mantenimiento
- Frecuencia de la intervención
- Recursos, actividades ejecutadas y procedimiento
- Cronogramas

Una vez establecido lo anterior se realizará una evaluación de que sea efectivo este plan mediante los siguientes indicadores de gestión:

- MTTR
- MTBF
- Disponibilidad (%)

Estos resultados serán comparados, para así determinar que se hallan reducido de alguna manera las fallas y los paros imprevistos.

6. Desarrollo de la metodología

Se hace la valoración a 7 clientes de la empresa DAYOZ®, en donde se ha realizado montaje e instalación de sistemas de transporte neumático, estos clientes son los que durante los últimos 2 años han realizado llamadas y/o enviado mensajes, al área de técnica y de mantenimiento, en los cuales manifiestan que el sistema ha presentado fallas, una vez se realiza la respectiva inspección a los diferentes clientes en épocas diferentes, las conclusiones indican que del 100% de los clientes la bomba de vacío es la que más presenta falla debido a un sobre esfuerzo de esta puesto a que manifiestan que la productividad se ha aumentado notablemente, esto hace

que los sistemas estén trabajando por encima del nominal recomendado, afectando el principal equipo considerado crítico el cual es la bomba de vacío, ya que sin esta no se puede generar ningún tipo de transporte y el sistema queda disfuncional; por lo cual concluimos que el equipo de mayor criticidad es la bomba, la cual por falta de conocimiento de los clientes la sobre esfuerzan y generan acciones correctiva, adicional que la mayoría de los productos transportados generan una emisión que polución y es altamente abrasivo.

6.1. Antecedentes

A nivel nacional, los sistemas de transporte neumático han sido implementados ampliamente en la industria alimenticia, farmacéutica, cementera y minera, debido a que por medio de este se optimizan procesos en el manejo de materiales a granel. A pesar de su notable ventaja operativa, se ha evidenciado que el mantenimiento hacia estos sistemas es deficiente.

Esto debido a la poca cultura de mantenimiento preventivo y predictivo en la mayoría de compañías clientes de DAYOZ®, en donde la gran mayoría un 95% operan los sistemas de transporte neumático hasta el fallo, lo cual afecta la producción programada y ocasionando una tendencia negativa en los indicadores de producción.

Otro de los factores que es muy notable es la escasa o nula implementación de un programa estructurado de mantenimiento centrado en confiabilidad, esto hace que el riesgo de mantenimiento correctivo sea frecuente en las compañías.

En consecuencia, con lo descrito en los anteriores párrafos se debe fortalecer el mantenimiento mediante enfoques modernos que contemplen, monitoreos planificación y mejora continua.

El equipo que es considerado critico dentro de un sistema de transporte neumático es la bomba de vacío, ya sea lobular o de lóbulos, regenerativa y/o Venturi.

Figura 1 *Bomba de vacío por lóbulos.*

Bomba de vacío por lóbulos. DAYOZ® DZ-3000-3



Nota. Bomba generadora de vacío mediante transmisión por correas para transporte neumático; utilizada para grandes volúmenes de material o baches de toneladas y grandes distancias.

Fuente. Propia.

Figura 2 *Bomba de vacío regenerativa.*

Bomba de vacío regenerativa.

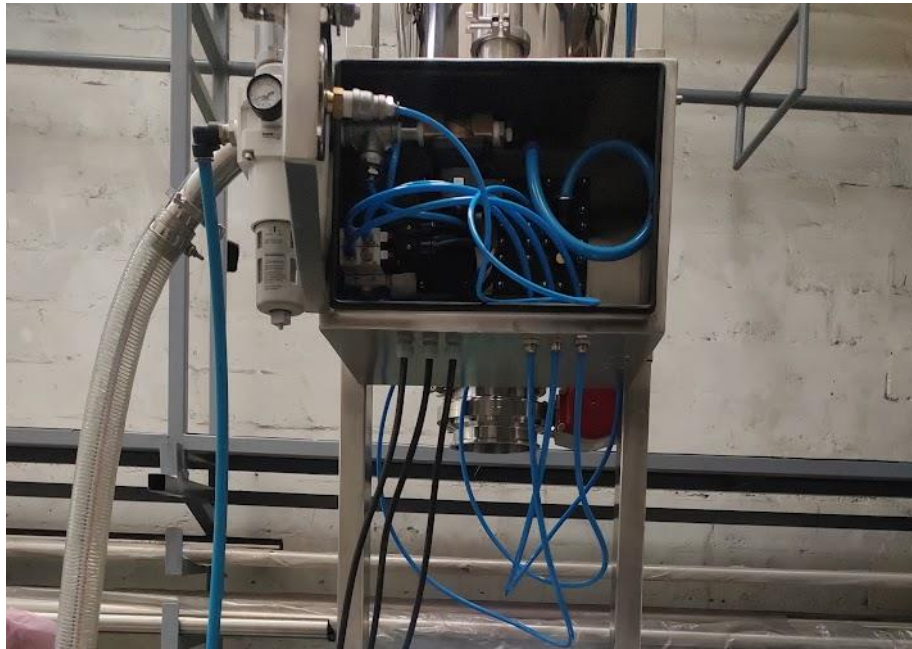


Nota. Bomba generadora de vacío por medio una turbina única al eje del motor; usada para medianos volúmenes de material.

Fuente. Catalogo técnico SAE ingeniería -Bombas Vacio – alta eficiencia.

Figura 3 *Bomba de vacío Venturi DZ-1000-2*

Bomba de vacío Venturi DZ-1000-2



Nota. Bomba generadora de vacío Venturi, usa el aire a presión para que genere vacío.
Fuente. Propia.

6.1.1. Modos de falla

En los sistemas de transporte neumático el equipo más crítico es la bomba y los modos de falla de este siempre va ligado a desgaste de rodamientos por falta de lubricación, dentro de los varios modos de fallas tenemos fallas mecánicas, fallas térmicas, fallas por proceso, fallas operacionales, fallas por mantenimiento y fallas por entorno.

6.1.2. Fallas mecánicas

“Falla mecánica se define como la pérdida total o parcial de la capacidad de un componente o sistema para cumplir su función, como resultado de la degradación física de sus elementos debido a fenómenos tales como desgaste, fatiga, deformación o sobre carga” (ISO, 2017).

6.1.2.1. Tipos de fallas mecánicas

- Desgaste
- Fatiga
- Deformación pastica
- Fractura
- Corrosión
- Erosión

6.1.2.2. Fallas térmicas

- Desgaste de rodamientos
- Desalineación de ejes
- Fatiga de componentes
- Holguras excesivas
- Rotura de sellos

“Falla térmica se define como la pérdida total o parcial de la funcionalidad de un componente o sistema debido a la exposición a temperaturas superiores a los límites de diseño, lo

que genera degradación de materiales, pérdida de propiedades mecánicas y deterioro del desempeño operativo” (ISO, 2017).

6.1.2.3. Tipos de fallas térmicas

- Fricción excesiva
- Sobre carga
- Fallas en disipación térmica.

6.1.3. *Fallas por proceso*

“La falla por proceso se refiere a la alteración o interrupción del funcionamiento de un sistema debido a desviaciones en las variables del proceso, como presión, caudal o temperatura, afectando el desempeño global del sistema” (ISO, 2017).

6.1.3.1. Tipos de fallas por proceso

- Fugas en líneas neumáticas
- Obstrucciones en tuberías
- Caudal insuficiente.
- Presión inestable.
- Contaminación del aire.

6.1.4. *Falla operativa*

“la falla operativa corresponde a la pérdida de funcionalidad de un equipo ocasionada por condiciones inadecuadas de operación, tales como sobrecarga, uso fuera de parámetros de diseño o errores en la ejecución de los procedimientos operativos” (ISO, 2017).

6.1.4.1. Tipos de fallas por operación

- Operación fuera de rango.
- Arranques/paradas inadecuadas.
- Sobre carga del sistema.

6.1.5. *Falla funcional*

“La falla funcional se define como la incapacidad de un sistema o componente para cumplir con la función requerida bajo condiciones operativas específicas, de acuerdo con los estándares de desempeño establecidos” (SAE International, 2009).

6.1.5.1. Tipos de fallas funcionales

- Falla funcional total: Bomba de vacío que deja de operar.
- Falla funcional total: Pérdida de presión en el sistema
- Falla funcional intermitente: Variación inestable en la presión de transporte.
- Falla funcional oculta: Válvulas de seguridad inoperantes.
- Falla funcional progresiva: Incremento de vibraciones.

7. Recolección de la información

Mediante el histórico de las llamadas recibidas de los clientes de DAYOZ®, durante los últimos 2 años, se ha llevado un registro de estas en donde se tabula el nombre del cliente (para esta monografía se tipifica con un número por seguridad de datos de DAYOZ®), Fecha de llamada, tipo de mantenimiento, equipo, fecha final del servicio, elemento que falló y costo de la reparación.

Con el fin de poder analizar los datos y obtener una data que nos permita fortalecer nuestras decisiones en la metodología que se quiere implementar.

Tabla 1

Registro de llamadas de los clientes.

CLIENTE	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENTE 1	10/10/2023	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	14/10/2023	RODAMIENTOS Y MALA CONEXIÓN DEL SENSOR	\$ 3.850.000,00
CLIENTE 1	11/11/2023	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	21/11/2023	POLEA Y CORREAS	\$ 2.245.000,00
CLIENTE 7	30/11/2023	PREVENTIVO	BOMBA DE VACIO	5/12/2023	CAMBIO DE LUBRICANTE	\$ 1.250.000,00
CLIENTE 3	19/12/2023	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	23/12/2023	RODAMIENTOS	\$ 3.260.000,00
CLIENTE 4	4/01/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	9/01/2024	RODAMIENTOS	\$ 2.150.000,00
CLIENTE 1	20/02/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	22/02/2024	LUBRICACION	\$ 1.350.000,00
CLIENTE 7	2/03/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	15/03/2024	LOBULOS	\$ 3.987.000,00
CLIENTE 1	30/03/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	10/04/2024	LOBULOS Y CUERPO	\$ 3.750.000,00
CLIENTE 7	12/04/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	20/04/2024	POLEAS, CORREAS Y RODAMIENTOS DE BOMBA DE VACIO	\$ 6.500.000,00
CLIENTE 5	15/05/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	22/05/2024	EMBOBINADO	\$ 2.240.000,00
CLIENTE 3	21/06/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	2/07/2024	RODAMIENTOS	\$ 3.260.000,00
CLIENTE 7	23/07/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	30/07/2025	RETENEDORES	\$ 1.350.000,00
CLIENTE 2	3/08/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	13/08/2024	EMPAQUES DEL VENTURI	\$ 1.895.000,00
CLIENTE 4	27/12/2024	PREVENTIVO	BOMBA DE VACIO	30/12/2024	EMBOBINADO, RODAMIENTOS E INDUCTOR	\$ 2.790.000,00
CLIENTE 6	4/01/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	19/01/2025	EMPAQUES DEL VENTURI	\$ 1.950.000,00
CLIENTE 3	14/01/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	23/01/2025	RODAMIENTOS Y ENGRANAJES	\$ 9.420.500,00
CLIENTE 5	16/02/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	21/02/2025	RODAMIENTOS	\$ 3.500.300,00
CLIENTE 5	19/03/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	27/03/2025	EMBOBINADO	\$ 2.350.000,00

CLIENT E 5	15/04/2025	CORRECTIV O	BOMBA DE VACIO	30/04/2025	DAÑO EN EL INDUCTOR	\$ 2.400.000,00
CLIENT E 6	15/06/2025	CORRECTIV O	BOMBA DE VACIO	23/06/2025	DAÑO EN RODAMIENTOS Y RETENEDORES	\$ 4.250.000,00
CLIENT E 6	19/09/2025	PREVENTIV O	BOMBA DE VACIO	1/10/2025	LUBRICACION, CAMBIO DE RODAMIENTOS, RETENEDORES Y RESTAURACION EN GENERAL	\$ 23.195.720,0 0
CLIENT E 2	19/11/2025	CORRECTIV O	BOMBA DE VACIO	5/12/2025	EMPAQUES DEL VENTURI	\$ 1.950.000,00

Nota. Esta tabla contiene el registro de llamadas de los clientes, en donde evidenciamos tipo de mantenimiento, fecha de inicio, fecha fin y costo del mantenimiento.

