



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Estudio de confiabilidad aplicado a equipos de producción química para el diseño de nuevos planes de mantenimiento**

**Johan Alexis Saldarriaga Rendón**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Medellín, Colombia  
2017

# **Estudio de confiabilidad aplicado a equipos de producción química para el diseño de nuevos planes de mantenimiento**

**Johan Alexis Saldarriaga Rendón**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Mecánica**

Director:

Ph.D Fernando Jesús Guevara Carazas

Codirector:

Especialista, Daniel Alejandro Castañeda Quesada

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Medellín, Colombia  
2017

## **Agradecimientos**

Al profesor Fernando Jesús Guevara, por la confianza y el tiempo depositado durante el desarrollo del presente trabajo.

Al profesor Daniel Alejandro Quesada por su compromiso y valioso apoyo en mi proceso de aprendizaje.

A Juan Felipe Yepes jefe del área de ingeniería de la empresa donde trabajo por su valiosa colaboración y disposición con la información analizada.

Finalmente, doy mi más sincero agradecimiento a mi familia por todo el apoyo, el ánimo y la motivación recibida durante este duro camino de un nuevo aprendizaje.

## Resumen

En el presente trabajo, se desarrolla un estudio de confiabilidad para el sistema de lavado y purificado de la carboximetilcelulosa de sodio. A partir del histórico de fallas son analizados por separado cada uno de los subsistemas involucrados en esta etapa del proceso. Por tanto, se analiza la confiabilidad del sistema general y a partir de los resultados obtenidos, se desarrolla un análisis más detallado del subsistema menos confiable, mediante métodos de análisis como diagrama de bloques, modos y efectos de falla (FMEA), causa raíz, ente otros. Finalmente, se diseña un plan de mantenimiento ajustado a las necesidades del proceso, el cual permitirá aumentar la confiabilidad del sistema general.

**Palabras clave:** Carboximetilcelulosa CMC, Análisis de modos y efectos de falla, Tiempo medio entre fallas, Tiempo medio hasta la falla, Número de riesgo prioritario.

## Abstract

In this work, a reliability study for the washing and purification system of the carboxymethylcellulose of sodium is developed. Based on the failure registry, each subsystem involved in the washing and purification stage of the process is analyzed separately. In this regard, the reliability of the entire system and through the obtained results, a detailed analysis of the least reliable subsystem is developed, using analysis methods like block diagrams, failure modes and effects analysis (FMEA), root cause, among others. Finally, a maintenance plan is designed, which is adjusted to the process needs and will allow the reliability of the whole system to increase.

**Keywords:** Carboximetilcelulosa CMC, Análisis de modos y efectos de falla, Tiempo medio entre fallas, Tiempo medio hasta la falla, Número de riesgo prioritario.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>4</b>
<b>Lista de gráficos .....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>10</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivo general .....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
1.3 Descripción del trabajo.....	15
<b>2 Mantenimiento basado en confiabilidad .....</b>	<b>16</b>
2.1 Antecedentes .....	16
2.1.1 Tipos de mantenimiento .....	17
2.2 Marco teórico .....	19
2.3 Métodos de confiabilidad.....	21
2.3.1 Diagramas de bloques.....	21
2.3.2 Análisis de modos y efectos de fallas (FMEA) .....	22
2.4 Otros métodos.....	24
2.4.1 Análisis de criticidad .....	24
2.4.2 Diagramas de causa y efecto .....	25
2.5 Fundamentos teóricos.....	26
2.5.1 Confiabilidad.....	26
2.5.2 Tasa de falla o función de riesgo .....	27
2.5.3 Probabilidad de falla .....	28
2.5.4 Mantenibilidad .....	28
2.6 Distribuciones estadísticas .....	29
2.6.1 Distribución normal.....	35
2.6.2 Distribución log normal .....	38
2.6.3 Distribución exponencial.....	29
2.6.4 Distribución Weibull .....	32
<b>3 Descripción del problema .....</b>	<b>41</b>
3.1 Descripción del proceso .....	41
3.2 Problema a resolver .....	43

---

3.2.1	Planteamiento del problema .....	43
3.2.2	Análisis del sistema de lavado y filtrado.....	46
3.2.3	Descripción de los subsistemas principales .....	48
3.3	Análisis del histórico de fallas.....	49
<b>4</b>	<b>Propuesta metodológica .....</b>	<b>53</b>
4.1	Aplicación cualitativa de las herramientas de análisis .....	53
4.1.1	Análisis funcional.....	53
4.1.2	Definición de componentes en el subsistema .....	53
4.1.3	Componentes del subsistema de vacío .....	54
4.1.4	Análisis de confiabilidad .....	57
4.1.5	Aplicación Distribución exponencial.....	57
4.1.6	Aplicación Distribución Weibull .....	58
4.2	Aplicación cuantitativa de las herramientas de análisis .....	66
4.2.1	Diagrama de bloques.....	66
4.2.2	Aplicación del análisis de modos y efectos de fallas (FMEA) .....	72
4.2.3	Identificación y evaluación de riesgos.....	72
4.2.4	Análisis de causa raíz.....	76
<b>5</b>	<b>Propuesta de plan de mantenimiento.....</b>	<b>85</b>
5.1	Generalidades de la implementación .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>95</b>
6.1	Conclusiones .....	95
6.2	Recomendaciones .....	97
<b>A.</b>	<b>Anexo: Análisis de modos y efectos de falla del subsistema de vacío. ....</b>	<b>98</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>111</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Configuración de bloques en serie.....	22
Figura 2-2: Configuración de bloques en paralelo.....	22
Figura 2-3: Esquema del FMEA Tomado de (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008). .....	24
Figura 2-4: Curva de la bañera para el ciclo de vida de un activo (Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, 2009). .....	28
Figura 2-5: Función de densidad de una distribución exponencial estándar. ....	30
Figura 2-6: Función de distribución exponencial. ....	31
Figura 2-7: Función de confiabilidad de una distribución exponencial.....	31
Figura 2-8: Tasa de falla de una exponencial (Navarrete Muela, 2014). ....	32
Figura 2-9: Función de densidad de una distribución Weibull. ....	33
Figura 2-10: Función de distribución Weibull. ....	33
Figura 2-11: Función de confiabilidad de una distribución Weibull. ....	34
Figura 2-12: Tasa de falla de una distribución Weibull (Navarrete Muela, 2014).....	34
Figura 2-13: Distribución normal. ....	36
Figura 2-14: Función de distribución acumulada.....	36
Figura 2-15: Distribución de confiabilidad de una normal (Navarrete Muela, 2014).....	37
Figura 2-16: Distribución log normal. ....	38
Figura 2-17: Función de distribución acumulada de un log normal.....	39
Figura 2-18: Distribución de confiabilidad de una log normal (Navarrete Muela, 2014). ...	39
Figura 2-19: Tasa de falla de una distribución log normal (Navarrete Muela, 2014).....	40
Figura 3-1: Descripción del proceso de producción de CMC (Pacheco, 2002).....	41
Figura 3-2: Fallas presentadas por los equipos de línea de purificado desde el 2010.....	45
Figura 3-3: Fallas generadas entre los años 2014 – 2016. ....	46
Figura 3-4: Esquema del filtro de banda horizontal con múltiples etapas de lavado y recirculación. ....	47
Figura 3-5: Representación del subsistema de vacío, tomado de (Catalogo_pompetravaini).....	48
Figura 3-6: Histórico de fallas presentadas por el sistema general. ....	50
Figura 3-7: Fallas totales por subsistema.....	51

---

Figura 4-1: Árbol funcional del sistema de vacío.....	56
Figura 4-2: Regresión exponencial del sistema empírico.....	59
Figura 4-3: Confiabilidad exponencial del sistema empírico.....	59
Figura 4-4: Regresión Weibull del sistema empírico.....	60
Figura 4-5: Confiabilidad Weibull del sistema empírico.....	60
Figura 4-6: Diagrama de caja de los tiempos atípicos entre falla.....	60
Figura 4-7: Regresión exponencial del sistema ajustado.....	61
Figura 4-8: Confiabilidad exponencial del sistema ajustado.....	61
Figura 4-9: Regresión Weibull del sistema ajustado.....	62
Figura 4-10: Confiabilidad Weibull del sistema ajustado.....	62
Figura 4-11: Regresión Weibull ajustada y no ajustada.....	64
Figura 4-12: Regresión exponencial con $R^2 = 0.5616$ .....	65
Figura 4-13: Esquema general del sistema de lavado y filtración.....	66
Figura 4-14: Diagrama de bloques por subsistemas para el equipo de lavado y filtración.....	67
Figura 4-15: Confiabilidad sistema de vacío en 1400 h de operación.....	69
Figura 4-16: Confiabilidad sistema de alimentación en 1400 h de operación.....	69
Figura 4-17: Confiabilidad sistema de lavado en 1400 h de operación.....	69
Figura 4-18: Confiabilidad sistema de transporte en 1400 h de operación.....	69
Figura 4-19: Confiabilidad sistema neumático en 1400 h de operación.....	70
Figura 4-20: Confiabilidad del sistema general en el tiempo t (h).....	71
Figura 4-21: Matriz de criticidad para los modos de fallo presentados en el AMFE, tomado de (Mora Gutiérrez, 2009).....	76
Figura 4-22: Análisis causa raíz para fallas en vacío, mangueras de vacío rotas.....	77
Figura 4-23: Análisis causa raíz para fallas en vacío, sellos mecánicos.....	81
Figura 5-1: Análisis de caja negra para el subsistema de vacío.....	86
Figura 5-2: Análisis de caja blanca para el subsistema de vacío.....	87
Figura 5-3: Funcionalidad de los componentes del sistema de vacío.....	87

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Evolución del mantenimiento (Deshpande y Modak, 2001; Moubray, 2004). ..	17
Tabla 2-2: Componentes de un programa de mantenimiento (Ali Ebrahimi, 2010; Afefy, 2010). .....	18
Tabla 3-1: Total de fallas asociadas a cada subsistema. ....	50
Tabla 4-1: Parámetros de distribución de confiabilidad para Exponencial empírico. ....	59
Tabla 4-2: Parámetros de distribución de confiabilidad para Weibull empírico. ....	59
Tabla 4-3: Parámetros de distribución de confiabilidad para exponencial ajustada. ....	61
Tabla 4-4: Parámetros de distribución de confiabilidad para Weibull ajustada. ....	61
Tabla 4-5: Fallas críticas reportadas en el histórico para la bomba de vacío con fuga. ....	74
Tabla 4-6: Fallas críticas reportadas en el histórico para la bomba de vacío pegada. ....	74
Tabla 4-7: Fallas críticas reportadas en el histórico para la bomba de recirculación. ....	75
Tabla 4-8: Fallas críticas reportadas en el histórico para falla en vacío. ....	75
Tabla 4-9: Análisis causa raíz para las mangueras de aspiración rotas. .. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 4-10: Análisis causa raíz para sellos mecánicos rotos. ....	82
Tabla 5-1: Plan de mantenimiento para el subsistema de vacío parte1.... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 5-2: Plan de mantenimiento para el subsistema de vacío parte 1.2.....	90
Tabla 5-3: Plan de mantenimiento para el subsistema de vacío parte 1.3.....	91
Tabla 5-4: Plan de mantenimiento para el subsistema de vacío parte 1.4.....	92
Tabla 5-5: Plan de mantenimiento para el subsistema de vacío parte 1.5.....	93
Tabla 5-6: Plan de mantenimiento para el subsistema de vacío parte 1.6.....	94
Tabla 6-1: Severidad propuesta por el manual de referencia Análisis de modos y efectos de falla (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008). ....	99
Tabla 6-2: Ocurrencia propuesta por el manual de referencia Análisis de modos y efectos de falla (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008). ....	100
Tabla 6-3: Detección propuesta por el manual de referencia Análisis de modos y efectos de falla (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008). ....	102

---

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
---------	---------

---

$R(t)$	Confiabilidad
--------	---------------

$F(t)$	Función de probabilidad acumulada de falla
--------	--

$h(t)$	Tasa de falla
--------	---------------

$f(t)$	Función de densidad
--------	---------------------

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
---------	---------

---

$\mu$	Media estándar para la distribución
-------	-------------------------------------

$\sigma$	Desviación estándar para la distribución
----------	--

$\lambda(t)$	Tasa de falla
--------------	---------------

$\beta$	Parámetro de forma para la distribución Weibull
---------	---

$\eta$	Parámetro de escala para la distribución Weibull
--------	--

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>MTTR</i>	Tiempo medio entre fallas
<i>MTBF</i>	Tiempo medio hasta la falla
<i>AMEF</i>	Análisis de modos y efectos de falla
<i>SAE</i>	Sociedad de Ingenieros de Automoción
<i>RBM</i>	Mantenimiento basado en confiabilidad
<i>RCM</i>	Mantenimiento centrado en confiabilidad
<i>CMC</i>	Carboximetilcelulosa de sodio
<i>NPR</i>	Número de riesgo prioritario

# 1 Introducción

En la actualidad, las empresas están invirtiendo en la modernización de sus procedimientos, con el fin de aumentar y mejorar los procesos productivos, garantizando la calidad del proceso y el producto (Tejeda, 2011). Esto se debe, a que cada vez son más las exigencias tanto de la normativa vigente como de las empresas compradoras, lo cual conlleva a que las empresas apuesten a mantener sus activos en operación continua con el objetivo de cumplir con los pedidos solicitados por los clientes. Sin embargo, dicha operación en el tiempo genera un fuerte desgaste en los equipos que no son intervenidos oportunamente, de manera que ha surgido la necesidad de desarrollar métodos de análisis enfocados en mantener la confiabilidad y disponibilidad de los activos.