7.1. Organización de la DATA.

Se procede a organizar la data por número de cliente para así poder realizar el análisis a cada uno y observar la frecuencia y el gasto concurrido en los mantenimientos, adicional también se puede observar el tipo de mantenimiento y la parte o pieza del equipo que genero la falla.

Tabla 2

Data del Cliente 1

CLIENTE	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENTE 1	10/10/2023	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	14/10/2023	RODAMIENTOS	\$ 3.850.000,00
CLIENTE 1	11/11/2023	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	21/11/2023	POLEA Y CORREAS	\$ 2.245.000,00
CLIENTE 1	20/02/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	22/02/2024	LUBRICACION	\$ 1.350.000,00
CLIENTE 1	30/03/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	10/04/2024	LOBULOS Y CUERPO	\$ 3.750.000,00

Nota. Tabla con la información tabulada del cliente 1 para su posterior análisis.

Tabla 3

Datos del Cliente 2

CLIENTE	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENTE 2	3/08/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	13/08/2024	EMPAQUES DEL VENTURI	\$ 1.895.000,00
CLIENTE 2	19/11/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	5/12/2025	EMPAQUES DEL VENTURI	\$ 1.950.000,00

Nota. Tabla con la información del cliente 2 para su posterior análisis.

Tabla 4

Datos del Cliente 3

CLIENTE	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENTE 3	19/12/2023	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	23/12/2023	RODAMIENTOS	\$ 3.260.000,00
CLIENTE 3	21/06/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	2/07/2024	RODAMIENTOS	\$ 3.260.000,00
CLIENTE 3	14/01/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	23/01/2025	RODAMIENTOS Y ENGRANAJES	\$ 9.420.500,00

Nota. Tabla con la información del cliente 3 para su posterior análisis.

Tabla 5

Datos del cliente 4

CLIENTE	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENTE 4	4/01/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	9/01/2024	RODAMIENTOS	\$ 2.150.000,00
CLIENTE 4	27/12/2024	PREVENTIVO	BOMBA DE VACIO	30/12/2024	EMBOBINADO, RODAMIENTOS E INDUCTOR	\$ 2.790.000,00

Nota. Tabla con la información del cliente 4 para su posterior análisis.

Tabla 6

Datos del cliente 5

CLIENTE	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENTE 5	15/05/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	22/05/2024	EMBOBINADO	\$ 2.240.000,00

CLIENT E 5	16/02/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	21/02/2025	RODAMIENTOS	\$ 3.500.300,00
CLIENT E 5	19/03/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	27/03/2025	EMBOBINADO	\$ 2.350.000,00
CLIENT E 5	15/04/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	30/04/2025	DAÑO EN EL INDUCTOR	\$ 2.400.000,00

Nota. Tabla con la información del cliente 5 para su posterior análisis.

Tabla 7

Datos del cliente 6

CLIENT E	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENT E 6	4/01/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	19/01/2025	EMPAQUES DEL VENTURI	\$ 1.950.000,00
CLIENT E 6	15/06/2025	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	23/06/2025	DAÑO EN RODAMIENTOS Y RETENEDORES	\$ 4.250.000,00
CLIENT E 6	19/09/2025	PREVENTIVO	BOMBA DE VACIO	1/10/2025	LUBRICACION, CAMBIO DE RODAMIENTOS, RETENEDORES Y RESTAURACION EN GENERAL	\$ 23.195.720,00

Nota. Tabla con la información del cliente 6 para su posterior análisis.

Tabla 8

Datos del cliente 7

CLIENT E	FECHA DE LLAMADA	TIPO DE SERVICIO	EQUIPO	FECHA DE FINA SERVICIO	ELEMENTO QUE FALLO	PRECIO
CLIENT E 7	30/11/2023	PREVENTIVO	BOMBA DE VACIO	5/12/2023	CAMBIO DE LUBRICANTE	\$ 1.250.000,00
CLIENT E 7	2/03/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	15/03/2024	LOBULOS	\$ 3.987.000,00
CLIENT E 7	12/04/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	20/04/2024	POLEAS, CORREAS Y RODAMIENTOS DE BOMBA DE VACIO	\$ 6.500.000,00
CLIENT E 7	23/07/2024	CORRECTIVO	BOMBA DE VACIO	30/07/2025	RETENEDORES	\$ 1.350.000,00

Nota. Tabla con la información del cliente 7 para su posterior análisis.

Una vez nuestros datos estén organizados por cliente, se procede a realizar los respectivos análisis; nos apoyamos usando la distribución de WEIBULL, para poder tener determinar el valor del β , para determinar que acciones tomar y que recomendaciones sugerir, teniendo en cuenta la siguiente ponderación del β :

Un $\beta < 1$; Fallas tempranas.

Un $\beta \approx 1$; Fallas Aleatorias.

Un $1 < \beta < 3$; Desgaste moderado.

Un $\beta \geq 3$; Desgaste severo.

7.2. Análisis de los datos

Cliente 1

De este cliente recibimos 4 llamadas durante los últimos 2 años, en donde manifestó que el sistema no funciona, al momento de realizar la inspecciones en los 4 escenarios las fallas fueron detectadas en la bomba, estas fallas se debieron a: Rodamiento, poleas y correas, lubricación y lóbulos.

Las partes nombradas todas son de la bomba.

A continuación, con el apoyo del siguiente histograma podemos evidenciar más a detalle la frecuencia de las fallas y el respectivo análisis realizado.

Tabla 9

Datos del cliente 1, organizados en un histograma

ITEM	EQUIPO	MTBF en horas	MTBF ORDEN	MTTR en horas	F(t) Mediana	X ln(t)	Y ln(ln(1/(1-F(t))))	R(t)
1	BOMBA DE VACIO CLIENTE 1	672	672	96	15,91%	6,510258341	- 1,752894273	79,13%

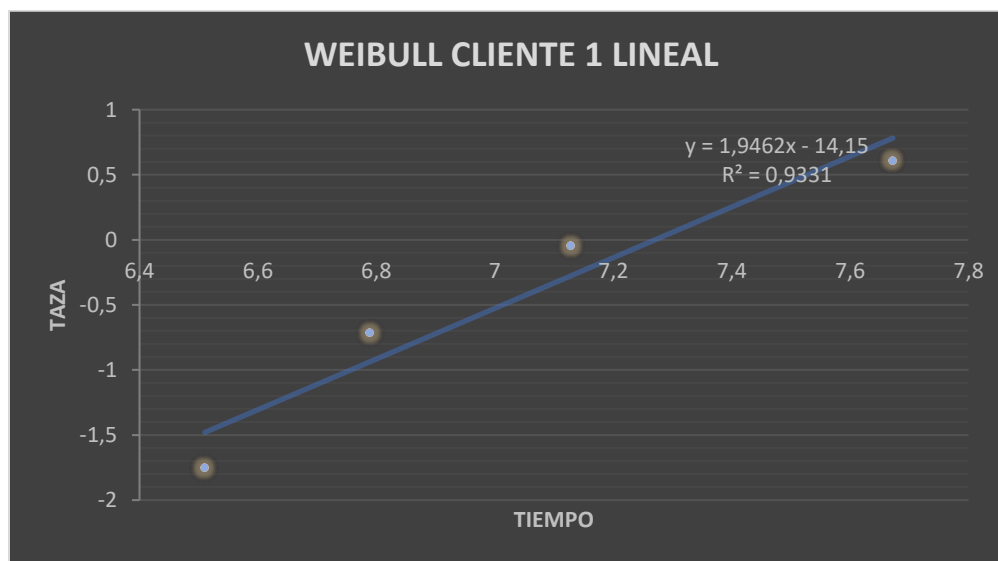
2	BOMBA DE VACIO CLIENTE 1	2184	888	240	38,64%	6,788971743	- 0,716717249	66,86%
3	BOMBA DE VACIO CLIENTE 1	888	1248	48	61,36%	7,129297549	- 0,050266149	45,80%
4	BOMBA DE VACIO CLIENTE 1	1248	2148	264	84,09%	7,672292456	0,608830072	10,58%
ETA		1417,16						

Nota. Histograma del cliente 1 con datos organizados y con sus respectivas formulas desarrolladas para el análisis.

La tabla anterior nos arrojó la gráfica siguiente.

Figura 4

*Gráfica de los resultados del histograma de la **Tabla 9**.*



Nota. Gráfica de Weibull elaborada a partir de los datos históricos de fallas del equipo analizado.

En esta grafica podemos observar un valor de $\beta = 1.9462 \approx 2$, de acuerdo a la ponderación está en el rango de fallas por desgaste, lo cual nos quiere decir que hay una alta probabilidad de que con el pasar del tiempo la falla aumente con la operación, pero con los resultados también podemos

anticipar a las fallas y planear un mantenimiento preventivo, en conclusión, un $\beta \approx 2$; nos dice que se puede dar manejo al envejecimiento del equipo facilitando la toma de decisiones para un RCM.

Una vez tenidos los resultados anteriores, realizamos el cálculo de los indicadores.

Para confiabilidad

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$$

Entonces, para un $t = 1000$ horas

$$R(t) = e^{-(1000/1417.16)^{1.95}}; R(t) \approx 0.252$$

$$MTBF \text{ Prom} = MTBF = \frac{672+2148+888+1248}{4} = 1248 \text{ h}$$

$$MTTR \text{ Prom} = MTTR = \frac{96+240+48+246}{4} = 162 \text{ h}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{1248}{1248+162} \approx 0.885$$

Intervalos de confianza para MTBF, MTTR

Para MTBF.

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 1248 \pm 3,182 * \frac{682}{2}; IC = 1248 \pm 1085$$

$$IC \text{ MTBF (95\%)} \approx [163\text{h} - 2333\text{h}]$$

Para MTTR

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 162 \pm 3,182 * \frac{106}{2}; IC = 162 \pm 169$$

$$IC \text{ MTTR (95\%)} \approx [0\text{h} - 331\text{h}]$$

Con el fin de fortalecer la valides del análisis, se estimaron intervalos de confianza al 95% para los indicadores de mantenimiento. El MTBF presento un valor promedio de 1248 horas, con un intervalo entre 163 y 2333 horas, mientras que el MTTR presento un promedio de 162 horas, con un intervalo entre 0 y 331 horas.

Cliente 2

Se reciben 2 llamadas en los últimos 2 años de este cliente en donde una de las llamadas fue a los 4 meses de su puesta en funcionamiento, debido a la poca experticia del cliente en estos sistemas cambiaron el producto para el cual el sistema estaba diseñado ocasionando una falla prematura; en donde el equipo que se afectó fue la bomba por un sobre esfuerzo por la densidad del material y condiciones químicas de este.

Tabla 10

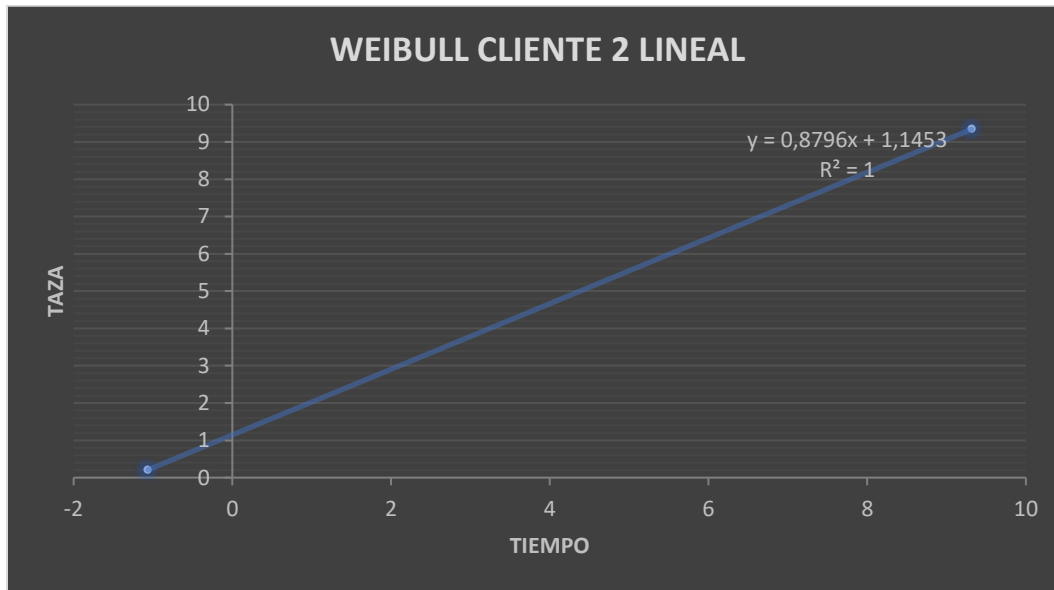
Datos del cliente 2, organizados en un histograma

ITEM	EQUIPO	MTBF en horas	MTBF ORDEN	MTTR en horas	F(t) Mediana	X ln(t)	Y ln(ln(1/(1- F(t))))	R(t)
1	BOMBA DE VACIO CLIENTE 2	11112	11112	240	29,17%	9,315780884	-1,064673327	0,00%
2	BOMBA DE VACIO CLIENTE 2	11380	11380	384	70,83%	9,339612708	0,208755483	0,00%
ETA		3,68						

Nota. Histograma del cliente 2 con datos organizados y con sus respectivas formulas desarrolladas para el análisis.

Figura 5

Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 10.



Nota. Gráfica de Weibull elaborada a partir de los datos históricos de fallas del equipo analizado.

En esta grafica evidenciamos un caso muy atípico donde el $R^2 = 1$, esto no quiere decir que sea un ajuste perfecto, es debido a que la muestra es muy diminuta y la variación entre los datos no es significativa, pero si se puede inferir en el comportamiento futuro del equipo ya que el valor $\beta = 0,8796 \approx 0.88$, que de acuerdo a la ponderación está en el rango de $\beta = 1$; Fallas tempranas, de acuerdo a los criterios de WEIBULL, las fallas están asociadas a problemas iniciales ya sean de instalación, arranque y/o calidad; y no al desgaste del equipo; por lo cual podemos concluir que con el pasar el tiempo el equipo tiende a estabilizarse esto no demanda ninguna actividad de mantenimiento sino de corregir condiciones iniciales de la operación para eliminar las fallas prematuras.

Una vez tenidos los resultados anteriores, realizamos el cálculo de los indicadores.

Para confiabilidad $R(t) = e^{-t/MTBF}$

Entonces, para un $t = 1000$ horas

$$R(t) = e^{-1000/11246} ; R(t) \approx 0.915$$

$$MTBF \text{ Prom} = MTBF = \frac{11112+11380}{2} = 11246 \text{ h}$$

$$MTTR \text{ Prom} = MTTR = \frac{240+384}{2} = 312 \text{ h}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{11246}{11246+312} \approx 0.973$$

Intervalos de confianza para MTBF, MTTR

Para MTBF.

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}} ; IC = 11246 \pm 12,076 * \frac{189,5}{1.41} ; IC = 11246 \pm 1703$$

IC MTBF (95%) $\approx$ [9543h – 12949h]

Para MTTR

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}} ; IC = 312 \pm 12,706 * \frac{101,8}{1.41} ; IC = 312 \pm 915$$

IC MTTR (95%) $\approx$ [0h – 1227h]

Se estimaron intervalos de confianza al 95% para los indicadores de mantenimiento, obteniendo el MTBF un rango entre 9543 y 12949 horas, y para el MTTR un rango entre 0 y 1227 horas.

Con un (n = 2), se debe a la baja frecuencia de fallas del sistema, características de una confiabilidad alta, aunque esto limita el análisis estadístico los datos corresponden a condiciones reales de la operación y permiten una aproximación valida del comportamiento del sistema.

Cliente 3

Durante el periodo de 2 años se recibieron 3 llamadas de este cliente en donde, el cliente manifestó que de la bomba de vacío se quedó pegada, lo cual el equipo de mantenimiento inspecciono y era un fallo de rodamiento y de engranajes, los cuales por no implementar una buena rutina de lubricación sufrieron de una fatiga superficial; es un equipo que funciona 24/7 todo el año.

Tabla 11

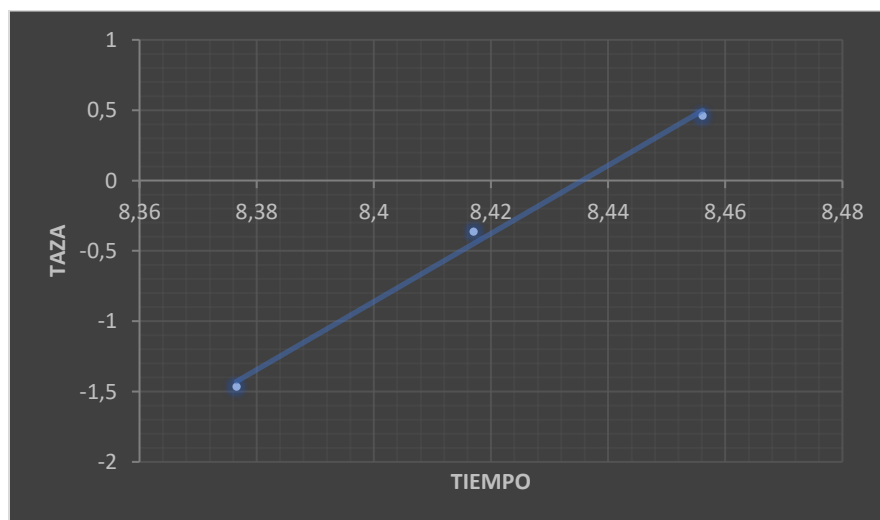
Datos del cliente 3, organizados en un histograma

ITEM	EQUIPO	MTBF en horas	MTBF ORDEN	MTTR en horas	F(t) Mediana	X ln(t)	Y ln(ln(1/(1-F(t))))	R(t)
1	BOMBA DE VACIO CLIENTE 3	4344	4344	96	20,59%	8,376550862	- 1,46740178	78,83%
2	BOMBA DE VACIO CLIENTE 3	4704	4524	264	50,00%	8,417151837	- 0,36651292	52,97%
3	BOMBA DE VACIO CLIENTE 3	4524	4704	216	79,41%	8,45616849	0,45770985	19,52%
ETA		4609,55						

Nota. Histograma del cliente 3 con datos organizados y con sus respectivas formulas desarrolladas para el análisis.

Figura 6

*Grafica de los resultados del histograma de la **Tabla 11**.*



Nota. Gráfica de Weibull elaborada a partir de los datos históricos de fallas del equipo analizado.

En la Grafica evidenciamos un $\beta = 24.199$; lo cual es anormalmente alto, pero con un $R^2 = 0.9994$, lo cual nos dice que los datos se ajustan a la distribución lineal y no hay mucha varianza entre ellos, pero el valor β , se debe a que este cliente en su procesos la bomba sufre de desgaste acelerado, el sistema es muy confiable hasta que llega a la falla; observamos que la línea de la gráfica es casi perfecta lo cual nos dice que de acuerdo a los datos en la tabla la tasa de falla es de cada 6 meses, por un fenómeno que estudiaremos cuando estemos aplicando el RCM.

Una vez tenidos los resultados anteriores, realizamos el cálculo de los indicadores.

Para confiabilidad $R(t) = e^{-t/MTBF}$

Entonces, para un $t = 1000$ horas

$$R(t) = e^{-1000/4524} ; R(t) \approx 0.801$$

$$MTBF \text{ Prom} = MTBF = \frac{4344+4524+4704}{3} = 4524 \text{ h}$$

$$MTTR \text{ Prom} = MTTR = \frac{96+264+216}{3} = 192 \text{ h}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{4524}{4524+192} \approx 0.959$$

Intervalos de confianza para MTBF, MTTR

Para MTBF.

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}} ; IC = 4524 \pm 4,303 * \frac{180}{\sqrt{3}} ; IC = 4524 \pm 447$$

$$IC \text{ MTBF (95\%)} \approx [4077\text{h} - 4971\text{h}]$$

Para MTTR

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}} ; IC = 192 \pm 4,303 * \frac{86}{\sqrt{3}} ; IC = 192 \pm 213$$

IC MTTR (95%) $\approx$ [0h – 405h]

El sistema presenta un MTBF promedio de 4524 horas, evidenciando una baja frecuencia de fallas y un comportamiento operativo estable. El MTTR promedio de 192 horas indica tiempos de reparación moderados, con oportunidades de mejora en la mantenibilidad.

La disponibilidad alcanzo un 95%, reflejando alta operatividad, mientras la confiabilidad para 1000 horas fue de 80.1%, indicando un buen desempeño del sistema.

Se calcula intervalos de confianza al 95%, obteniendo para el MTBF un rango entre 4077 y 4971 horas, y para el MTTR un rango entre 0 y 405 horas, lo cual refleja una variabilidad y la influencia del tamaño de la muestra.

Cliente 4

En el pasar de 2 años el cliente, no hace 2 llamadas en donde manifiesta daños en su bomba, y uno da las llamadas fue para realizar un mantenimiento preventivo, de la misma, en donde se realiza actividades de mantenimiento en la bomba.

Tabla 12

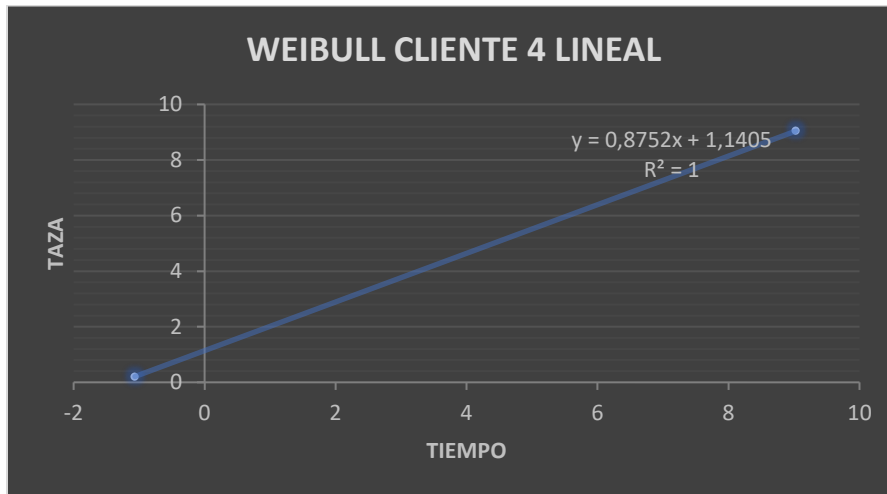
Datos del cliente 4, organizados en un histograma

ITEM	EQUIPO	MTBF en horas	MTBF ORDEN	MTTR en horas	F(t) Mediana	X ln(t)	Y ln(ln(1/(1-F(t))))	R(t)
1	BOMBA DE VACIO CLIENTE 4	8472	8362	120	29,17%	9,031452912	- 1,064673327	0,00%
2	BOMBA DE VACIO CLIENTE 4	8362	8472	72	70,83%	9,044521887	0,208755483	0,00%
ETA		3,68						

Nota. Histograma del cliente 4 con datos organizados y con sus respectivas formulas desarrolladas para el análisis.