Para cumplir con lo anterior, muchas empresas se han apoyado en el análisis de datos para llevar a cabo la implementación de estudios estadísticos que permitan mejorar sus procesos, con el propósito de identificar la causa puntual de las fallas, dado que, en la mayoría éstas son principalmente asociadas a las variaciones presentes durante su operación. De aquí, que los análisis estadísticos se hayan convertido en pieza fundamental para el desarrollo de nuevas técnicas de mantenimiento, que involucren la gestión de activos y el análisis de fallas como lo hace el Mantenimiento centrado en confiabilidad, del inglés Reliability Centred Maintenance (RCM) (Rausand y Høyland, 2004).

Ahora bien, con el avance en las técnicas basadas en análisis estadísticos y debido al largo trabajo que se necesita para lograr implementar técnicas como el RCM, muchas empresas optan por realizar estudios de confiabilidad, como técnica empleada para evaluar la probabilidad de que los equipos fallen bajo condiciones específicas durante tiempos prolongados de uso continuo, y de esta forma desarrollar las herramientas necesarias que permitan implementar planes de mantenimiento más acordes a su proceso operativo.

En este mismo contexto, en el presente trabajo de tesis se desarrolló un estudio para determinar la confiabilidad de los equipos periféricos involucrados en el proceso de lavado y purificado de la carboximetilcelulosa de sodio (CMC). En la cual, se analizaron los modos de falla del subsistema de análisis y la confiabilidad del sistema general y de sus subsistemas, a partir de históricos de fallas, mediante el uso de algunas de las técnicas más usadas en los estudios de confiabilidad como son los diagramas de bloques y el análisis de modos y efectos de falla, del inglés FMEA. Por consiguiente, de acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio de confiabilidad, se desarrolló un nuevo plan de mantenimiento enfocado en disminuir las fallas del subsistema analizado y por tanto al sistema general.

## **1.1 Objetivo general**

Desarrollar un estudio de confiabilidad para los equipos periféricos involucrados en el lavado y purificado de la carboximetilcelulosa de sodio (CMC) usado en empresas de la industria alimenticia.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar un análisis detallado del historial de fallas para determinar la confiabilidad de los subsistemas pertenecientes al sistema.
- Analizar diferentes métodos de análisis de confiabilidad para determinar las causas potenciales que puedan generar paros indeseados de la planta.
- Desarrollar un estudio de análisis de modos y efectos de falla (FMEA) para identificar las fallas funcionales de los subsistemas principales del equipo de estudio basado en la norma SAE J-1739.
- Identificar y analizar los modos potenciales de falla del sistema para prevenir su ocurrencia y minimizar sus efectos.
- Realizar un análisis de criticidad a los subsistemas involucrados en el lavado y purificado de CMC para identificar los puntos críticos del sistema a trabajar.
- Desarrollar un plan de mantenimiento que se ajuste a las necesidades encontradas en el desarrollo de la metodología aplicada en el caso de estudio.

## **1.3 Descripción del trabajo**

### **Capítulo 1**

En este capítulo, se hace una breve introducción al mantenimiento basado en confiabilidad, se da a conocer el objetivo general del caso de estudio y los objetivos específicos.

### **Capítulo 2**

En este capítulo, se describen los diferentes métodos de análisis más usados en la literatura para estudios de mantenimiento basado en confiabilidad. Estudios como diagrama de bloques, análisis de modos y efectos de fallas, análisis de criticidad. Además, se describen las diferentes distribuciones estadísticas usadas para el análisis de datos de falla.

### **Capítulo 3**

Este capítulo, se enfoca en describir el proceso productivo de la planta, así como también describir y analizar tanto el sistema y sus subsistemas complementarios como el histórico de fallas.

### **Capítulo 4**

El contenido de este capítulo se enfoca en el análisis cualitativo y cuantitativo del sistema, el cual describe las herramientas y métodos de análisis a aplicar.

### **Capítulo 5**

En este capítulo, se plantea una propuesta de un nuevo plan de mantenimiento acorde a los resultados encontrados en el estudio realizado.

### **Capítulo 6**

Finalmente, en este capítulo, se describen las conclusiones y las propuestas de mejora.

## 2 Mantenimiento basado en confiabilidad

### 2.1 Antecedentes

Históricamente, el mantenimiento en la industria se ha visto influenciado por las necesidades de mantener los equipos que intervienen en la línea de producción en perfecto estado funcional, es por esto, que con el paso del tiempo las nuevas generaciones han diseñado nuevas técnicas para reducir las intervenciones y aumentar la disponibilidad de sus activos.

De aquí, que el término mantenimiento en las empresas, haya evolucionado con el pasar de tres generaciones.

**Primera generación (1940 - 1950).** Durante este periodo, los equipos pertenecientes a los procesos eran simples, sobre diseñados y fáciles de operar; las intervenciones solo se hacían en el momento que se presentaba la falla, por lo que la mano de obra era poca (Deshpande y Modak, 2001; Moubay, 2004).

**Segunda generación (1960 - 1970).** Nuevas exigencias y normativas trajeron consigo nuevas necesidades y, por tanto, equipos más complejos, por lo que en las compañías fue necesario realizar revisiones periódicas, y es en este periodo donde se empiezan a introducir los programas de mantenimiento, sistemas de planificación, control de costos y conceptos como aumento de la vida de los equipos (Deshpande y Modak, 2001; Moubay, 2004).

**Tercera generación (1980 - 2000).** Esta generación, influyó nuevos cambios en los programas de mantenimiento. Lo que significa, en otras palabras, mayor confiabilidad de los equipos, mayor disponibilidad de la planta, aumentos en la seguridad operacional de los

equipos, mejoras en la calidad, aumento de la vida útil y más efectividad. (Deshpande y Modak, 2001; Moubray, 2004). La Tabla 2-1 presenta un resumen, de la evolución de las filosofías de mantenimiento y sus características tras tres generaciones.

**Tabla 2-1:** Evolución de las filosofías de mantenimiento (Deshpande y Modak, 2001; Moubray, 2004).

Expectativas de mantenimiento a través de los años		
Primera generación (1940, 1950) Mantenimiento correctivo	Segunda generación (1960, 1970) Mantenimiento preventivo	Tercera generación (1980, 2000) Mantenimiento predictivo
Reparar cuando se daña	Mayor disponibilidad de la planta	Mayor disponibilidad y confiabilidad de la planta
	Aumentar la vida útil de los equipos	Mayor seguridad
	Costos más bajos	Mejor calidad del producto
		No dañar el medio ambiente
		Vida más larga del equipo
		Mayor efectividad operacional

### 2.1.1 Tipos de mantenimiento

**Mantenimiento preventivo (PM)**, (Duffuaa y Ben-Daya, 2009) son un conjunto de inspecciones físicas programadas de los equipos, con el fin de detectar posibles fallas que puedan causar daños inesperados tanto en los equipos como en el producto e instalaciones. En este tipo de mantenimientos generalmente se desarrollan tareas de lubricación, ajuste y reemplazo de piezas, entre otras (Mora Gutiérrez, 2009). Y se clasifica en dos partes, la primera basada en la frecuencia de revisión y la segunda basada en el estado (Moubray, 2004)

**Mantenimiento correctivo (CM)**, según (Duffuaa y Ben-Daya, 2009), esta técnica consiste en la reparación oportuna de las fallas, con el propósito de mejorar la confiabilidad y la seguridad de los equipos, garantizando nuevamente la funcionalidad del activo. Entre sus funciones está, detectar la falla, localizar la falla, entre otras (Mora Gutiérrez, 2009).

**Mantenimiento predictivo (PdM)**, también conocido como mantenimiento basado en condición (Duffuaa y Ben-Daya, 2009), esta filosofía de mantenimiento busca adelantarse a las causas que puedan generar las fallas en los equipos, de esta forma es posible reemplazar los elementos deteriorados reduciendo las fallas repentinas, mediante la detección temprana de cualquier anomalía. Sin embargo, este tipo de mantenimiento se basa en la existencia de indicadores del estado del equipo y la vigilancia continua de los mismos (Gómez, 1998).

**Mantenimiento proactivo**, técnica dirigida a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste de los equipos, con el cual lo que se busca es la causa raíz del problema (Mora Gutiérrez, 2009). Este tipo de filosofías mejora el mantenimiento a través de la evaluación periódica de las tareas de mantenimiento, análisis de causa raíz y análisis predictivos, uso continuo de procesos de mejora, entre otras (Dhillon, 2006).

En la Tabla 2-2 se presentan algunos de los componentes de los diferentes programas de mantenimiento.

**Tabla 2-2:** Componentes de un programa de mantenimiento (Ali Ebrahimi, 2010; Afefy, 2010).

<b>Tipos de mantenimiento</b>			
<b>Correctivo</b>	<b>Preventivo</b>	<b>Predictivo</b>	<b>Proactivo</b>
Equipos pequeños	Sujetos a desgaste	Fallas aleatorias	Análisis de causa raíz
Criticidad baja	Patrones de falla conocidos	Poco desgaste	Envejecimiento
Equipos redundantes		Fallas que llevan a mantenimientos predictivos	Análisis de modos y efectos de falla
Poca probabilidad de falla			Puesta en marcha

---

## 2.2 Marco teórico

El Mantenimiento basado en confiabilidad, nace como una técnica de mantenimiento avanzado para enfocarse en el mantenimiento de los sistemas complejos, priorizando sus impactos respecto a la capacidad y la disponibilidad. Esta técnica, establece un equilibrio entre las cuatro técnicas de mantenimiento tradicional: mantenimiento reactivo, preventivo, predictivo y proactivo como se muestra en la Tabla 2-2, asegurando la máxima capacidad y minimizando los costos (Fogel y Petersen, 1996).

Del mismo modo (Aken, 2008), menciona que el mantenimiento basado en confiabilidad, es una combinación de técnicas de mantenimiento que proporcionan las herramientas necesarias para mejorar los planes de mantenimiento basado en los tres principales componentes del RCM, mantenimiento preventivo, predictivo y proactivo. De esta forma (Duffuaa y Ben-Daya, 2009), menciona que un enfoque para el mantenimiento de sistemas complejos es a través de la estimación de la confiabilidad del sistema. La principal desventaja de este enfoque, son los múltiples mecanismos de falla que constantemente deterioran el sistema.

Por tanto, algunos de los conceptos principales definidos por el mantenimiento basado en confiabilidad mencionados por (Fogel y Petersen, 1996) son:

- (1) Priorizar los sistemas de la planta y los modos de falla en términos de su impacto en la capacidad y disponibilidad.
- (2) Tomar la decisión de dónde invertir los recursos de mantenimiento.
- (3) Incluir tecnologías de mantenimiento necesarias, incluyendo tecnologías preventivas o proactivas.
- (4) Aumentar las competencias básicas en función del mantenimiento.
- (5) Redefinir la función de mantenimiento, cuyo objetivo es buscar soluciones de productividad y mejorar la capacidad a través de prácticas de "Avance".
- (6) Tener claridad sobre las decisiones del mantenimiento.
- (7) Establecer medidas de aceptación y desempeño adecuadas para el mantenimiento.