Figura 7

*Grafica de los resultados del histograma de la **Tabla 12**.*



Nota. Gráfica de Weibull elaborada a partir de los datos históricos de fallas del equipo analizado.

Al igual que el cliente 2, los datos que se tiene son mínimos por lo cual el valor de $R^2 = 1$, en donde el valor de $\beta = 0.8752 \approx 0.88$; donde según la ponderación el $\beta < 1$; lo que denominamos fallas infantiles, donde ocurre una falla al inicio, pero mejora con el pasar del tiempo; concluimos que el problema no es de fallas sino de condiciones iniciales.

Una vez tenidos los resultados anteriores, realizamos el cálculo de los indicadores.

Para confiabilidad $R(t) = e^{-t/MTBF}$

Entonces, para un $t = 1000$ horas

$$R(t) = e^{-1000/8417} ; R(t) \approx 0.888$$

$$MTBF \text{ Prom} = MTBF = \frac{8362+8472}{2} = 8417 \text{ h}$$

$$MTTR \text{ Prom} = MTTR = \frac{120+72}{2} = 96 \text{ h}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{8417}{8417+96} \approx 0.989$$

Intervalos de confianza para MTBF, MTTR

Para MTBF.

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 8417 \pm 12,706 * \frac{78}{\sqrt{2}}; IC = 8417 \pm 700$$

IC MTBF (95%) $\approx$ [7717h – 9117h]

Para MTTR

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 96 \pm 12,706 * \frac{34}{\sqrt{3}}; IC = 96 \pm 305$$

IC MTTR (95%) $\approx$ [0h – 401h]

El sistema presenta un MTBF promedio de 8417 horas, evidenciando una baja frecuencia de fallas y un comportamiento confiable el intervalo de confianza al 95% para este indicador esta entre 7717 y 9117 horas, lo que confirma estabilidad del sistema. El MTTR promedio de 96 horas indica tiempo de reparaciones relativamente bajos, lo que favorece la mantenibilidad del sistema, no obstante, su intervalo de confianza se ubica entre 0 y 401 horas, reflejando mayor variabilidad en los tiempos de intervención.

La disponibilidad alcanzo 98.9%, reflejando un alto nivel de operatividad, mientras la confiabilidad para un tiempo de operación de 1000 horas fue de 88,8%, indicando un desempeño solido del sistema.

Cliente 5

Se han recibido 4 llamadas de este cliente en los 2 últimos años, en donde manifiestan que el sistema puede eficiencia y que no está generando vacío ya que los baches se demoran más del tiempo parametrizado inicial, afectando así la operación y generando retrasos en la producción.

Tabla 13

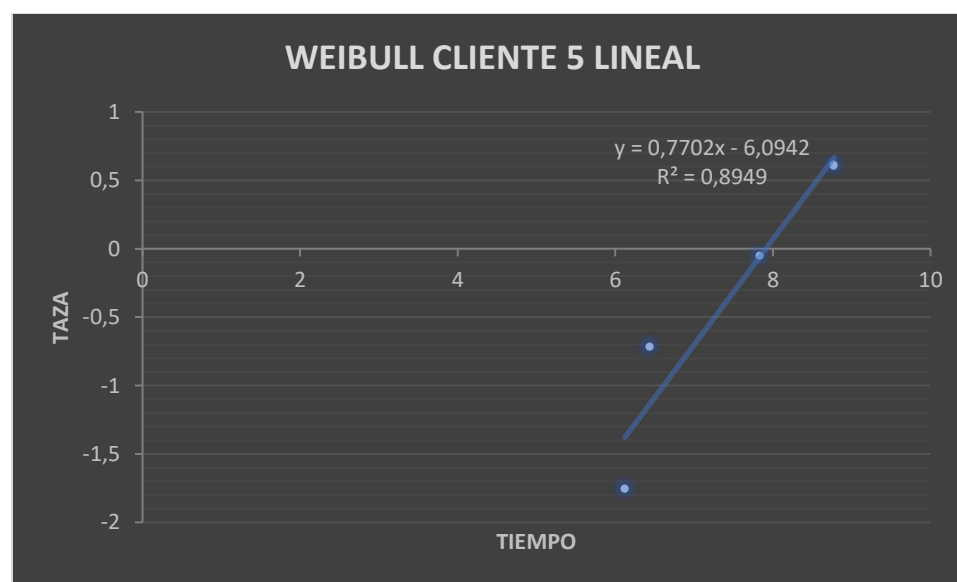
Datos del cliente 5, organizados en un histograma

ITEM	EQUIPO	MTBF en horas	MTBF ORDEN	MTTR en horas	F(t) Mediana	X ln(t)	Y ln(ln(1/(1-F(t))))	R(t)
1	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	6480	456	168	15,91%	6,12249281	- 1,752894273	55,49%
2	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	624	624	120	38,64%	6,436150368	- 0,716717249	47,24%
3	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	456	2520	192	61,36%	7,832014181	- 0,050266149	11,11%
4	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	2520	6480	360	84,09%	8,776475789	0,608830072	1,06%
ETA		906,80						

Nota. Histograma del cliente 5 con datos organizados y con sus respectivas formulas desarrolladas para el análisis.

Figura 8

Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 13.



Nota. Gráfica de Weibull elaborada a partir de los datos históricos de fallas del equipo analizado.

En la gráfica podemos ver cómo es la fluctuación de los datos con un $R^2 = 0.8949$; lo cual es un ajuste muy aceptable, y un $\beta = 0.7702 \approx 0.77$; lo cual de acuerdo a la ponderación está dentro del rango de las fallas prematuras, este fenómeno ocurre porque durante la instalación como alineación o poco después de la puesta en marcha y el falta conocimiento de los sistema de transporte neumático, manipulan el sistema y fuerzan la falla temprana, lo cual se debe tener en cuenta un plan de capacitación dentro del plan de RCM.

Una vez tenidos los resultados anteriores, realizamos el cálculo de los indicadores.

Para confiabilidad $R(t) = e^{-t/MTBF}$

Entonces, para un $t = 1000$ horas

$$R(t) = e^{-1000/2520} ; R(t) \approx 0.672$$

$$MTBF \text{ Prom} = MTBF = \frac{456+624+2520+6480}{4} = 2520 \text{ h}$$

$$MTTR \text{ Prom} = MTTR = \frac{168+120+192+360}{4} = 210 \text{ h}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{2520}{2520+210} \approx 0.923$$

Intervalos de confianza para MTBF, MTTR

Para MTBF.

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}} ; IC = 2520 \pm 3,182 * \frac{2677}{\sqrt{4}} ; IC = 2520 \pm 4257$$

$$IC \text{ MTBF (95\%)} \approx [0h - 6777h]$$

Para MTTR

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}} ; IC = 210 \pm 3,182 * \frac{104}{\sqrt{4}} ; IC = 210 \pm 165$$

IC MTTR (95%) $\approx [45h - 375h]$

El sistema presenta un MTBF promedio de 2520 horas; sin embargo, el intervalo de confianza a un 95% está entre 0 y 6777 horas, lo que evidencia una alta variabilidad en los datos, lo que sugiere un comportamiento no homogéneo y la posible existencia de diferentes modos de falla.

El MTTR promedio fue de 210 horas, con un intervalo de confianza entre 45 y 375 horas, lo que indica variabilidad en los tiempos de reparación y oportunidades de mejora en la gestión del mantenimiento.

La disponibilidad del sistema se estimó en 92,3% mientras que la confiabilidad para un tiempo de operación de 1000 horas fue de 0.672 (67.2%), reflejando un desempeño moderado.

Cliente 6

De este cliente recibimos 3 llamas durante el periodo de tiempo de estudio, en donde nos manifestó que el sistema está presentando dificultades, nuevamente hacemos inspección y llegamos al problema el cual fue la bomba de vacío, esta se ve afectada porque al ser una bomba fabricada por otra compañía competencia la configuración o el diseño inicial, hace que la bomba este muy expuesta al material en este caso es Carbonato de calcio en polvo, el cual se conoce por su densidad y sus propiedades químicas que son bastante abrasivas al contacto con los aceros del blower.

Tabla 14

Datos del cliente 6, organizados en un histograma

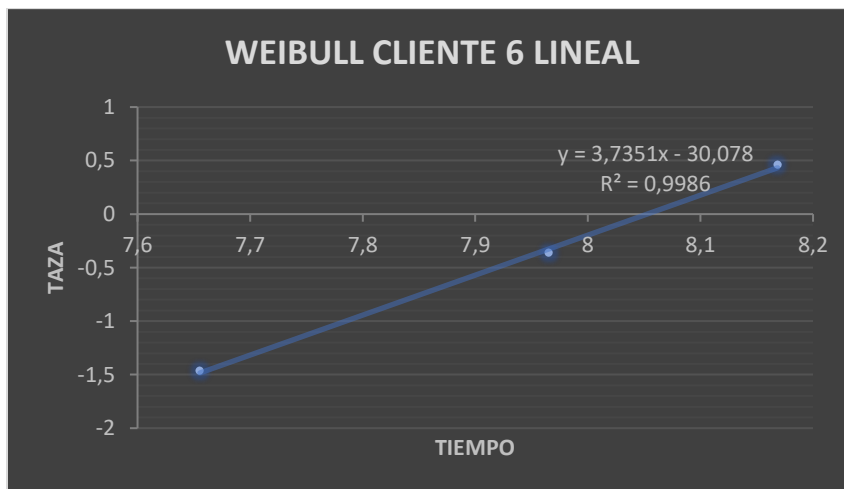
ITEM	EQUIPO	MTBF en horas	MTBF ORDEN	MTTR en horas	F(t) Mediana	X ln(t)	Y ln(ln(1/(1-F(t))))	R(t)
1	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	3528	2112	360	20,59%	7,655390645	- 1,467401781	79,72%

2	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	2112	2880	192	50,00%	7,965545573	- 0,366512921	48,58%
3	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	2880	3528	288	79,41%	8,168486417	0,457709854	21,43%
ETA		3142,57						

Nota. Histograma del cliente 6 con datos organizados y con sus respectivas formulas desarrolladas para el análisis.

Figura 9

*Grafica de los resultados del histograma de la **Tabla 14**.*



Nota. Gráfica de Weibull elaborada a partir de los datos históricos de fallas del equipo analizado.

En este grafico observamos, que nuestro $\beta = 3.7351 \approx 3.75$; y la $R^2 = 0.9986$; si empezamos analizando el R^2 , este nos da una confiabilidad severa en los datos, los cuales sirven para modelar esta distribución, en cuanto a nuestro β está en el rango de $\beta \geq 3$; de acuerdo a la ponderación estamos ante un desgaste severo esto a consecuencia de que las fallas se vuelven cada vez más frecuentes a medida que el sistema se pone en funcionamiento; requiriendo así intervención antes de que las fallas se disparen.

Una vez tenidos los resultados anteriores, realizamos el cálculo de los indicadores.

Para confiabilidad $R(t) = e^{-t/MTBF}$

Entonces, para un $t = 1000$ horas

$$R(t) = e^{-1000/2840}; R(t) \approx 0.703$$

$$MTBF \text{ Prom} = MTBF = \frac{2112+2880+3528}{3} = 2840 \text{ h}$$

$$MTTR \text{ Prom} = MTTR = \frac{360+192+288}{3} = 280 \text{ h}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{2840}{2840+280} \approx 0.910$$

Intervalos de confianza para MTBF, MTTR

Para MTBF.

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 2840 \pm 4,303 * \frac{709}{\sqrt{3}}; IC = 2840 \pm 1760$$

$$IC \text{ MTBF (95\%)} \approx [1080\text{h} - 4600\text{h}]$$

Para MTTR

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 280 \pm 4,303 * \frac{84}{\sqrt{3}}; IC = 280 \pm 209$$

$$IC \text{ MTTR (95\%)} \approx [71\text{h} - 489\text{h}]$$

El sistema presenta un MTBF promedio de 2840 horas, con un intervalo de confianza al 95% entre 1080 y 4600 horas, lo que indica una variabilidad moderada en la frecuencia de fallas.

El MTTR promedio fue de 280 horas, con un intervalo entre 71 y 489 horas, evidenciando tiempos de reparación relativamente altos y variables, lo que impacta la mantenibilidad del sistema.

La disponibilidad se estimó en 91%, mientras la confiabilidad para un tiempo de 1000 horas fue de 70,3%, reflejando un desempeño aceptable pero con oportunidades de mejora.

En conjunto, los datos muestran un sistema con nivel medio de confiabilidad y oportunidades claras de optimización en los tiempos de reparación, recomendándose implementar estrategias orientadas a la reducción del MTTR y la mejora continua del mantenimiento.

Cliente 7

Este cliente se comunicó 4 veces con el área técnica y de mantenimiento, en donde manifestó fallas en la bomba, sin embargo, se hizo inspección general del sistema y la falla más crítica fue la bomba lobular de vacío.

Tabla 15

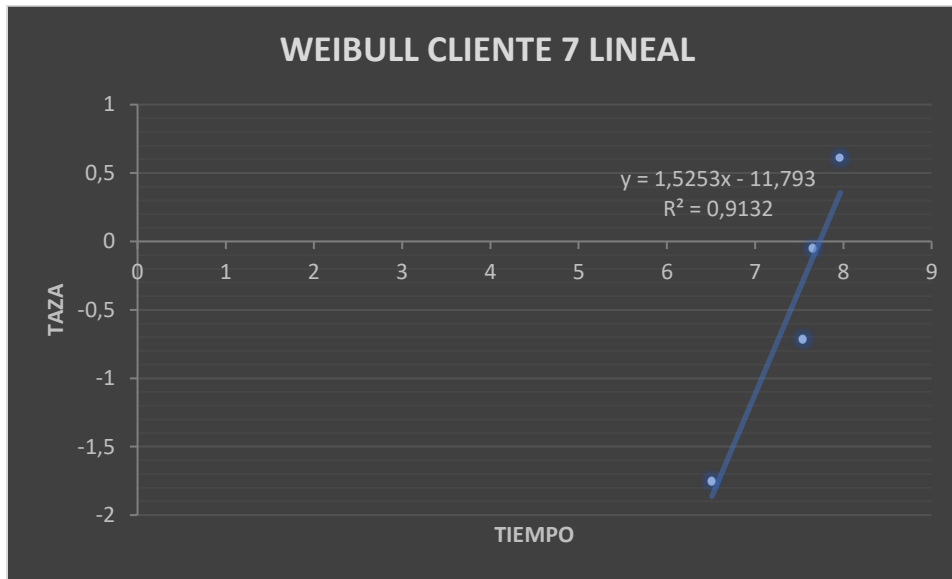
Datos del cliente 7, organizados en un histograma

ITEM	EQUIPO	MTBF en horas	MTBF ORDEN	MTTR en horas	F(t) Mediana	X ln(t)	Y ln(ln(1/(1-F(t))))	R(t)
1	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	2112	672	120	15,91%	6,510258341	- 1,752894273	85,62%
2	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	672	1888	312	38,64%	7,543273347	- 0,716717249	47,22%
3	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	2880	2112	192	61,36%	7,655390645	- 0,050266149	41,05%
4	BOMBA DE VACIO CLIENTE 5	1888	2880	168	84,09%	7,965545573	0,608830072	23,96%
ETA		2279,23						

Nota. Histograma del cliente 6 con datos organizados y con sus respectivas formulas desarrolladas para el análisis.

Figura 10

Grafica de los resultados del histograma de la Tabla 15.



Nota. Gráfica de Weibull elaborada a partir de los datos históricos de fallas del equipo analizado.

Con un $\beta = 1.5253 \approx 1.53$; que de acuerdo a la ponderación en este caso el $\beta > 1$; lo que nos lleva nos dice es que la falla ha comenzado, palabras mejores las fallas comienzan a aumentar con el tiempo y el equipo ya no forma de manera aleatoria, el $R^2 = 0.9132$; lo cual significa una buena relación entre los datos, ajuste el cual es bueno para la toma de decisiones y respaldar lo establecido en el RCM.

Una vez tenidos los resultados anteriores, realizamos el cálculo de los indicadores.

Para confiabilidad $R(t) = e^{-t/MTBF}$

Entonces, para un $t = 1000$ horas

$$R(t) = e^{-1000/1888} ; R(t) \approx 0.588$$

$$MTBF \text{ Prom} = MTBF = \frac{672+1888+2112+2880}{4} = 1888 \text{ h}$$

$$MTTR \text{ Prom} = MTTR = \frac{120+312+192+168}{3} = 198 \text{ h}$$

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{1888}{1888+198} \approx 0.905$$

Intervalos de confianza para MTBF, MTTR

Para MTBF.

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 1888 \pm 3,182 * \frac{941}{\sqrt{4}}; IC = 1888 \pm 1496$$

IC MTBF (95%) $\approx$ [392h – 3384h]

Para MTTR

$$IC = \bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}}; IC = 198 \pm 3,182 * \frac{84}{\sqrt{4}}; IC = 198 \pm 132$$

IC MTTR (95%) $\approx$ [66h – 330h]

El sistema presenta un MTBF promedio de 1888 horas, con un intervalo de confianza de 95% entre 392 y 3384 horas, lo que indica una variabilidad moderada de la frecuencia de fallas.

El MTTR promedio fue de 198 horas, con un intervalo entre 66 y 330 horas, evidenciando tiempos de reparación relativamente controlados en comparación con escenarios anteriores.

La disponibilidad del sistema se estimó en 90,5%, mientras la confiabilidad para un tiempo de 1000 horas fue de 58.8%, reflejando un desempeño aceptable.

En conjunto, los resultados muestran un sistema con comportamiento estable y sin presencia de valores atípicos críticos; sin embargo, existen oportunidades de mejora tanto en la relación de la frecuencia de fallas como en la optimización de los tiempos de reparación para incrementar la disponibilidad y confiabilidad del sistema.

8. Diseño del plan de mantenimiento preventivo bajo la metodología RCM

En este punto vamos a utilizar los datos resultados de nuestro β , en donde este parámetro nos permite identificar como fallan los equipos de los clientes o que tipos de fallas presentan en sus equipos tales como fallas tempranas, aleatorias o por desgaste. Con base a esto vamos a definir la estrategia asignando actividades frecuencia y prioridades a los 7 clientes según la criticidad.

De acuerdo a la ponderación de β , agruparemos a los clientes de acuerdo al rango dado por este parámetro, a partir de estos resultados se definirán estrategias de mantenimiento alienadas con RCM, considerando el comportamiento real de la falla de cada cliente.

8.1. Fallas tempranas $\beta < 1$

Para los clientes 2, 4 y 5, los cuales su valor β , fue inferior a 1, podemos aplicar un RCM – proactivo, con el fin de eliminar o evitar la falla para que ocurra desde el inicio mediante las siguientes acciones:

1. Estandarizar los procedimientos de montaje e instalación
2. Validar alienación montaje y conexiones
3. Ajustes mecánicos de la bomba.

Las acciones que respaldan lo anterior son las siguientes:

1. Implementar un chek-list después de la puesta en marcha
2. Verificación de la secuencia durante el arranque/parada.
3. Validar condiciones de operación (Caudal, amperaje, temperatura y presión) y hacer una comparación con el nominal de fábrica.

Para evitar que este tipo de falla prematura o infantil escale a daños o fallas mayores es necesario realizar una inspección temprana en las cuales se contemplen las siguientes acciones:

1. Inspecciones frecuentes en las primeras horas o días.
2. Monitoreo de:
 - Vibraciones
 - Temperatura

- Ruidos anormales

También podemos aplicar en estos casos la metodología de: los 5 porques?, o ISHIKAWA.

Podemos contemplar también la clasificación de las fallas ya sean operativas, mecánicas o en su defecto de diseño.

Una estrategia que podemos implementar para reducir el error humano o para que este sea nulo y no ocurran fallas infantiles es:

1. Capacitación del personal
2. Estandarización de la operación
3. Limites operativos definidos

Para estos 3 clientes es muy bueno que las exigencias de calidad sean estrictas para cualquier proveedor de equipos mecánicos o sistemas que demanden mantenimiento, con el fin de evitar defecto de origen.

Por esto recomendamos acciones como:

1. Validación de repuestos.
2. Control de proveedores
3. Inspección en la recepción
4. Pruebas FAT y de pre-comisionamiento.

Finalmente, una estrategia para la mejora continua para estos 3 clientes seria contemplar lo siguiente:

1. Recolección de más datos de fallas

2. Recalcular el β
3. Ajustar procedimientos.

Para los $\beta < 1$ dentro de la metodología RCM no es recomendable preventivo por tiempo o el remplazo de manteamientos programados; no podemos apoyar en la eliminación de la causa, control de arranque o puesta en marcha y la mejora operativa.

Concluimos para el Cliente 2, 4 y 5 que las fallas infantiles deben atacarse desde el origen mediante estrategias bastantes proactivas, con un enfoque en la instalación, montaje, arranque, Comisionamiento y control operativo en lugar de incrementar actividades de mantenimiento tradicional ocasionando sobre costos.

8.1.1. Cronograma de actividades de mantenimiento clientes 2, 4 y 5

De acuerdo a los Valores β de los clientes 2, 4 y 5, recomendamos realizar actividades de mantenimiento de acuerdo a las frecuencias recomendadas en los siguientes cronogramas.

Figura 11

Cronograma de actividades diarias para cliente 2, 4 y 5. Arranque

PLAN DE MANTENIMIENTO													COD. 1		
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO											FECHA:		REALIZO:		
COMPONENETE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Inspeccion visual General	D	Mantenimineto	X	X	X	O								
2	Verificacion de fugas	D	Operación	X	X	X	O								
3	Control de parametros (Presion, Caudal)	D	Mantenimineto	X	X	X	O								
4	Revison de vibracion y ruido	D	Mantenimineto	X	X	X	O								
5	Verificacion de temperatura	D	Mantenimineto	X	X	X	O								
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea								
		PROGRAMADO O					D: Diaria			S: Semanal			M: Mensual		
		CUMPLIDO X					T: Trimestral			C: Semestral			A: Anual		

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para los clientes 2, 4 y 5 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia diaria las primeras semanas de cada mes el primer cuatrimestre, con el objetivo de detectar fallas inmediatas, evitar pérdidas, operación correcta, identificar anomalías y evitar sobrecalentamiento.

Figura 12

Cronograma de actividades semanales para cliente 2, 4 y 5. Estabilización

EQUIPO: UNIDAD DE VACIO										FECHA:			REALIZO:		
COMPONENETE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Inspeccion General	S	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
2	Verificacion de alineacion	S	Operación	X	X	X	O	O	O						
3	Revison de conexiones	S	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
4	Validacion de la operación	S	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea								
		PROGRAMADO O					D: Diaria			S: Semanal			M: Mensual		
		CUMPLIDO X					T: Trimestral			C: Semestral			A: Anual		

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para los clientes 2, 4 y 5 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia semanal el primer semestre, esto con el objetivo hacer seguimiento de condición, evitar desgaste temprano, prevenir fallas mecánicas y controlar el proceso.