Los estudios de confiabilidad como metodología de análisis normalmente son soportados con herramientas que permitan estudiar, analizar y evaluar el comportamiento general de un activo, para asegurar su continuidad operacional. Es por lo anterior, que existen diversas metodologías para analizar la confiabilidad de los sistemas, enfocados en presentar alternativas de solución a los diferentes modos de falla.

Una metodología de análisis más compleja, dentro de las posibles para implementar y mejorar los planes de mantenimiento basados en confiabilidad, es el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el cual es definido en el manual de gestión de ingeniería y mantenimiento, del inglés Handbook of Maintenance Management and Engineering (Duffuaa y Ben-Daya, 2009), como un método de mejora del sistema que mantiene una visión rentable, al mismo tiempo que identifica y elabora políticas operacionales de mantenimiento. Esto se hace, con el fin de gestionar los riesgos de la falla funcional de un sistema, de una manera económicamente efectiva y que sea especialmente aplicable a situaciones donde hay recursos financieros bajos o limitados. (Duffuaa y Ben-Daya, 2009).

Por otro lado, (Rausand, 1998) define RCM como una técnica utilizada para desarrollar un programa de mantenimiento, la cual se basa en el supuesto de que la confiabilidad inherente del equipo es una función del diseño y la calidad de construcción. Por tanto, su principal objetivo es reducir los costos de mantenimiento, centrándose en las funciones más importantes del sistema y evitando o eliminando acciones de mantenimiento que no sean estrictamente necesarias (Rausand, 1998).

Por lo tanto, lo anterior implica que RCM es una metodología de mantenimiento basada en la confiabilidad de los activos, enfocada en identificar y eliminar las fallas funcionales a través de la creación de nuevos planes de mantenimiento, con los cuales se busca atacar principalmente los componentes más críticos del sistema y eliminar las tareas innecesarias; reduciendo así los costos del programa de mantenimiento.

## 2.3 Métodos de confiabilidad

A continuación, se describen algunos de los métodos usados en la literatura para realizar estudios de confiabilidad de los sistemas (Patiño, Carmen Elena y Souza, 2006).

### 2.3.1 Diagramas de bloques

Un diagrama de bloque es un método gráfico para evaluar sistemas complejos, los cuales son reducidos en partes más pequeñas con el propósito de realizar otro tipo de análisis. En la mayoría de las plantas industriales, los sistemas se encuentran conectados en serie, en paralelo o de forma mixta; esto implica que para cada una de las configuraciones adoptadas los subsistemas deben tener confiabilidades altas, con el fin de que la confiabilidad total del sistema principal sea mayor (Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, 2009), (Dhillon, 2005).

Es por esto que, para el caso donde los componentes estén conectados en serie, es necesario que todos los componentes funcionen, para que a su vez el sistema funcione, de lo contrario, el sistema entraría en modo de falla y se detendría. Caso contrario con la configuración en paralelo, donde solo basta con que uno de los componentes funcione para que todo el sistema también lo haga (Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, 2009; Dhillon, 2005; Dhillon, 2006).

Los sistemas más complejos generalmente son representados en redes, cuya configuración puede ser representada en una unión de sistemas en serie y paralelo, por lo que se debe tener especial cuidado al evaluarlos.

De esta forma, para los sistemas conectados en serie, la confiabilidad  $R_s$  de que el sistema funcione, es igual a la probabilidad de que todos sus componentes funcionen. Matemáticamente este concepto se representa de la siguiente manera:

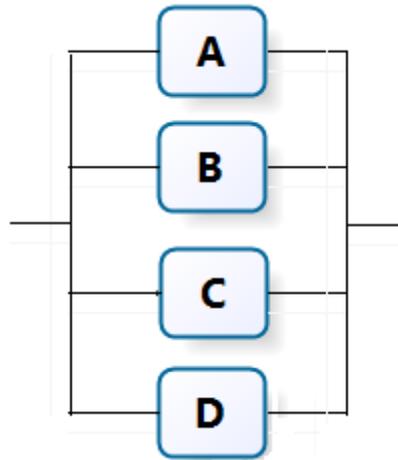
$$R_s = \prod_{i=1}^m R_i = R_1 R_2 R_3 \dots \dots R_m \quad (\text{Ec 1})$$



**Figura 2-1:** Configuración de bloques en serie.

Similarmente, para los sistemas con configuración en paralelo, la confiabilidad de que el sistema funcione está determinada por la diferencia entre 1 y la probabilidad de que todos los componentes fallen. Por lo que puede calcularse de la siguiente forma.

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^m Ri = 1 - (1 - R)^m \quad (\text{Ec 2})$$



**Figura 2-2:** Configuración de bloques en paralelo.

### 2.3.2 Análisis de modos y efectos de fallas (FMEA)

Es una metodología de análisis que permite reconocer, evaluar e identificar las fallas potenciales de un proceso, determinando las causas y caracterizando las fallas o efectos en el sistema; asignando prioridades e identificando acciones que minimicen o eliminen el riesgo de que suceda (Rausand y Høyland, 2004; Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, 2009; Oreda, y Troffé).

La historia del FMEA, se remonta a principios de los años cincuenta, con el desarrollo de sistemas de control de vuelo, cuando la Oficina de Aeronáutica de la Armada de los Estados

Unidos desarrolló un requisito de confiabilidad llamado "Análisis de Falla". Posteriormente, "Análisis de Falla" se conoce como "Análisis de Efecto de Falla" y luego como "Análisis de Modos y Efectos de Fallas" (Dhillon, 2005; Rausand y Høyland, 2004).

En este último, se presentaron siete pasos principales para el correcto desarrollo del FMEA (Dhillon, 2005).

**Paso 1:** Definir los límites del sistema y los requisitos asociados en detalle.

**Paso 2:** Listar todos los subsistemas y componentes del sistema principal.

**Paso 3:** Enumerar todos los posibles modos de falla, la identificación y la descripción de los componentes.

**Paso 4:** Asignar las probabilidades de falla a cada componente.

**Paso 5:** Describir el efecto causado de cada modo de falla en el subsistema y la planta en general.

**Paso 6:** Introducir las observaciones necesarias para cada modo de falla.

**Paso 7:** Revisar cada modo crítico de falla y tomar las acciones convenientes.

Durante el desarrollo del FMEA, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones, las cuales son necesarias para asegurar que todas las fallas potenciales sean evaluadas correctamente según el riesgo que pueda presentarse. Motivo por el cual durante su desarrollo se debe ser lo más específico al describir cada componente, cada función y cada falla, de modo que esta información sea acorde con los registros reportados por los operadores.

Para este caso de estudio, el desarrollo del análisis de modos y efectos de fallas (FMEA), es elaborado bajo los contextos planteados en la norma SAE J-1739, los cuales son tomados como guía para obtener el mayor provecho del análisis a desarrollar.

\_\_\_\_ Sistema

\_\_\_\_ Subsistema

\_\_\_\_ Componentes \_\_\_\_\_

Año(s)/Programa(s) del Modelo \_\_\_\_\_

Equipo Central \_\_\_\_\_

**ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS  
DE FALLAS POTENCIALES  
(AMEF DE DISEÑO)**

Responsabilidades de  
Diseño \_\_\_\_\_

Fecha Clave \_\_\_\_\_

Número de AMEF \_\_\_\_\_

Página \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Preparado por: \_\_\_\_\_

Fecha de AMEF (Orig.) \_\_\_\_\_

Artículo/ Función	Modo de Falla Potencial	Efecto(s) Potencial (es) de la Falla	Severidad	Clasificación	Causa(s) Potencial (es) de la Falla	Ocurrencia	Controles Actuales de Prevención en el Diseño	Controles Actuales de Detección, en el Diseño	Detección	NPR	Acciones Recomendadas	Responsabilidades y Fechas Meta de Terminación	Resultados de Acciones					
													Acciones Tomadas y Fecha de Terminación	Severidad	Ocurrencia	Detección	NPR	
Requerimientos																		

**Figura 2-3:** Esquema del FMEA Tomado de (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008).

El paso más importante en el desarrollo y evaluación del proceso FMEA (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008) es la valoración del riesgo, el cual se evalúa en tres formas: severidad, ocurrencia y detección, los cuales son definidos a continuación:

**Severidad:** Es el valor más importante en la evaluación del impacto de un modo de falla en el proceso.

**Ocurrencia:** Es la probabilidad de que la causa asociada a una falla ocurra.

**Detección:** Es la probabilidad de que la falla sea detectada antes de que tenga un impacto mayor en el proceso.

Tanto la severidad, la ocurrencia y la detección son evaluadas en rangos y criterios establecidos por la norma SAE J-1739.0. Sin embargo, pueden ser modificados según los criterios propios de una empresa, siempre y cuando estos valores sean los mismos para todos los equipos relacionados en el análisis (Ver tablas en Anexo A). (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008; Duffuaa y Ben-Daya, 2009).

## 2.4 Otros métodos de análisis

### 2.4.1 Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una técnica que permite identificar y jerarquizar los sistemas y equipos en función de su impacto en el proceso, de esta forma se hace más fácil determinar el impacto de las fallas potenciales de los sistemas (Parra y Crespo, 2012).

Desde el punto de vista matemático la criticidad se expresa como:

$$\textit{Criticidad} = \textit{Frecuencia} \times \textit{Consecuencia}$$

Dónde, la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado. La consecuencia, hace referencia al impacto, la flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente.

## 2.4.2 Diagramas de causa y efecto

Desarrollados por el japonés Kaoru Ishikawa en 1943. Un diagrama de causa y efecto es una herramienta que ayuda a organizar, identificar, ordenar y mostrar todas las posibles causas por la que un equipo puede fallar (Duffuaa y Ben-Daya, 2009). Algunos de los beneficios de utilizar esta herramienta son los siguientes:

- Identifica las causas fundamentales del problema utilizando un enfoque mejor estructurado.
- Promueve la participación utilizando el conocimiento del proceso.
- Utiliza un formato ordenado y fácil de utilizar para relacionar todas las posibles causas y sus efectos.
- Identifica las zonas o equipos donde se deben realizar estudios más profundos.
- Categoriza las causas y las relaciona con el problema de análisis.

En este mismo contexto, (Dhillon, 2005) menciona cuatro pasos para construir y analizar un diagrama de causa y efecto, los cuales son descritos a continuación:

- Declarar el problema.
- Hacer una lluvia de ideas para identificar todas las posibles causas.
- Dibujar el diagrama conectando las causas y siguiendo los pasos del proceso para completar el problema.
- Preguntarse, ¿Por qué es importante esta condición? ¿Qué causa este fallo?

## 2.5 Fundamentos teóricos

### 2.5.1 Confiabilidad

Diferentes autores como (Duffuaa y Ben-Daya, 2009; Nowlan y Heap, 1978), definen la confiabilidad como la capacidad de un elemento para realizar una función requerida bajo condiciones específicas durante un intervalo de tiempo. A su vez, la norma técnica colombiana GTC 62, define la confiabilidad, como la capacidad de un activo o elemento para realizar una función requerida en condiciones específicas para un intervalo de tiempo dado (ICONTEC, 1999). Sin embargo, (Rausand y Høyland, 2004) proponen una definición más general, similar a la planteada por la ISO 8402 y British Standard BS 4778, como la capacidad de un componente para establecer una función requerida, bajo condiciones ambientales y operacionales por un período de tiempo determinado.

En términos estadísticos, si  $T$  es una variable aleatoria que define la vida útil de un componente con función de distribución  $F(t)$  función de probabilidad acumulada de falla. Si  $F(t)$  es una función diferenciable, entonces la función de densidad de probabilidad de  $T$  viene dada por (Duffuaa y Ben-Daya, 2009):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (\text{Ec 3})$$

A su vez la función de confiabilidad  $R(t)$  del componente viene dada por:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (\text{Ec 4})$$

Donde:

$P(T > t)$  = Probabilidad que el sistema falle en un tiempo  $>t$ .

$P(T \leq t)$  = Probabilidad que el sistema falle en un tiempo  $\leq t$ .

$R(t)$  = Confiabilidad del sistema.

$F(t)$  = Función de probabilidad acumulada de falla.