Figura 13

Cronograma de actividades mensual para cliente 2, 4 y 5. Operación controlada

PLAN DE MANTENIMIENTO														COD. 1	
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO											FECHA:		REALIZO:		
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Inspeccion General	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
2	Mediciona de Vibraciones	M	Operación	X	X	X	O	O	O						
3	Inspeccion de componenetes	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
4	Analisis de desempeño	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea								
		PROGRAMADO O					D: Diaria			S: Semanal			M: Mensual		
		CUMPLIDO X					T: Trimestral			C: Semestral			A: Anual		

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para los clientes 2, 4 y 5 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia mensual el primer semestre, esto con el objetivo de confirmar la estabilidad del sistema y el equipo, detecciones tempranas, identificar fallar recurrentes y evaluar comportamientos.

Figura 14

Cronograma de actividades semestral para cliente 2, 4 y 5. Régimen normal

PLAN DE MANTENIMIENTO														COD. 1			
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO											FECHA:		REALIZO:				
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO																	
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES													
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC		
1	Inspeccion General	C	Mantenimineto							O						O	
2	Verificacion de paramteros	C	Operación							O						O	
3	Auditoria operativa	C	Mantenimineto							O						O	
4	RCA (si falla)	C	Mantenimineto							O						O	
Novedades:		Estado de la tarea						Frecuencia de la tarea									
		PROGRAMADO O						D: Diaria		S: Semanal		M: Mensual					
		CUMPLIDO X						T: Trimestral		C: Semestral		A: Anual					

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para los clientes 2, 4 y 5 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia semestral, esto con el objetivo de tener control básico, estabilidad en la operación, mejora continua y eliminar causa raíz.

8.1.2. Conclusiones

Estos cronogramas están diseñados con el fin de atacar la raíz del problema en etapas iniciales, reduciendo progresivamente la intervención a medida que el sistema se estabiliza.

8.2. Desgaste moderado $1 < \beta < 3$

Para los clientes 1 y 7, que en el resultado de WIEBULL, el parámetro β , fue para el cliente 1 un $\beta = 1,9462$ y para el cliente 7 un $\beta = 1,5253$; con estos valores de β , las bombas comienzan a envejecer, pero es controlable, por eso para mantener este desgaste en rangos de lo que denominamos desgaste normal es recomendable retrasar ese desgaste mediante las siguientes acciones:

1. Lubricaciones programadas.
2. Ajustes mecánicos (alienación y balanceo).
3. Inspecciones periódicas.

Estas acciones se aplicarán en los mantenimientos preventivos programados, los cuales ayudarán a que la disponibilidad de estos equipos esté en valores por encima del 95%.

También podemos aplicar una estrategia de monitoreo basado en condición (CBM), para poder detectar el desgaste o deterioro temprano, con el fin de evitar el correctivo y llevar las líneas de producción a un paro no programado; para esto se recomienda hacer las siguientes acciones:

1. Análisis de vibraciones mecánicas.
2. Monitoreo de temperaturas, (Termografía).
3. Control de presión y caudal, (Presostatos).

Con la implementación de estas acciones nos permite establecer intervalos de mantenimiento ajustados a la realidad operativa del equipo; con las acciones mencionadas en el CBM, buscamos que las fallas en etapas tempranas pasen a eventos críticos, aumentando la confiabilidad del sistema.

Para concluir las acciones recomendadas para estos clientes lo que se busca es que con la aplicación de esta estrategia basada en RCM, se reduzcan las fallas, mayor vida útil de los equipos y sobre todo controlar los costos de mantenimiento innecesarios.

8.2.1. Cronograma de actividades de mantenimiento clientes 1 y 7

De acuerdo a los Valores β de los clientes 1 y 7, recomendamos realizar actividades de mantenimiento de acuerdo a las frecuencias recomendadas en los siguientes cronogramas.

Figura 15*Cronograma de actividades mensual para clientes 1 y 7, Control Inicial*

PLAN DE MANTENIMIENTO													COD. 1			
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO											FECHA:		REALIZO:			
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO																
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES												
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC	
1	Inspeccion general	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
2	Verificacion de temperatura	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
3	Control de presion/caudal	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
4	Medicion de vibraciones	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
5	Revision de lubricacion	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea									
		PROGRAMADO O					D: Diaria		S: Semanal		M: Mensual					
		CUMPLIDO X					T: Trimestral		C: Semestral		A: Anual					

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para los clientes 1 y 7 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia mensual todo el año, esto con el objetivo de detectar desde el inicio el deterioro, evitar sobrecalentamientos, estabilidad en la operación identificar desgastes tempranos y reducir la fricción.

Figura 16*Cronograma de actividades semestral para cliente 1 y 7, Seguimiento de desgaste*

PLAN DE MANTENIMIENTO													COD. 1		
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO										FECHA:		REALIZO:			
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Inspeccion general	C	Mantenimineto						O						O
2	Analisis de Vibraciones	C	Operación						O						O
3	Revision de rodamientos	C	Mantenimineto						O						O
4	Verificacion de alineacion	C	Mantenimineto						O						O
5	Control de variables operativas	C	Mantenimineto						O						O
Novedades:		Estado de la tarea						Frecuencia de la tarea							
		PROGRAMADO O						D: Diaria		S: Semanal		M: Mensual			
		CUMPLIDO X						T: Trimestral		C: Semestral		A: Anual			

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para los clientes 1 y 7 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia semestral, con el objetivo de evaluar la evolución del desgaste, detectar fallas incipientes, prevenir fallas mecánicas, evitar desgaste acelerado y mantener condiciones óptimas.

Figura 17

Cronograma de actividades anual para cliente 1 y 7, Operación optimizada

PLAN DE MANTENIMIENTO														COD. 1	
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO											FECHA:		REALIZO:		
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Inspeccion general	A	Mantenimineto												O
2	Monitoreo de vibraciones	A	Operación												O
3	analisis de tendencia	A	Mantenimineto												O
4	Auditoria de mantenimiento	A	Mantenimineto												O
5	Evaluacion de componentes criticos	A	Mantenimineto												O
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea								
		PROGRAMADO O					D: Diaria			S: Semanal			M: Mensual		
		CUMPLIDO X					T: Trimestral			C: Semestral			A: Anual		

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para los clientes 1 y 7 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia anual, con el objetivo de tener un control único de la operación, seguimiento de condición, proyección de fallas, mejora continua y definir reemplazos.

8.2.2. Conclusiones

Estos cronogramas permiten controlar el inicio del desgaste mediante intervenciones periódicas y monitoreo de condición, evitando que el sistema entre en fase crítica de falla.

8.3. Desgaste severo $\beta \geq 3$

El cliente 3, tuvo un $\beta = 24.199$ lo que es considerado estadísticamente un atípico, se validaron los datos y los cálculos con el fin de validar si hubiera un error en la tabulación y se encontró que todo estaba en orden, pero este cliente es el que más llamadas seguidas presenta teniendo MTTF medio de 4000 horas, la cual la operación es 24/7 los 365 días del año; con lo anterior se toma la decisión de tomar ese valor β tal cual lo arroja WEIBULL, debido a que el $R^2 = 99.49$, lo que nos da una buena confiabilidad en las muestras.

El valor β nos hace inferir que este cliente presenta un desgaste critico en su bomba y de acuerdo a la inspección el desgaste no es solo en rodamiento sino en los engranajes lo cual es una pieza vital y bastante critica dentro de los componentes de la bomba de vacío.

Las recomendaciones en este cliente son las siguientes:

1. Auditoria técnica del sistema.
2. Evaluación de condiciones de operación.
3. Revisión en la ingeniera de diseño

Con estas acciones se busca evitar una falla funcional y mediante acciones de monitoreo continuo para anticiparnos para validar el modelo RCM podemos Recalcular el β , ajustar las frecuencias y analizar nuevas fallas; para poder tener éxito en esto recomendamos no solo un mantenimiento preventivo básico, sino que se requiere de:

Reemplazo programado + Monitoreo Predictivo + Posible rediseño.

8.3.1. Cronograma de actividades cliente 3.

Para este cliente debido a su valor β , lo más recomendable es que el RCM se haga bajo un cronograma especial y estricto considerando condición + vida útil; esto con el objetivo de que las fallas rápidas sean predecibles y sea gestionado por horas y condición del equipo.

Figura 18

Cronograma de actividades por horas para cliente 3, Hard Time

PLAN DE MANTENIMIENTO													COD. 1			
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO																
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO											FECHA:			REALIZO:		
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES												
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC	
1	Inspeccion general	D	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O							
2	Medicion de vibraciones	D	Operación	X	X	X	O	O	O							
3	inspeccion de componenetes criticos	D	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O							
4	Reemplazo programado	D	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O							
5	Control de variables operativas	D	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O							
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea									
		PROGRAMADO O					D: Diaria			S: Semanal			M: Mensual			
		CUMPLIDO X					T: Trimestral			C: Semestral			A: Anual			

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para el cliente 3 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia diaria cada hora el primer semestre, con el objetivo de detectar el deterioro rápido, identificar la degradación, evaluar el desgaste y evitar la falla.

Figura 19

Cronograma de actividades semanales para cliente 3, Basado en condición

PLAN DE MANTENIMIENTO													COD. 1		
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO										FECHA:			REALIZO:		
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Vibraciones	S	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
2	Temperatura	S	Operación	X	X	X	O	O	O						
3	Presion/caudal	S	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O						
Novedades:		Estado de la tarea						Frecuencia de la tarea							
		PROGRAMADO O						D: Diaria		S: Semanal			M: Mensual		
		CUMPLIDO X						T: Trimestral		C: Semestral			A: Anual		

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para el cliente 3 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia semana el primer semestre, Con el fin de alarmar lo cual nos permita intervención inmediata, sobre límite para hacer parada y desviación para hacer un ajuste operativo.

8.3.2. Conclusiones

Con estos cronogramas buscamos un resultado esperado los cuales son: evitar las fallas, controlar el desgaste extremo y optimizar reemplazos; estos cronogramas no dependen del cliente sino del comportamiento del equipo, en donde integramos monitoreo continuo y reemplazo programados antes del fallo.

Mientras el cliente 6 cuenta con un $\beta = 3.7351$, que como bien se sabe de acuerdo a la ponderación entra en lo que se llama un desgaste severo, por lo que es bien sabido que el equipo presenta una alta tasa de fallas con el tiempo, lo que indica que está en una fase avanzada de deterioro en estos escenarios la metodología RCM se enfoca en anticipar la falla y evitar eventos catastróficos.

Por lo cual recomendamos para este cliente las siguientes acciones:

1. Monitoreo de vibraciones
2. Termografía
3. Análisis de condición en tiempo real
4. Evaluar tendencia de degradación.

Para evitar un fallo critico en este caso debemos asegurar la continuidad operativa con las siguientes acciones:

1. Definir la criticidad del equipo
2. Mantener un stock de repuestos críticos
3. Establecer un plan de contingencia

En conclusión, para este cliente lo más esencial es que el mantenimiento sea predictivo y planificado, se deben evitar fallas inesperadas a toda costa y es clave anticiparnos y reemplazar antes de la falla; por lo cual recomendamos que dentro del RCM se contemple un monitoreo predictivo intenso y reemplazos programados para controlar el desgaste acelerado.

8.3.3. Cronograma de Actividades cliente 6

Estos cronogramas nos ayudan a dar un enfoque clave a la metodología RCM, ya que este cliente de acuerdo a los cálculos basado en WEIBULL, tiene una alta probabilidad de falla con el tiempo, se requiere un predictivo + reemplazo programado y realizar intervenciones del punto crítico.