## 2.5.2 Tasa de falla o función de riesgo

La tasa de falla está definida como la probabilidad instantánea de que un componente falle en un instante  $t$  (Navarrete Muela, 2014), del mismo modo, (Rausand y Høyland, 2004) la definen como la probabilidad de que un elemento falle en el intervalo de tiempo  $t$ , cuando el componente está funcionando en ese mismo instante. Por su parte, (Duffuaa y Ben-Daya, 2009) definen la tasa de falla como la probabilidad de que ocurra una falla por unidad de tiempo en un intervalo, dado que no ha ocurrido una falla antes del instante  $t$ . Por lo que la probabilidad de falla condicional en el intervalo  $[t, t + \Delta t]$  está dada por:

$$\frac{\int_t^{t+\Delta t} f(t)dt}{\int_t^t f(t)dt} = \frac{F(t+\Delta t)-F(t)}{R(t)} \quad (\text{Ec 5})$$

Dividiendo esta probabilidad por la longitud del intervalo de tiempo  $\Delta t$  y llevando al límite cuando  $\Delta t \rightarrow 0$ , se obtiene:

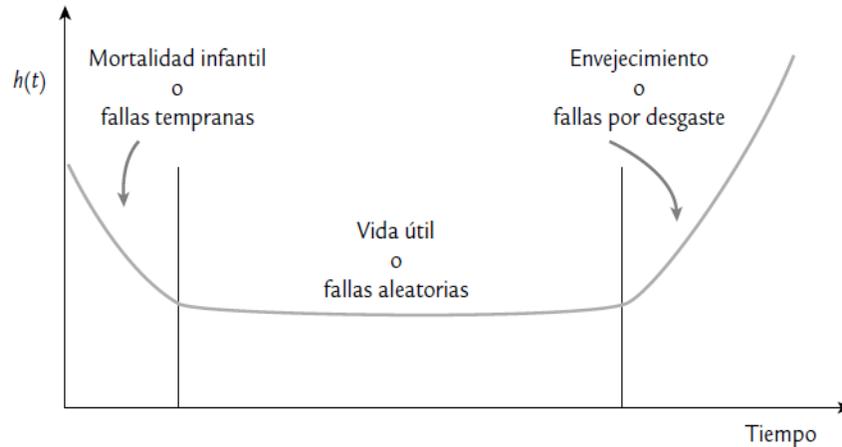
$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t)-F(t)}{\Delta t * R(t)} = \frac{1}{R(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t)-F(t)}{\Delta t * R(t)} = \frac{1}{R(t)} \frac{dF(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{Ec 6})$$

La ecuación 6 es representada por la llamada curva de la bañera (Figura 2-4), curva que representa la tasa de falla de un activo con el pasar del tiempo. En esta curva, se distinguen tres periodos de vida diferentes conocidos como mortalidad infantil, fallas aleatorias y envejecimiento (Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, 2009; Mora Gutiérrez, 2009).

El comportamiento de la tasa de falla en el periodo de mortalidad infantil es decreciente, ya que, a medida que pasa el tiempo, la probabilidad de falla disminuye, por lo que, en este tipo de periodos, es ideal tomar acciones correctivas, de modo que se corrijan todos los defectos de fabricación y montaje (Mora Gutiérrez, 2009).

A su vez, el comportamiento en el periodo de fallas aleatorias es constante, ya que, por lo general, las fallas producidas en este periodo son técnicas, por lo que se deben plantear acciones modificativas (Mora Gutiérrez, 2009).

Finalmente, en el periodo de envejecimiento, la probabilidad de falla incrementa rápidamente, por lo que deben tomarse acciones predictivas para mantener el equipo en condiciones aceptables de operación (Mora Gutiérrez, 2009).



**Figura 2-4:** Curva de la bañera para el ciclo de vida de un activo (Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, 2009).

### 2.5.3 Probabilidad de falla

Se representa por  $F(t)$  y representa la probabilidad de que el equipo falle al cabo de un tiempo  $t$  (Dhillon, 2005).

$$F(t) = P(T \leq t), \text{ si } 0 < t < \infty \quad (\text{Ec } 7)$$

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (\text{Ec } 8)$$

$f(t)$  = función de densidad

### 2.5.4 Mantenibilidad

(Rausand & Høyland, 2004) definen la mantenibilidad como la capacidad de un componente, en condiciones establecidas de uso, de ser restaurado a un estado en el cual

pueda realizar las funciones para las que fue diseñado (British Standard BS 4778), en el mismo orden, (Nowlan y Heap, 1978) definen la mantenibilidad como la facilidad con la que se puede realizar un mantenimiento programado o correctivo en un componente. A su vez, (Dhillon, 2006) la define como, la probabilidad de que un equipo o componente en estado de falla sea restaurado a su estado operativo.

## **2.6 Distribuciones estadísticas**

Cuando se habla de confiabilidad y análisis de datos, es muy importante usar herramientas estadísticas que permitan obtener un mayor análisis y ajuste entre la información obtenida. Por lo cual, se usan distribuciones estadísticas para lograr un mejor entendimiento de los fenómenos que se estudian, ya que, generalmente, los tiempos entre falla obedecen a distribuciones que no son conocidas, por lo que de acuerdo a la información obtenida de la falla se pueden llegar a determinar las características al que el modelo se ajusta en función del tiempo.

Estadísticamente este tipo de distribuciones puede ser discretas o continuas, siendo las distribuciones continuas las más utilizadas en mantenimiento para el análisis de datos y tiempos de falla (Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, 2009).

A continuación, se presentan algunas de las distribuciones más comúnmente usadas en el análisis de fallas en mantenimiento.

### **2.6.1 Distribución exponencial**

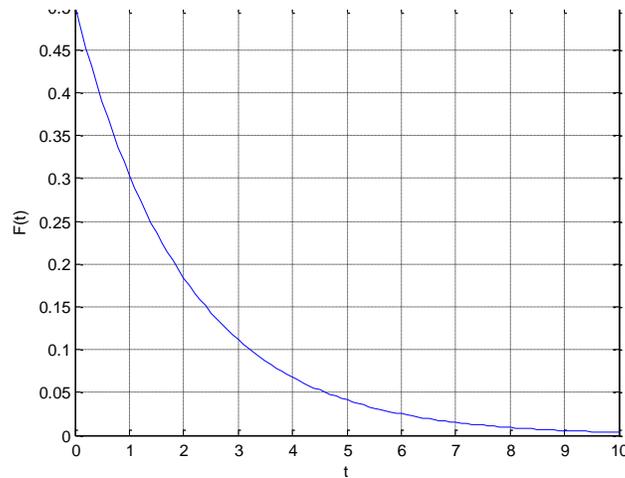
Debido a su simplicidad, este modelo históricamente ha sido muy utilizado por su aplicabilidad práctica, ya que, para este tipo de distribución, un activo no depende de su edad de uso, por lo que, cuando no ha fallado, puede considerarse que se encuentra en las mismas condiciones que cuando inició su ciclo de vida. Es por esta razón que se conoce como función sin memoria (Navarrete Muela, 2014; Rausand y Høyland, 2004; Duffuaa y Ben-Daya, 2009).

### Distribución de densidad

La función de distribución de densidad se define como:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (\text{Ec } 20)$$

Es una función decreciente y tiende a cero cuando  $t \rightarrow \infty$ , como se puede observar en la Figura 2-12, siendo  $\eta > 0$  el parámetro de escala del modelo y cuando  $\eta$  es igual a 1, se le denomina distribución exponencial estándar.

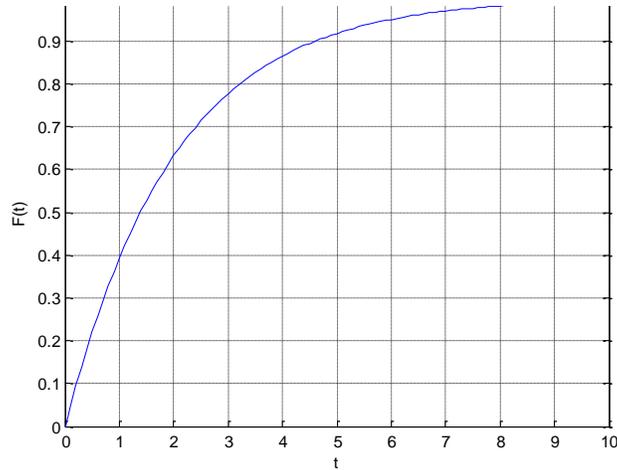


**Figura 2-5:** Función de densidad de una distribución exponencial estándar.

### Distribución exponencial

La función de distribución exponencial se define como:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t}, \text{ para todo } t \geq 0 \quad (\text{Ec } 21)$$

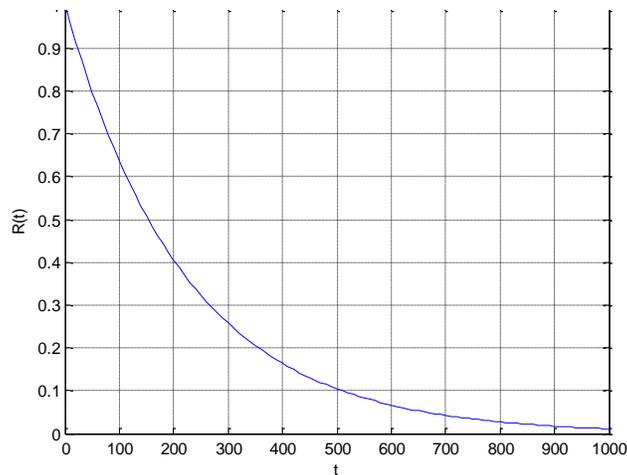


**Figura 2-6:** Función de distribución exponencial.

### Función de confiabilidad

La función de confiabilidad se define como:

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(u)du = e^{-\lambda t}, \text{ para todo } t > 0 \quad (\text{Ec 22})$$



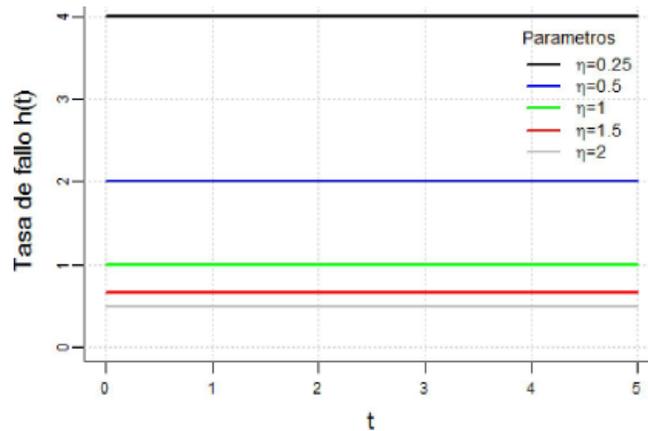
**Figura 2-7:** Función de confiabilidad de una distribución exponencial.

El tiempo medio hasta la falla se expresa como:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Ec 23})$$

$\lambda$  es la tasa de fallo la cual es una constante positiva expresada como:

$$MTTF = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (\text{Ec. 24})$$



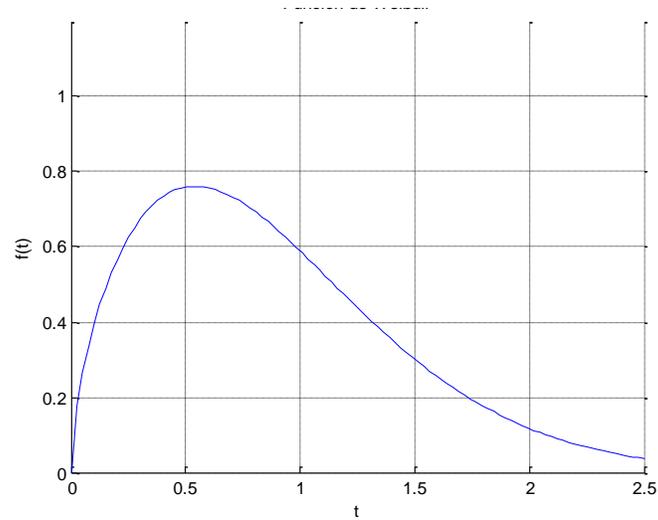
**Figura 2-8:** Tasa de falla de una exponencial (Navarrete Muela, 2014).

## 2.6.2 Distribución Weibull

Esta distribución es considerada una distribución flexible, ya que su tasa de falla depende de sus parámetros y puede ser creciente, decreciente o constante, su adecuado uso e interpretación ayuda a conocer y pronosticar la causa de una falla. De esta manera, puede conocerse la fiabilidad de un activo.

### Distribución de densidad

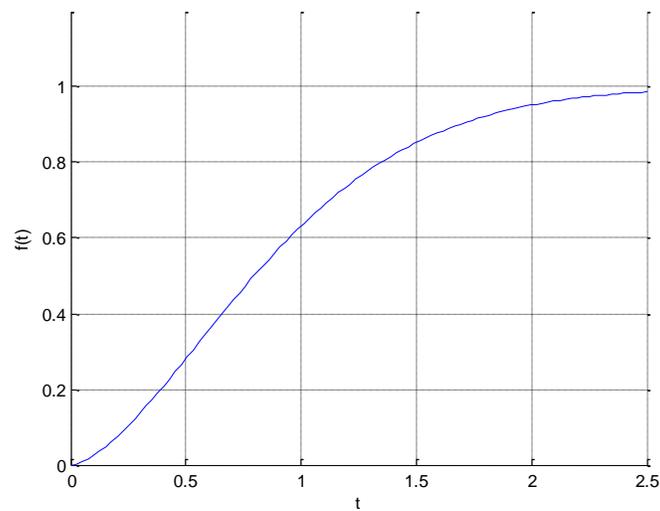
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (\text{Ec 25})$$



**Figura 2-9:** Función de densidad de una distribución Weibull.

### Distribución acumulada

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Ec 26})$$

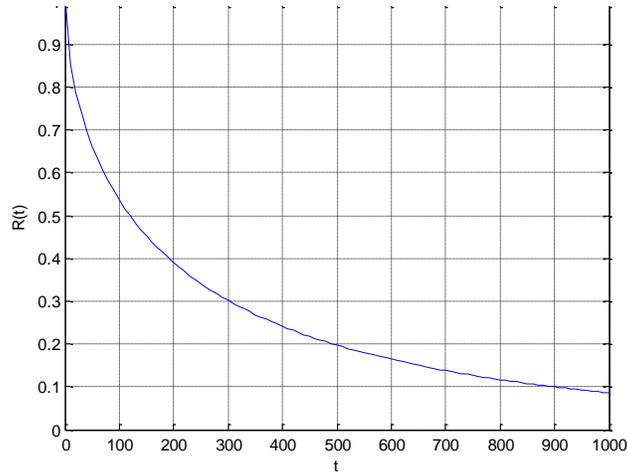


**Figura 2-10:** Función de distribución Weibull.

Al linealizar la función de distribución de densidad se obtiene la función de confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Ec 27})$$

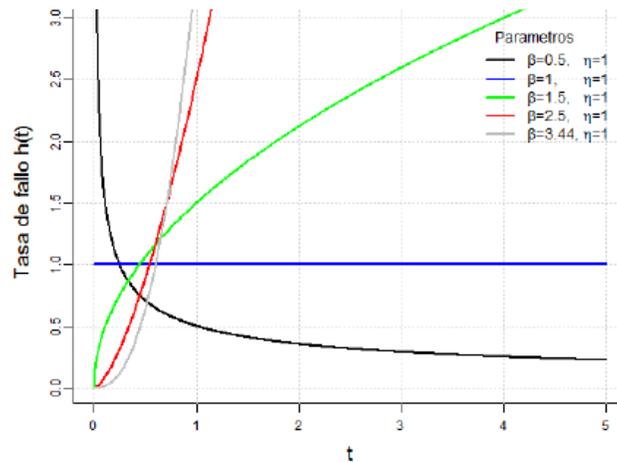
Donde  $R(t)$  es la confiabilidad del sistema y  $\beta$  y  $\eta$  son los parámetros de dicha distribución.



**Figura 2-11:** Función de confiabilidad de una distribución Weibull.

La tasa de falla está dada por:

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{Ec 28})$$



**Figura 2-12:** Tasa de falla de una distribución Weibull (Navarrete Muela, 2014).

## 2.6.1 Distribución normal

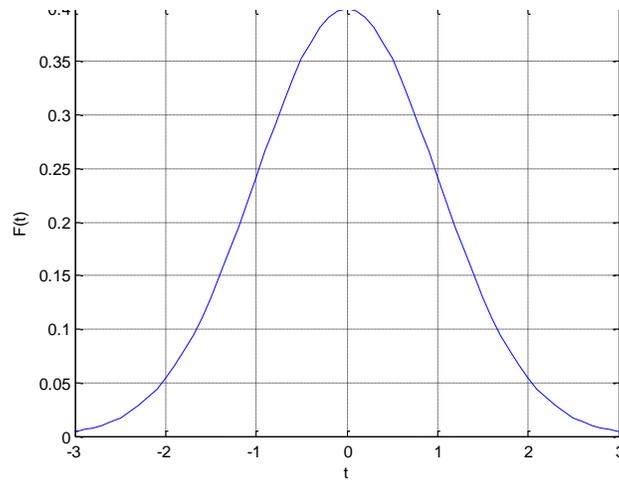
Es la distribución más utilizada en estadística, pero es poco utilizada en los análisis de confiabilidad debido al carácter asimétrico que comúnmente representan los datos (Navarrete Muela, 2014; Nowlan y Heap, 1978) argumentan que la distribución normal frecuentemente representa las características de fiabilidad de edad de los elementos simples (aquellos sujetos a sólo uno o muy pocos modos de falla).

Del mismo modo aclaran, que la distribución normal es una distribución de dos parámetros. El primer parámetro es de ubicación, que define la edad a la que se produce la densidad máxima de falla. El otro parámetro, es un parámetro de escala y está determinado por el grado de dispersión de las densidades de fallo alrededor del valor pico. El parámetro de escala establece así la curvatura de la curva de supervivencia, las magnitudes de las probabilidades condicionales y la magnitud de la densidad máxima de falla y de otras densidades alrededor del valor máximo (Nowlan y Heap, 1978).

Su función de densidad se define como:

$$f(t) = \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \right) \quad (\text{Ec 9})$$

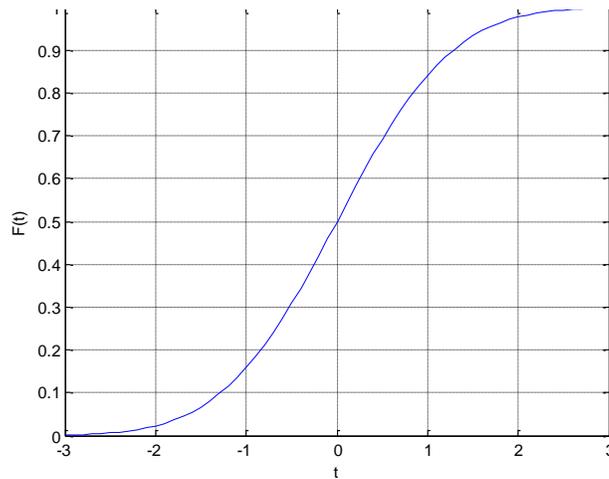
Dónde  $\mu$  y  $\sigma$  son la media y la desviación estándar, y su representación gráfica está dada por la Figura 2-5.



**Figura 2-13:** Distribución normal.

La función de distribución se obtiene de la ecuación 10 y su representación gráfica se observa como:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (\text{Ec } 10)$$



**Figura 2-14:** Función de distribución acumulada.

De este modo, cuando los parámetros  $\mu = 0$  y  $\sigma = 1$ , la función se denomina función normal estándar con función de densidad.

$$\varphi(t) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{\sigma^2}} \right) \quad (\text{Ec 11})$$

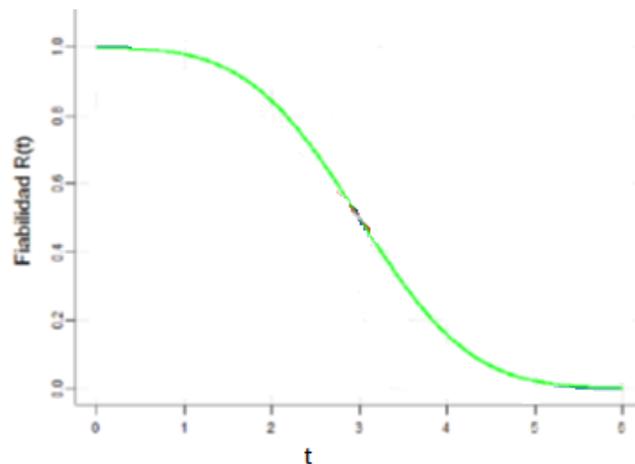
Y la función de distribución  $\Phi$  dada por:

$$\Phi(t) = \int_{-\infty}^t \varphi(u) du \quad (\text{Ec 12})$$

Su función de confiabilidad Figura 2-7 y tasa de falla se definen como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (\text{Ec 13})$$

$$h(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt} \quad (\text{Ec 14})$$

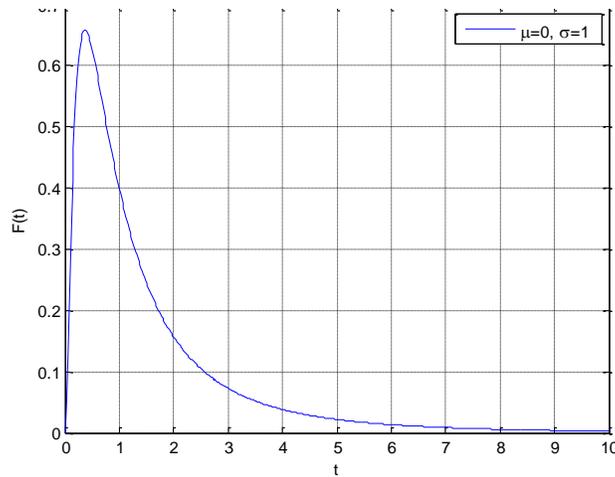


**Figura 2-15:** Distribución de confiabilidad de una normal (Navarrete Muela, 2014).

## 2.6.2 Distribución log normal

Se dice que una variable aleatoria  $T$  tiene un comportamiento log normal, de parámetros  $\sigma$  y  $\mu$ , si su logaritmo es una variable aleatoria con distribución Normal (Rausand y Høyland, 2004; Duffuaa y Ben-Daya, 2009; Navarrete Muela, 2014). La función de densidad se expresa como:

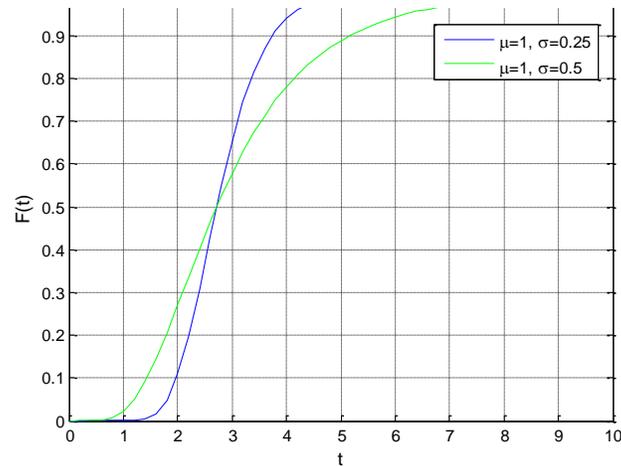
$$f(t) = \left( \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2} \right) \text{ para } \sigma > 0 \quad (\text{Ec 15})$$



**Figura 2-16:** Distribución log normal.

La función de distribución  $F(t)$  :

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2} dt \quad (\text{Ec 16})$$



**Figura 2-17:** Función de distribución acumulada de un log normal.

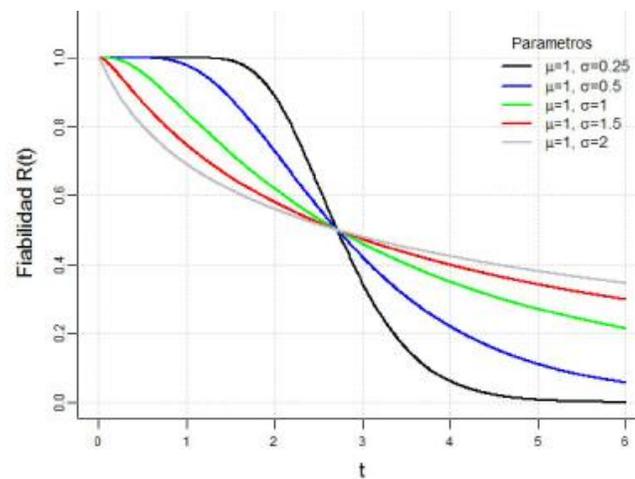
Donde la media o el tiempo medio entre fallas se expresa como:

$$MTTR = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (\text{Ec 17})$$

Función de confiabilidad:

$$R(t) = P(T > t) = P\left(z > \frac{\text{Lnt} - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\text{Lnt} - \mu}{\sigma}\right) \quad (\text{Ec 18})$$

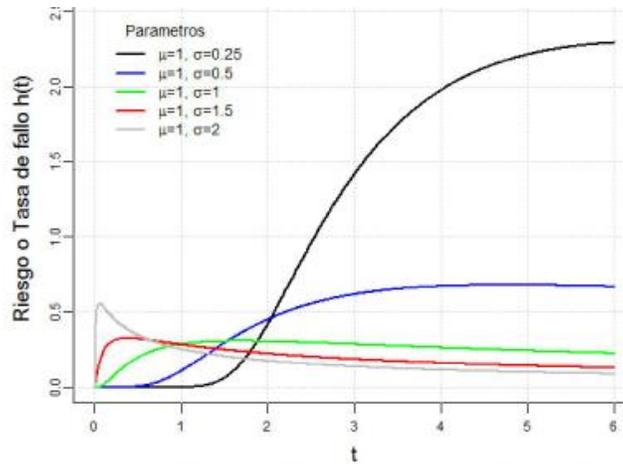
Donde  $\Phi$  es la función de distribución normal estándar.