Figura 20

Cronograma de actividades semanales para cliente 6, Monitoreo intensivo

PLAN DE MANTENIMIENTO													COD. 1			
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO											FECHA:			REALIZO:		
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO																
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES												
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC	
1	Inspeccion general	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
2	Medicion de vibraciones	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
3	Verificacion de temperatura	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
4	Control de presion/caudal	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
5	Termografia	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea									
		PROGRAMADO O					D: Diaria			S: Semanal			M: Mensual			
		CUMPLIDO X					T: Trimestral			C: Semestral			A: Anual			

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para el cliente 6 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia mensual todo el año, con el objetivo de detectar deterioro visible, identificar fallas incipientes, detectar sobrecalentamientos, estabilidad en la operación y detectar puntos calientes.

Figura 21

Cronograma de actividades semanales para cliente 6, Control de degradación

PLAN DE MANTENIMIENTO														COD. 1	
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO											FECHA:		REALIZO:		
COMPONENTE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Monitoreo de vibraciones	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O							
2	inspeccion de componenetes criticos	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O							
3	analsis de tendencia	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O							
4	Medicion de espesores (si aplica)	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O							
5	Revision de condiciones operativas	M	Mantenimineto	X	X	X	O	O							
Novedades:		Estado de la tarea					Frecuencia de la tarea								
		PROGRAMADO O					D: Diaria			S: Semanal			M: Mensual		
		CUMPLIDO X					T: Trimestral			C: Semestral			A: Anual		

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para el cliente 6 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia mensual el primer semestre, con el objetivo de hacer seguimiento de los daños, evaluar el desgaste, tener una proyección de la falla, control estructural y reducir el desgaste.

Figura 22

Cronograma de actividades semanales para cliente 6, Intervención programada

PLAN DE MANTENIMIENTO														COD. 1	
EQUIPO: UNIDAD DE VACIO										FECHA:		REALIZO:			
COMPONENETE: BOMBA DE VACIO															
ITEM	TAREA A REALIZAR	FRECUENCIA	RESPONSABLE	MES											
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCTU	NOV	DIC
1	Monitoreo de condicion	C	Mantenimineto						O						O
2	Evaluacion integral del equipo	C	Mantenimineto						O						O
3	Reemplazo de componene criticos	C	Mantenimineto						O						O
4	Auditoria de mantenimineto	C	Mantenimineto						O						O
Novedades:		Estado de la tarea						Frecuencia de la tarea							
		PROGRAMADO O						D: Diaria		S: Semanal		M: Mensual			
		CUMPLIDO X						T: Trimestral		C: Semestral		A: Anual			

Nota. Cronograma de actividades de mantenimiento propuesto para el cliente 6 de acuerdo con las estrategias definidas mediante la metodología RCM.

Este cronograma se debe ejecutar con una frecuencia semestral, con el objetivo realizar control continuo, definir los reemplazos, evitar las fallas y tener mejora continua.

8.3.4. Conclusiones

Con las actividades establecidas en los cronogramas buscamos evitar fallas catastróficas, obtener mayor confiabilidad y tener una reducción considerada en el desgaste acelerada, todo esto mediante actividades de monitoreo continuo y permitir intervenciones planificadas antes de que el equipo alcance su punto crítico de falla.

9. Matriz de ocurrencias

Tabla 16

Matriz escala de ocurrencias

NIVEL	DESCRIPCION	FRECUENCIA ESTIMADA	VALOR
Muy Baja	Falla Rara	> 2 Años	1
Baja	Falla poco frecuente	1 vez al año	2
Media	Falla ocasional	2 - 4 Veces al año	3
Alta	Falla frecuente	Mensual	4
Muy alta	Falla muy frecuente	Semanal/Diaria	5

Nota. La presente matriz establece la escala de ocurrencia de fallas, permitiendo clasificar la probabilidad de los eventos según su frecuencia estimada.

Tabla 17

Ocurrencias asignadas a los valores beta

β	TIPO DE FALLA	OCURRENCIA ASIGNADA
$\beta < 1$	Fallas tempranas	3 – 4
$\beta \approx 1$	Aleatoria	2 – 3
$1 < \beta < 2$	Desgaste inicial	3 – 4
$2 < \beta < 3$	Desgaste inicial	4
$\beta > 3$	Desgaste severo	5

Nota. Matriz donde se relaciona el parámetro β de la distribución de Weibull, con el tipo de falla y su nivel de ocurrencia.

Tabla 18*Ocurrencias asignadas a los clientes*

CLIENTE	$\beta \approx$	OCURRENCIA
Cliente 2	0,87	3
Cliente 4	0,87	3
Cliente 5	0,77	4
Cliente 1	1,94	4
Cliente 7	1,52	3
Cliente 6	3,73	5
Cliente 3	24	5

Nota. Asignación de niveles de ocurrencia de acuerdo al valor β , obtenido en el análisis Weibull.

9.1. Explicación de las Matrices de ocurrencias.

Estas Matrices permiten clasificar la probabilidad de falla de un equipo, facilitando la priorización dentro de la metodología RCM. Esta clasificación se respalda con el análisis de la distribución de Weibull realizada, ya que el parámetro β refleja el comportamiento de las fallas de los equipos en el tiempo.

9.1.1. Nivel 1 – Muy Baja Ocurrencia

En este escenario la probabilidad de falla es mínima y los eventos son poco frecuentes o excepcionales.

El equipo presenta alta confiabilidad y estabilidad operativa; pero las fallas cuando ocurren están asociadas a eventos externos o condiciones no recurrentes; por lo cual para el RCM este no requiere de:

- Mantenimiento intensivo.

- Puede manejarse con mantenimiento correctivo controlado.

9.1.2. Nivel 2 – Baja ocurrencia

Acá las fallas ocurren ocasionalmente, pero no afectan significativamente la operación; el equipo tiene un comportamiento relativamente estable, con baja tasa de fallas. las recomendaciones para el RCM son:

- Mantenimiento Básico.
- Inspecciones Periódicas.

9.1.3. Nivel 3 – Ocurrencia media

Las fallas presentadas en este nivel suelen presentarse de forma casual con cierta regularidad. Puede que el equipo este entrando en una fase donde el deterioro y las condiciones operativas variables ocasionen la falla. Por lo cual para el RCM recomendamos que:

- Implementar mantenimiento preventivo
- Monitoreo de condición

9.1.4. Nivel 4 – Alta ocurrencia

Las fallas ya son de manera frecuente y estas afectan la continuidad operativa, puede que exista algún proceso de degradación activo, ya sea por desgaste o problema recurrentes en el sistema. Para el RCM recomendamos lo siguiente:

- Mantenimiento preventivo intenso.
- Análisis Causa Raíz.
- Ajustes de condiciones operativas.

9.1.5. Nivel 5 – Muy alta ocurrencia

En este nivel los equipos presentan fallas constantes o muy recurrentes, con un alto impacto en la operación generando paros de las líneas de producción o algunos de otros procesos anidados a estos equipos; el equipo presenta estado crítico, asociado al desgaste severo o a fallas sistemáticas. Es importante que en el RCM cuente con:

- Mantenimiento predictivo
- Gestión del riesgo
- Rediseño del sistema (de ser necesario).

9.2. Conclusiones

- No se justifica un mantenimiento intensivo en niveles de baja ocurrencia debido a que es suficiente con un enfoque básico con inspecciones periódicas y correctivo controlado.
- Es necesario implementar mantenimiento preventivo si la ocurrencia es media, acompañado de monitoreo para evitar que el sistema evolucione hacia estados más críticos.
- Se requiere un mantenimiento preventivo intenso, cuando los niveles de ocurrencia son altos, esto acompañado de un análisis de causa raíz para y la optimización de las condiciones operativas.
- Es indispensable para niveles de muy alta ocurrencia, estrategias predicativas, reemplazos programados y gestión de riesgo para evitar fallas catastróficas.

- Los niveles de ocurrencia permiten clasificar el comportamiento de la falla de los equipos y definir estrategias de mantenimiento diferenciadas, priorizando los activos críticos y optimizando la confiabilidad.

9.3. Análisis AMFE

Tabla 19

Matriz AMFE Sistemas de transporte neumáticos/bomba de vacío.

ITEM	MODO DE FALLA	EFEECTO DE FALLA	CAUSA RAIZ	ACCION RCM RECOMENDADA
1	Desgaste de rodamientos	Vibraciones, ruido, pérdida de eficiencia	Lubricación deficiente, fatiga	Monitoreo de vibraciones + lubricación programada
2	Desalineación de ejes	Desgaste acelerado, fallas mecánicas	Montaje incorrecto, mala instalación	Alineación periódica + control en instalación
3	Sobrecalentamiento	Parada del equipo, daño en componentes	Sobrecarga, mala ventilación	Monitoreo de temperatura + control operativo
4	Fugas en sistema neumático	Pérdida de presión, baja eficiencia	Sellos defectuosos, conexiones sueltas	Inspecciones frecuentes + ajuste de conexiones
5	Lubricación deficiente	Desgaste acelerado, fricción excesiva	Falta de mantenimiento, error humano	Plan de lubricación + capacitación
6	Operación fuera de diseño	Fallas prematuras, bajo rendimiento	Mala operación, variabilidad del proceso	Estandarización operativa + control de parámetros
7	Contaminación del sistema	Obstrucciones, desgaste interno	Ingreso de partículas o humedad	Filtración + limpieza programada
8	Fatiga de materiales	Rotura de componentes	Cargas cíclicas, vida útil agotada	Reemplazo programado (Hard Time)
9	Obstrucción en tuberías	Reducción de flujo, sobrepresión	Acumulación de material	Limpieza periódica + inspección
10	Fallas en sellos	Pérdida de vacío/presión	Desgaste, mala instalación	Reemplazo periódico + inspección

Nota. Matriz AMFE la cual permite identificar y analizar los modos de falla, sus efectos y causas raíz, facilitando la toma de decisiones en mantenimiento mediante la priorización de riesgo dentro de la metodología RCM. Diseño propio.

Mediante la matriz AMFE y el análisis de Weibull realizado, organizamos los ítems de acuerdo al valor del parámetro β , con el fin de alinear la información real con la matriz, esta se distribuye de la siguiente manera:

- $\beta < 1$; ítems 2,4,5,6 (Instalación/operación).
- $1 < \beta < 2$; ítems 1, 3, 10 (Desgaste inicial).
- $\beta > 3$; ítems 1, 8 (Fatigas y fin de vida).

Con esta ponderación la matriz AMFE, nos permite estructurar el análisis de fallas, facilitando la toma de decisiones en mantenimiento al relacionar causas, efectos y acciones bajo un enfoque de confiabilidad.

10. Matriz RCM bombas de vacío

Tabla 20

Matriz RCM – Bombas de Vacío con nivel de riesgo

FUNCION DEL SISTEMA	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFEECTO DE FALLA	CONSECUENCIA	O	C	NIVEL DEL RIESGO (O×C)	ESTRATEGIA RCM	TAREA RECOMENDADA	COSTO
Generar vacío adecuado	No genera vacío	Fugas en el sistema	Pérdida total de presión	Parada del proceso	4	5	20	Preventivo	Inspección de fugas	\$ 1.600.000
Generar vacío adecuado	Bajo nivel de vacío	Desgaste de rodamientos	Baja eficiencia	Baja productividad	4	4	16	Predictivo	Análisis de vibraciones	\$ 6.500.000
Generar vacío continuo	Operación intermitente	Sobrecalentamiento	Paradas inesperadas	Daño en componentes	3	5	15	Predictivo	Monitoreo de temperatura	\$ 3.000.000
Generar vacío estable	Variación de presión	Obstrucción en líneas	Flujo irregular	Afectación del proceso	3	4	12	Preventivo	Limpieza de tuberías	\$ 2.500.000

Operar eficientemente	Alto consumo energético	Fugas / mala operación	Ineficiencia	Costos elevados	4	3	12	Proactivo	Optimización operativa	\$ 15.250.000
Mantener integridad mecánica	Fallo mecánico	Fatiga de materiales	Rotura	Parada total	5	5	25	Predictivo / Reemplazo	Cambio programado	\$ 25.000.000
Mantener sellado del sistema	Pérdida de vacío	Fallas en sellos	Fugas internas	Baja eficiencia	4	4	16	Preventivo	Reemplazo de sellos	\$ 5.400.000
Operar dentro de parámetros	Operación fuera de rango	Error operativo	Sobrecarga	Daño del equipo	3	4	12	Proactivo	Capacitación operativa	< \$60.000.000

Nota. Análisis de funciones, fallas funcionales, modos de falla y recomendaciones. Fuente. Propia.