**Figura 2-18:** Distribución de confiabilidad de una log normal (Navarrete Muela, 2014).

La tasa de falla está dada por:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right)} \sqrt{\frac{2}{\pi}}}{t \sigma \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_t^{\infty} e^{-t^2} dt \left(-\frac{\mu - \text{Ln} \mu}{\sigma \sqrt{2}}\right)} \quad (\text{Ec 19})$$

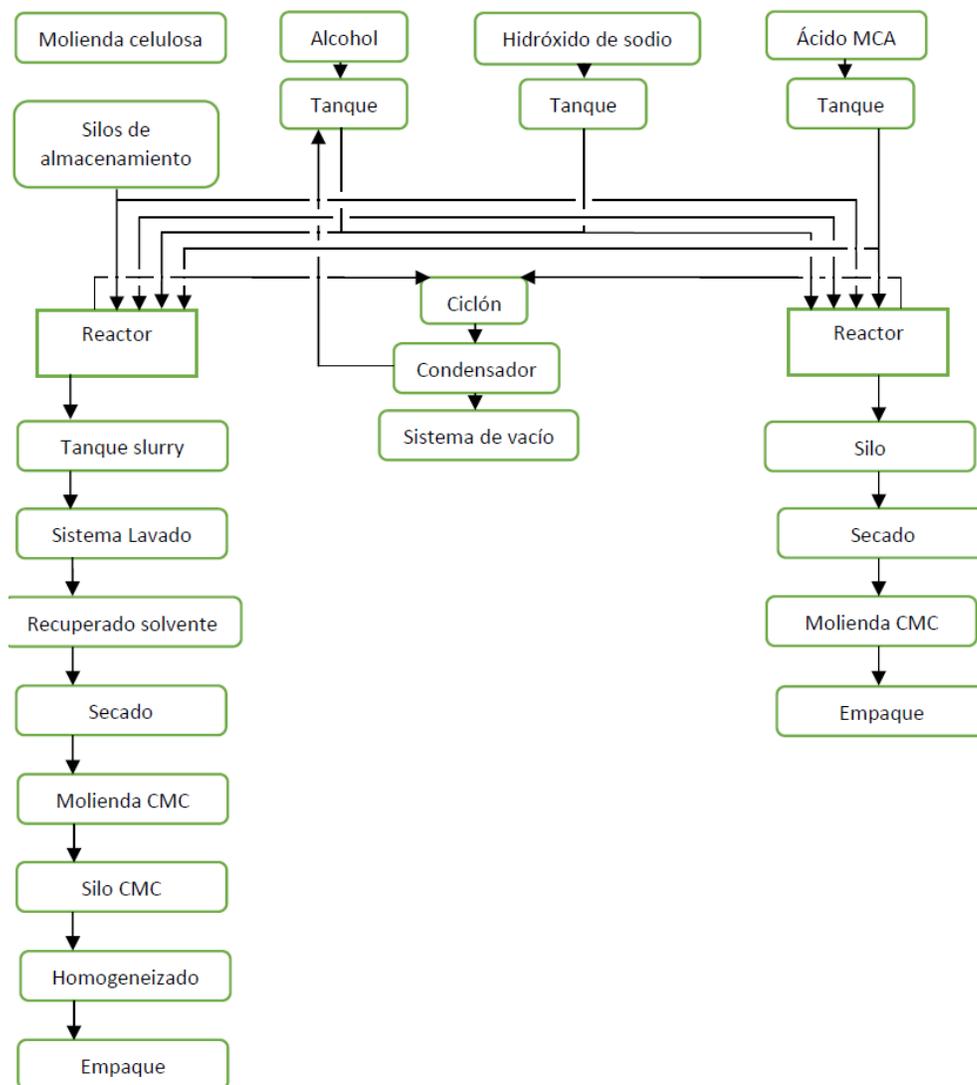


**Figura 2-19:** Tasa de falla de una distribución log normal (Navarrete Muela, 2014).

## 3 Descripción del problema

### 3.1 Descripción del proceso

El proceso más extendido industrialmente en la producción de Carboximetilcelulosa (CMC) es el proceso Druvacell® de Lödige que utiliza el reactor Druvatherm® para lograr una mayor conversión (Pacheco, 2002). Este proceso se esquematiza en la Figura 3-1.



**Figura 3-1:** Descripción del proceso de producción de CMC (Pacheco, 2002).

El proceso de producción conocido como Druvacell® combina tres etapas en un único reactor: alcalinización de la celulosa, neutralización de una parte del hidróxido de sodio a monocloroacetato de sodio a partir del ácido monocloroacético y reacción de álcali celulosa con el monocloroacetato para formar Carboximetilcelulosa de sodio (CMC).

El reactor es un equipo cilíndrico horizontal agitado (reactor tipo bach), en el cual los reactivos son mezclados logrando una mezcla homogénea. La celulosa empleada en el proceso proviene de maderas de árboles o de algodón, y a su vez es obtenida en hojas o rollos.

La CMC (Carboximetilcelulosa de sodio) es un polímero aniónico soluble en agua que, debido a su carácter hidrofílico, viscosidad, inocuidad y excelente comportamiento adhesivo es utilizado en diferentes industrias tanto para uso textil y fabricación de detergentes como para aditivos alimenticios y farmacéuticos.

El proceso de producción comienza con la molienda de celulosa, la cual es procesada por molinos de cuchillas hasta obtener una partícula fina capaz de pasar a través de las mallas del proceso. Una vez molida la celulosa, ésta es enviada por turbinas a los silos de almacenaje. Desde allí y por medio de un sistema de tornillos son alimentados los reactores con la celulosa molida, alcohol e hidróxido de sodio en concentraciones establecidas por la compañía, en este punto inicia el proceso de mezclado (Pacheco, 2002).

Después de cumplidos los tiempos establecidos para esta etapa conocida como alcalinización, se añade ácido monocloroacético sometido a calentamiento hasta alcanzar la temperatura de reacción. Este paso, es muy importante en el proceso, ya que, de este depende alcanzar la conversión de la celulosa en carboximetilcelulosa (Pacheco, 2002).

Una vez finalizado el tiempo de reacción, se recupera parte del alcohol por medio de un sistema de vacío y desde ese momento el producto obtenido se divide en dos líneas de procesos de secado diferentes, conocidas como CMC grado purificado y CMC grado técnico (Pacheco, 2002).

Para el caso de CMC grado técnico, se tiene que al finalizar la reacción se recupera el solvente de forma continua por medio de un sistema de vacío y condensación, con el cual el solvente recuperado es usado para un nuevo proceso dentro del reactor.

Este grado de CMC es descargado a un silo desde el cual se alimenta de manera constante una secadora donde el producto es secado hasta obtener los parámetros establecidos por el área de calidad; continuamente, el producto ya seco, es enviado neumáticamente al área de molienda, donde es molido y tamizado antes de ser empacado y almacenado para disposición final (Pacheco, 2002).

Respecto a la CMC grado purificado, una vez finalizada la reacción, se añade el solvente dentro del reactor con el fin de diluir el producto y hacer más rápida y fácil la descarga de este. La CMC ya diluida, es descargada en tanques donde se neutraliza bajo requerimientos del área de calidad. Luego, el producto es continuamente alimentado a la línea de lavado, sistema que trabaja con solvente a contracorriente para aumentar su eficiencia. A su vez, el solvente filtrado y recuperado de sus zonas de lavado es enviado a destilación antes de volver a ser usado dentro del proceso (Pacheco, 2002).

Una vez llegado a este punto, la CMC ya purificada pasa por el proceso de secado y, al igual que la CMC grado técnico, es molida, tamizada, homogenizada y empacada según parámetros establecidos por el área de calidad. De esta manera se obtienen tres tipos de derivados de la CMC: CMC purificada (grado alimenticio), CMC grado extra y CMC grado técnico (Pacheco, 2002).

## **3.2 Problema a resolver**

### **3.2.1 Planteamiento del problema**

En los procesos de producción de aditivos de grado alimenticio, la industria de Carboximetilcelulosa (CMC) es usada en diferentes procesos, permitiendo mejorar las propiedades reológicas de los productos que se producen en diferentes industrias como las farmacéuticas, cuidado personal, industrias de papel, detergentes, petróleo, adhesivos, industria textil y el de mayor importancia, el sector alimenticio.

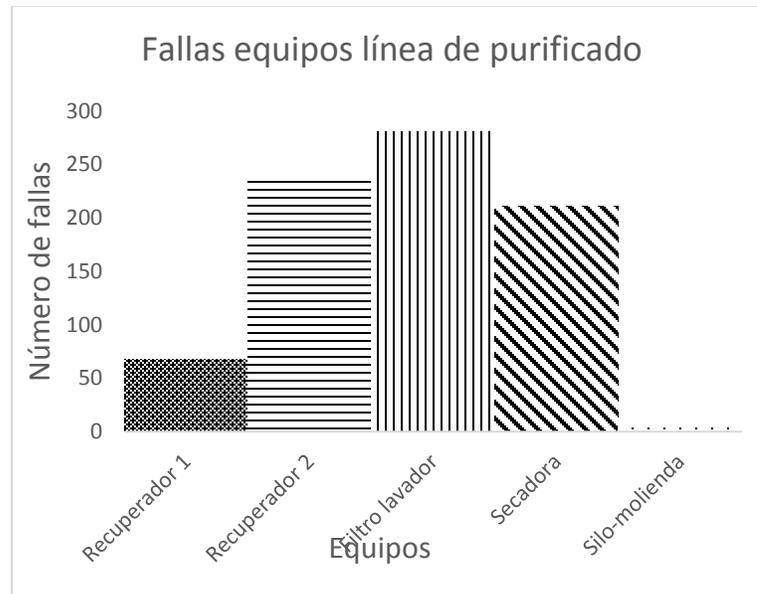
El proceso de producción está compuesto por una serie de equipos que por su complejidad se tornan críticos, por lo que las fallas o defectos generados impactan directamente sobre la calidad del producto final. Motivo por el cual son monitoreados constantemente con el fin de identificar cambios indeseados en las variables de producción.

Durante todo el recorrido del producto por sus diferentes etapas, pueden presentarse inconformidades que son generadas por algunos eventos presentados en los equipos. Cuando estos eventos no son intervenidos, se presentan paros posteriores e innecesarios en la planta que representan intervenciones más profundas, generando retrasos en la producción y en el proceso, reflejando pérdidas económicas para la compañía.

En este mismo contexto, los equipos periféricos cumplen una función de soporte a los sistemas principales, por lo que deben considerarse con igual nivel de criticidad. Actualmente, no siempre son atendidos con la prioridad necesaria, por lo que en mayor frecuencia presentan fallos innecesarios que representan atrasos en las entregas finales, pérdidas de producción, reprocesos y fuertes impactos a los costos de producción. Por tanto, se hace necesario mejorar el plan de mantenimiento de los equipos involucrados en la línea de proceso con el fin de incrementar la disponibilidad operacional de la planta de un 85% actual a niveles de al menos 95% en conformidad con las expectativas de la empresa.

En los últimos años, la producción de CMC se ha visto afectada por el creciente número de fallas presentadas en los equipos que componen la línea de purificación. Un paro inesperado en cualquiera de los equipos puede generar inconformidades en la calidad del producto, aumento de los reprocesos, retrasos en la producción e incremento de pérdidas económicas. Cada hora en que los activos de la planta no son utilizados, se genera pérdidas de ingresos y utilidades, por lo que se debe maximizar la disponibilidad de cada uno de los equipos que interviene en la línea del proceso.

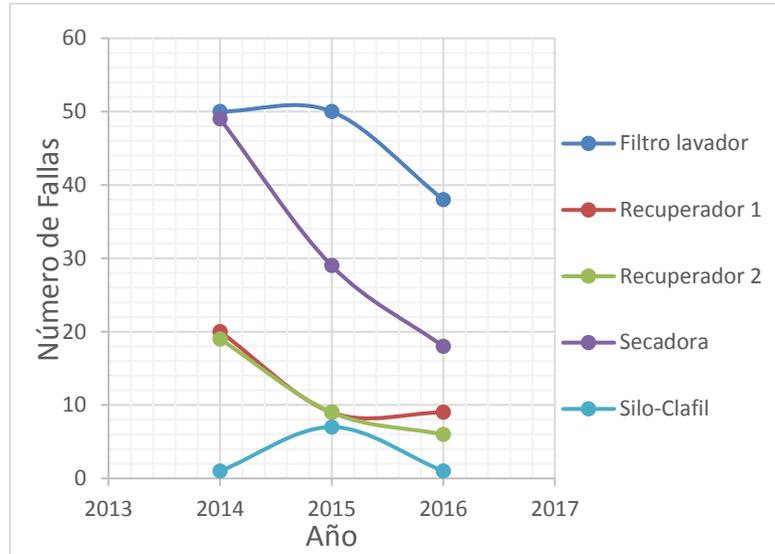
De aquí que, con la información obtenida de las fallas presentadas en los equipos pertenecientes a la línea de purificado, se realiza un histograma de frecuencias (Figura 3-2) con el fin de evidenciar el equipo con mayor número de paros presentados.



**Figura 3-2:** Fallas presentadas por los equipos de línea de purificado desde el 2010.

En la Figura 3-2, se muestra la acumulación de fallas y eventos desde el año 2013 hasta el 2016, en el cual es posible evidenciar que el equipo con el mayor número de fallas presentadas es el filtro lavador, por tal razón se considera este equipo como opción para el análisis y desarrollo de un estudio de mantenimiento basado en la confiabilidad.

Un análisis de fallas más detallado se lleva a cabo en la Figura 3-3, donde se relaciona el número de fallas presentes asociadas a los equipos que componen la línea de purificado durante el periodo 2014 - 2016. Una vez más, en éste se observa que el activo que más fallas ha presentado en los últimos 2 años es el filtro lavador, el cual se considera que, de acuerdo con su complejidad, criticidad e importancia dentro de la línea, debe contar con un plan de mantenimiento específico que permita incrementar su disponibilidad de acuerdo a los programas de producción.



**Figura 3-3:** Fallas generadas entre los años 2014 – 2016.

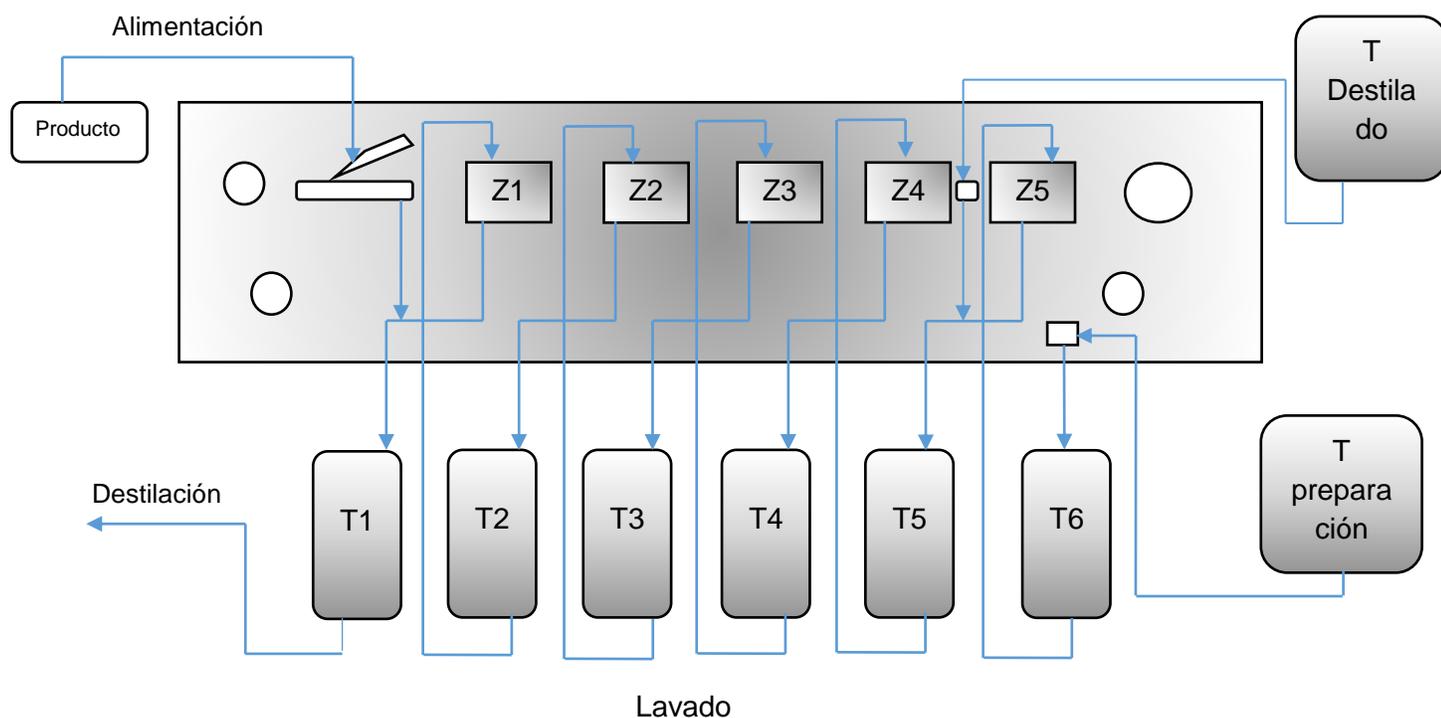
### 3.2.2 Análisis del sistema de lavado y filtrado

El sistema seleccionado para la implementación de esta metodología es el sistema de filtración y lavado de CMC. El equipo es un separador sólido líquido de banda horizontal con subsistema de vacío y de lavado, el cual debido a las propiedades del producto está construido específicamente para trabajar en forma hermética.

El equipo cuenta con una banda horizontal impulsada por un motor, en la cual se transporta el producto, un sinfín de salida con el que se evacua el producto del equipo y múltiples etapas de lavado a contracorriente. Debido a las características fisicoquímicas del producto, éste debe lavarse con un solvente como alcohol en concentraciones previamente establecidas por la compañía.

La alimentación entra al filtro en la zona 1, para lo cual se dispone de dos bombas de desplazamiento positivo, una de bombeo y la otra como reserva en caso de que una falle. Cada etapa de lavado recircula y reutiliza el solvente en una etapa siguiente, este proceso continúa hasta finalizar todas las etapas de lavado. El sistema de lavado funciona de la siguiente manera: el tanque 6 es llenado con el alcohol preparado en el área de destilación, de este tanque 6 una bomba impulsa solvente hacia el filtro hasta la zona de lavado 5, el cual, por medio de la succión generada por la bomba de vacío, es recuperado y recibido

por el tanque 5, similarmente el solvente del tanque 5 es enviado nuevamente hacia el filtro hasta la zona 4 y recuperado en el tanque 4. Este proceso es continuo y termina cuando el solvente es filtrado en la zona 1 y recuperado en el tanque 1, en este tanque, el solvente proveniente de esta etapa es conocido como solvente sucio el cual debe ser destilado antes de regresar al proceso. Durante el tiempo de lavado una bomba aparte, dosifica el solvente puro proveniente del tanque de destilado hacia la zona 4, cuyo fin es deshidratar el producto sobre la cinta. Este solvente es recuperado en el tanque 4.



**Figura 3-4:** Esquema del filtro de banda horizontal con múltiples etapas de lavado y recirculación.

El filtro lavador, cuenta con una serie de inyectores ubicados en la parte inferior que constantemente lavan la cinta a alta presión con el alcohol proveniente de la zona de destilación. Los vapores de alcohol presentes en el interior del equipo hacen de este, un sistema crítico con atmosferas explosivas, por lo que constantemente un sistema blanqueting mide los niveles de oxígeno y se adicionan barridos de nitrógeno con el fin de dar seguridad a toda la planta.

### 3.2.3 Descripción de los subsistemas principales

#### 3.2.3.1 Subsistema de vacío

Como puede verse, en la Figura 3-4. el equipo de lavado es un filtro de vacío continuo que consta de una banda transportadora continua que sostiene un medio filtrante en la superficie superior. El líquido filtrado pasa a través de la tela a lo largo de los microporos hasta los depósitos de vacío situados bajo la banda.

El subsistema de vacío está compuesto por una bomba de vacío de anillo líquido, un tanque colector para recirculación del anillo líquido, una bomba de recirculación y un intercambiador de calor para enfriamiento del líquido que va al anillo, se resalta que durante la operación el filtro trabaja con dos subsistemas de vacío idénticos, es decir dos subsistemas iguales al planteado en la Figura 3-5. Es importante destacar que todo el líquido recuperado de la filtración va hacia los tanques de lavado y tanques de destilación, ya que por las características operacionales de la bomba de vacío esta debe de trabajar con líquido frío para evitar el calentamiento y por tanto la pérdida de vacío.

A continuación, se presenta un esquema general del sistema de vacío.