Tabla 21

Matriz RCM – complemento interpretación nivel del riesgo

VALOR	NIVEL	ACCION
1 – 5	Bajo	Control básico
6 – 10	Medio	Seguimiento
11 – 17	Alto	Intervención
18 – 25	Crítico	Acción inmediata

Nota. Tipificación del riesgo de acuerdo al rango del valor. Fuente. Propia.

Dentro de la matriz de RCM se incorpora el nivel de riesgo mediante la combinación de la ocurrencia y la consecuencia ($O \times C$), lo cual nos permite priorizar los modos de falla más críticos y orientar las estrategias de mantenimiento dentro del enfoque RCM; esto nos permite enfocar los recursos en los modos de falla con mayor impacto en la operación y la confiabilidad del sistema.

11. Análisis económico estructurado de la propuesta del RCM

Tabla 22 Costo sin RCM y con RCM Propuesto

Matriz costos RCM propuesto

Concepto	Escenario Sin RCM (Reactivo)	Escenario Con RCM (Propuesto)
Estrategia Dominante	Reparar tras la falla (Correctivo)	Preventivo / Predictivo / Proactivo
Costo de Tareas	\$0 (Inversión inicial baja)	\$59.250.000 (Suma matriz RCM)
Impacto en Producción	Frecuentes "Paradas Totales"	Paradas programadas y controladas
Riesgo Económico	Alto (Basado en Criticidad 25)	Mitigado (Reducción de severidad/ocurrencia)

Nota. Comparación del escenario de mantenimiento reactivo sin RCM frente al escenario propuesto con RCM.

En es la matriz (Tabla 22) y (Tabla 20), evidenciamos lo siguiente:

1. Relación costo – Beneficio en alta criticidad: el costo de \$25M en la tarea de “Cambio Programado” en la matriz RCM, es considerado elevado, pero a su vez es marginal comparado con el costo de una “Rotura/Parata Total” (consecuencia nivel 5). El RCM acá demuestra que prevenir es más barato que colapsar.
2. Retorno por eficiencia energética: La tarea de “Optimización operativa” y “Capacitación” ataca directamente los “Costos elevados” de energía. Esto no solo mejora la confiabilidad, sino que reduce directamente el OPEX (Gasto Operativo).
3. Reducción de incertidumbre: Al pasar de un riesgo de 25 a tareas predictivas (Análisis de Vibraciones de \$6,5M), transformamos una falla catastrófica impredecible en una intervención planificada mucho más económica.

Con lo anterior sustentamos que la propuesta de RCM, requiere de una inversión operativa aproximada de \$60M en tareas específicas de mantenimiento. Este monto justifica económicamente al mitigar los modos de falla de alta criticidad (nivel 20-25) que actualmente derivan en PARADAS TOTALES, cuyo costo por lucro cesante supera ampliamente la inversión anual en tareas predictivas y preventivas.

11.1. Evaluación del riesgo económico

En la matriz RCM (Tabla 20), se identifican dos fallas con nivel de riesgo (20 y 25); las cuales son “fugas del sistema” y “fatiga de materiales”. Ambas provocan una parada total.

- Costo de Falla Catastrófica (CFC): Si una reparación mayor tarda 8 horas, el costo es de \$80M.
- Frecuencia (O): de acuerdo a la columna O, la fatiga de materiales tiene una ocurrencia de 5 (muy alta). Si esto ocurre 2 veces al año, el costo anual por la falla es de \$160M

Tabla 23 Costos beneficio

Matriz análisis costo beneficio

Concepto	Costo con RCM (Propuesta)	Riesgo Evitado (Ahorro)
Cambio Programado	\$ 25.000.000	\$160.000.000 (Evita paradas totales)
Inspección de Fugas	\$ 1.600.000	\$80.000.000 (Evita parada de proceso)
Análisis de Vibraciones	\$ 6.500.000	\$20.000.000 (Evita baja productividad)
SUBTOTAL	\$ 33.100.000	\$ 260.000.000

Nota. Comparación de los costos asociados a las actividades de mantenimiento propuestas mediante RCM frente al impacto económico estimado de las fallas evitadas, considerando cambios programados, inspección de fugas y análisis de vibraciones.

Esta matriz nos muestra la comparación del riesgo contra el costo de las tareas que se propusieron en la Matriz RCM (Tabla 20).

Para la estructuración de análisis económico y respaldar todo lo anterior de la propuesta del RCM en su estructuración económica incluimos lo siguiente:

- Ahorro neto estimado:

$$Ahorro = RiesgoEvitado - CostoRCM$$

$$Ahorro = \$260M - \$33.1M = \$226.9M$$

Este es el valor que el modelo propuesto le devuelve a la empresa.

- Retorno de la Inversión (ROI):

$$ROI = \frac{\$226.9M}{\$33.1M} \approx 6.85$$

Por cada peso invertido en mantenimiento basado en confiabilidad, la empresa recupera \$6,85 al evitar fallas.

- Relación Costo de Tarea vs. Consecuencia: en este caso de la fatiga de materiales, la tarea cuesta \$25M, mientras que la consecuencia es de \$80M. Esto evidencia que el costo de la tarea es apenas un 31% del costo del fallo, validando económicamente la estrategia de “Cambio Programado”.

De este análisis económico estructurado podemos evidenciar que la implementación del modelo RCM reduce la exposición al riesgo financiero de la planta. Mientras el costo total de las intervenciones preventivas y predictivas sugeridas en la matriz RCM (Tabla 20). Ascende a aproximadamente \$60M (incluyendo optimización operativa), el impacto económico de una sola

parada total no programada superaría los \$80M. por tanto, el modelo no solo mejora la confiabilidad técnica, sino que garantiza una rentabilidad sobre la inversión (ROI) superaría al 600% al mitigar los modos de falla críticos identificados.

12. Conclusiones

A partir del desarrollo de la presente monografía, en el cual se aplicaron herramientas de análisis de confiabilidad y la metodología RCM en sistemas de transporte neumático, se obtuvieron resultados que permiten evaluar el comportamiento de falla de los equipos y la efectividad de las estrategias de mantenimiento propuestas. En este contexto, se presentan las principales conclusiones derivadas del estudio realizado.

1. La aplicación de la metodología RCM permitió establecer un enfoque estructurado para la gestión del mantenimiento en sistemas de transporte neumático, facilitando la identificación de funciones, fallas y modos de falla de las bombas de vacío.
2. El análisis de confiabilidad basado en la distribución de WEIBULL, permitió caracterizar el comportamiento de falla de los equipos, identificando patrones asociados a fallas tempranas, fallas aleatorias y desgaste, lo que resulto clave para la toma de decisiones.
3. La clasificación de los equipos según el parámetro β evidencio que las falla no presentan un comportamiento uniforme, lo que justifica la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento diferenciadas en lugar de un enfoque generalizado.
4. La construcción de la matriz de ocurrencia permitió cuantificar la frecuencia de fallas, facilitando su integración con la evaluación de consecuencias para determinar el nivel de riesgo mediante el indicador $O \times C$.
5. La aplicación del análisis AMFE permitió identificar de manera sistemática los modos de falla, sus efectos y causas raíz, proporcionando una base técnica sólida para la definición de acciones de mantenimiento alienadas con el enfoque RCM.

6. La incorporación del nivel del riesgo permitió priorizar los modos de falla más críticos, optimizando la asignación de recursos y enfocando las intervenciones en aquellos eventos con mayor impacto.
7. Las estrategias de mantenimiento definidas (Proactivo, preventivo, predictivo y reemplazo de programa), demostraron ser coherentes con el comportamiento de falla identificada, permitiendo mejorar la confiabilidad y reducir la probabilidad de fallas críticas.
8. El diseño de cronogramas de mantenimiento adaptados a cada tipo de comportamiento (incluyendo esquemas dinámicos basado en condición y vida útil), permitió una gestión más eficiente, superando los enfoques tradicionales basado únicamente en tiempo.
9. Se evidencio que la integración de herramientas como Weibull, AMFE y matrices de riesgo fortalece la toma de decisiones en mantenimiento, permitiendo una transición efectiva desde un enfoque reactivo hacia uno basado en confiabilidad.
10. Finalmente, el trabajo demuestra que la implementación de un modelo de mantenimiento basado en RCM contribuye significativamente a la mejora de la disponibilidad, reducción de fallas y optimización de costos en sistemas de transporte neumático.
11. La aplicación integrada del análisis de confiabilidad la evaluación de riesgo y la metodología RCM, permite establecer un modelo de mantenimiento eficiente y técnicamente sustentado, capaz de mejorar el desempeño operativo y la gestión de activos en sistemas industriales.

13. Recomendaciones

Con base a los resultados obtenidos y el análisis desarrollado mediante la aplicación de la metodología RCM, se plantea a continuación una serie de recomendaciones, orientadas a mejorar la confiabilidad, optimizar la gestión del mantenimiento y fortalecer el desempeño operativo de los equipos evaluados.

1. implementar de manera formal la metodología RCM en los sistemas de transporte neumático, asegurando la integración de todas sus etapas, desde la identificación de funciones hasta la definición de tareas de mantenimiento.
2. Mantener la aplicación del análisis de confiabilidad mediante la distribución de Weibull de forma periódica, con el fin de actualizar el comportamiento de falla de los equipos y ajustar las estrategias de mantenimiento según su evolución.
3. Fortalecer los procesos de recolección y gestión de datos históricos de fallas, ya que la calidad de la información es fundamental para obtener resultados confiables en los análisis realizados.
4. Implementar programas de monitoreo de condición (vibraciones, temperatura, presión), en los equipos críticos, permitiendo la detección temprana de fallas y la transición hacia un mantenimiento predictivo.
5. Capacitar al personal al personal operativo y de mantenimiento en buenas prácticas de operación e instalación, con el fin de reducir fallas tempranas asociadas a errores humanos o condiciones inadecuadas.
6. Establecer cronogramas de mantenimiento dinámico basado en condición y vida útil, especialmente en equipos con comportamientos de desgaste acelerado, evitando enfoques tradicionales basados únicamente en tiempo.

7. Priorizar las intervenciones de mantenimiento mediante la evaluación de nivel de riesgo (O x C), enfocando los recursos en los modos de falla con mayor impacto en la operación.
8. Realizar un análisis de causa raíz (RCA), para las fallas críticas, con el objetivo de eliminar su origen y evitar recurrencias en los sistemas.
9. Evaluar periódicamente el desempeño del sistema de mantenimiento mediante indicadores de gestión, como disponibilidad, MTBF y números de fallas, con el fin de verificar la efectividad del modelo implementado.
10. Considerar la posibilidad de rediseño o mejora de componentes en aquellos casos donde se evidencie desgaste severo o condiciones de operación que superen los límites del diseño.

Referencias bibliográficas

- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. D. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, Artículo 106024.
- Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3–8.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press Inc.
- SAE International. (2009). Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes (SAE JA1011).
- Smith, A. M., & Hawkins, B. (2004). *Lean maintenance: Reduce costs, improve quality, and increase market share*. Elsevier.