**Figura 3-5:** Representación del subsistema de vacío, tomado de (Catalogo\_pompetravaini).

### **3.2.3.2 Subsistema de lavado**

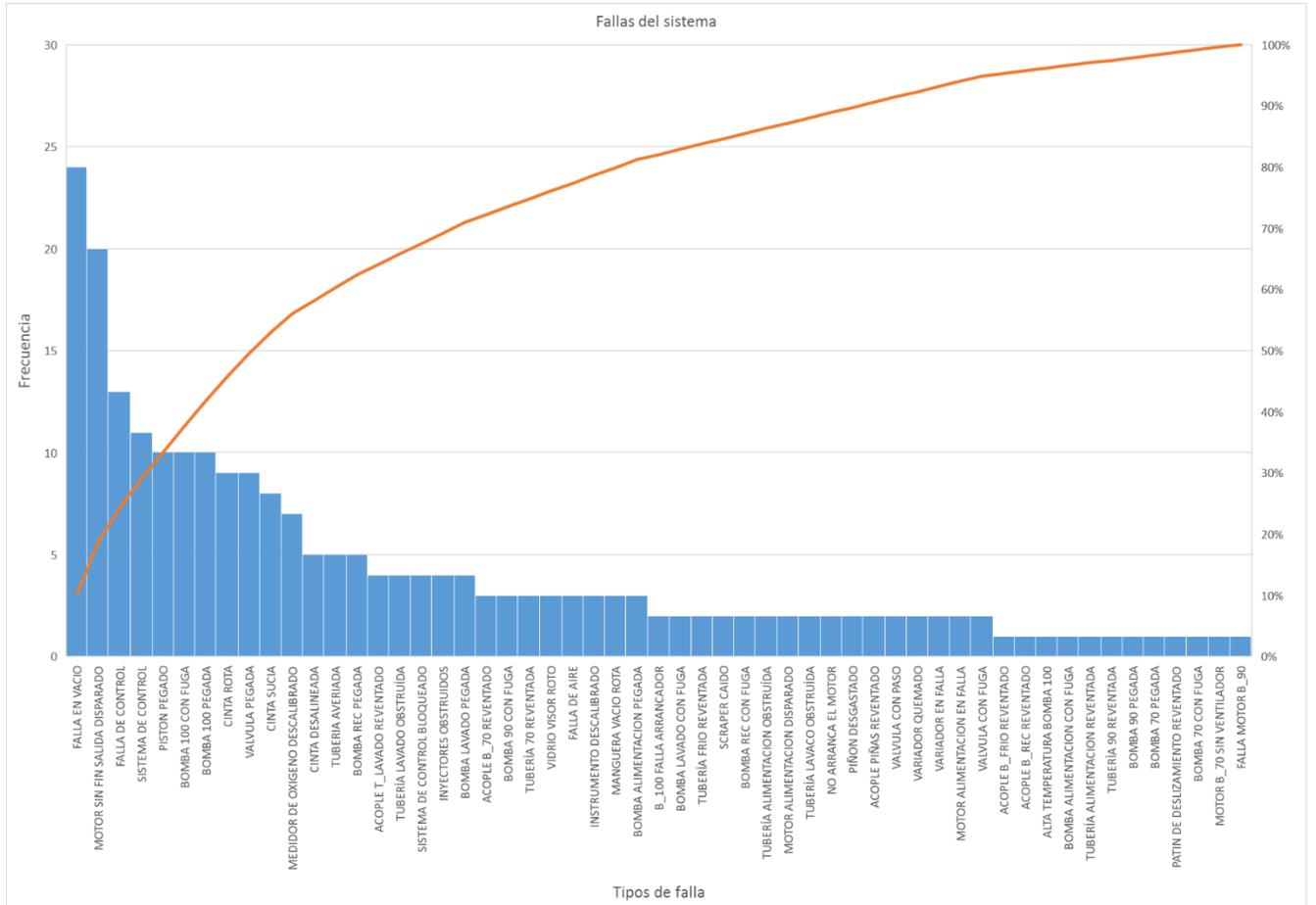
El subsistema de lavado está conformado por tanques y bombas que trabajan en serie continuamente, el alcohol limpio entra en el tanque de la etapa final por la parte superior, y en la parte inferior está ubicada una bomba centrífuga que impulsa el alcohol hacia la última zona de lavado; el alcohol proveniente de esta zona es succionado por el vacío y cae al tanque siguiente, de igual forma este es enviado a una nueva zona de lavado hasta llegar a la primera zona. Cuando el alcohol llega a esta primera zona se envía a destilación.

### **3.2.3.3 Subsistema de alimentación**

El subsistema de alimentación está compuesto por dos bombas de desplazamiento positivo las cuales succionan el producto sin purificar desde los tanques de almacenamiento. Generalmente, una de estas bombas es la encargada de alimentar el filtro, mientras que la otra permanece como reserva en caso de que ocurra una falla.

## **3.3 Análisis del histórico de fallas**

En la Figura 3-6, presentado a continuación, se relacionan todas las fallas generadas por el sistema, en el cual puede evidenciarse la causa que genera el paro. En este gráfico, por medio de la línea de magnitud acumulada se observa que aproximadamente el 40% de las fallas presentadas son generadas por tres tipos de problemas, cada uno de ellos asociado a un subsistema del equipo (sistema de vacío, sistema de control y equipo), igualmente puede verse que en este 40% hay tres tipos de fallas diferentes pertenecientes al subsistema de vacío; por lo que se debe realizar un análisis más detallado de las fallas presentadas por los subsistemas, teniendo en cuenta que, si se eliminan las causas que los provocan desaparecería la mayor parte de los problemas asociados.



**Figura 3-6:** Histórico de fallas presentadas por el sistema general.

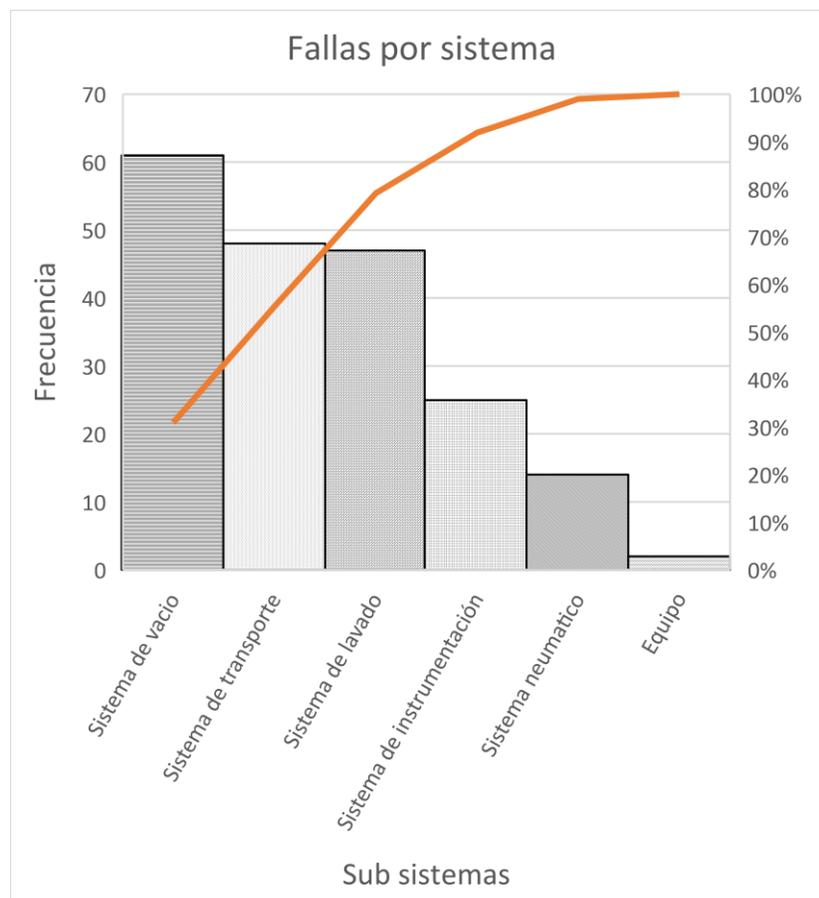
Como se evidenció en la Figura 3-6, en el sistema existen fallas asociadas a los subsistemas que deben ser analizados por separado, por lo que nuevamente se construye un segundo diagrama de Pareto en el que son identificadas las fallas por subsistema, de esta forma, se podrán atacar más fácilmente los daños e implementarse una metodología de mantenimiento adecuada por subsistema.

La Tabla 3-1 muestra el número de fallas asociadas al tipo de subsistema que pertenece según fueron identificadas en la base de datos.

**Tabla 3-1:** Total de fallas asociadas a cada subsistema.

Fallas por sistema	N fallas
Sistema de lavado	47
Sistema de vacío	61

Sistema de transporte	48
Sistema de alimentación	14
Equipo	2
Sistema de control	28
Sistema neumático	14
Sistema de instrumentación	25



**Figura 3-7:** Fallas totales por subsistema.

En la Figura 3-7, se muestra la línea de magnitud acumulada para el total de fallas del sistema general, en el cual se evidencia claramente que aproximadamente el 30% de las fallas del sistema pertenecen al subsistema de vacío y entre el subsistema de vacío y el subsistema de lavado hay más del 49% de estas fallas.

En el purificado de la CMC estos subsistemas son vitales, ya que del sistema de lavado depende obtener la pureza mínima requerida por la FDA, del inglés Food and Drug Administration, para aditivos de grado alimenticio, a su vez del sistema de vacío depende el filtrar y recuperar la mayor cantidad de solvente durante el lavado, de lo contrario sería casi imposible aumentar la rata de producción y las pérdidas de solvente serían muy grandes, por lo que el precio del producto final sería muy elevado.

Por tanto, debido a la importancia que tiene cada subsistema en el proceso de producción, filtrado y purificado de la CMC, además de la complejidad de cada subsistema, dicha complejidad puede extenderse a lo largo del desarrollo de todo el trabajo al analizar todos los subsistemas. Por consiguiente, se enfocará inicialmente su desarrollo solo al subsistema de vacío, el cual presenta la mayor cantidad de fallas hasta la fecha.

Para su desarrollo, se analiza como base principal para el análisis los componentes críticos representados en la base de datos de las fallas del sistema principal (Ver anexo A).

## **4 Propuesta metodológica**

### **4.1 Aplicación cualitativa de las herramientas de análisis**

#### **4.1.1 Análisis funcional**

Con el objetivo de realizar un estudio detallado del sistema seleccionado, se toma como referencia el análisis propuesto por (Guevara Carazas y Souza, 2008), donde los autores resaltan la importancia de la elaboración de un árbol funcional para obtener un análisis funcional más detallado del caso de estudio.

La construcción de un árbol funcional involucra todas las partes del sistema, separando por niveles todos sus componentes. En todos los casos, se deben enumerar y definir sus funciones principales y secundarias, de esta forma el árbol queda definido desde el sistema hasta los componentes, llevándolo a un nivel de detalle suficiente para identificar los principales modos de falla que afectan el funcionamiento del filtro lavador y el cual servirá como base para la elaboración del FMEA (Análisis de modos y efectos de falla).

#### **4.1.2 Definición de componentes en el subsistema**

En la operación diaria del sistema seleccionado para el caso de estudio, se han presentado durante varios años de trabajo, múltiples fallas en el equipo que han representado paros significativos en la producción, lo que ha generado que sea necesario buscar de forma

rápida alternativas de reemplazo de piezas o componentes que son vitales para su correcto funcionamiento.

El histórico de fallas del equipo de análisis representa los primeros casos de criticidad identificados en la operación diaria del sistema. De este modo, en el presente caso de estudio, se analizarán a partir de los históricos de fallas, los casos críticos identificados en el listado de operación del sistema, obtenido de los últimos años de trabajo, por lo cual solo se describirá el subsistema y sus componentes principales.

### 4.1.3 Componentes del subsistema de vacío

A continuación, se realiza una descripción de cada uno de los componentes que integran el subsistema de vacío.

**Bomba de vacío:** Extraer el líquido filtrado a través de la bandeja de vacío a una presión de -14 mmHg.

- **Motor:** Convertir energía eléctrica en mecánica para dar movimiento a la bomba.
- **Variador:** Variar la frecuencia de trabajo de la bomba, aumentando o disminuyendo la succión.
- **Acople de rejilla:** Mantener unido los ejes principales del motor y la bomba de vacío.
- **Sensor de temperatura:** Medir la temperatura del líquido de entrada
- **Enfriamiento:** Líquido encargado de enfriar el solvente.
- **Válvulas rompe vacío y salida de alcohol:** Cortar el vacío y descargar el líquido a los tanques de almacenamiento cuando la bandeja llega al tope.
- **Tuberías:** Medios de transporte de los fluidos.
- **Carcaza:** Cuerpo de la bomba.
- **Impulsor:** Girar de forma excéntrica respecto al anillo para aumentar la aspiración.
- **Eje:** Mantener alineado todo el sistema interno de la bomba.
- **Colectores:** Dirigir la entrada y salida del vacío y los fluidos.
- **Cojinetes:** Permitir que el eje gire libremente.
- **Cierres mecánicos:** Hermetizar el cuerpo de la bomba para mejorar el funcionamiento.

- 
- **Tanque de recirculación:** Separar vapores y líquido, manteniendo un nivel líquido suficiente para recircular al anillo.

**Bomba de recirculación al anillo:** Mantener un anillo líquido constante dentro de la bomba de vacío.

- **Impulsor:** impulsar el líquido hacia la bomba para mantener el anillo.
- **Eje:** Transmitir la rotación del motor al impulsor.
- **Motor:** Convertir energía eléctrica en mecánica para dar movimiento a la bomba.
- **Rodamientos:** Permitir la correcta rotación del rodillo principal.
- **Intercambiador de calor:** Enfriar el líquido que va al anillo de la bomba de vacío.
- **Placas fijas:** Mantener ajustado el conjunto de placas.
- **Placas móviles:** Intercambiar calor entre sus fluidos a través de las paredes.
- **Juntas:** No permitir fugas de líquidos.

Definidos los componentes del subsistema y teniendo en cuenta que en el numeral anterior se definieron los componentes que hacen parte del sistema de análisis, a continuación, se construye el árbol funcional del subsistema, en el cual se identificarán los componentes principales. En la Figura 4-1, se presenta el árbol funcional del sistema.

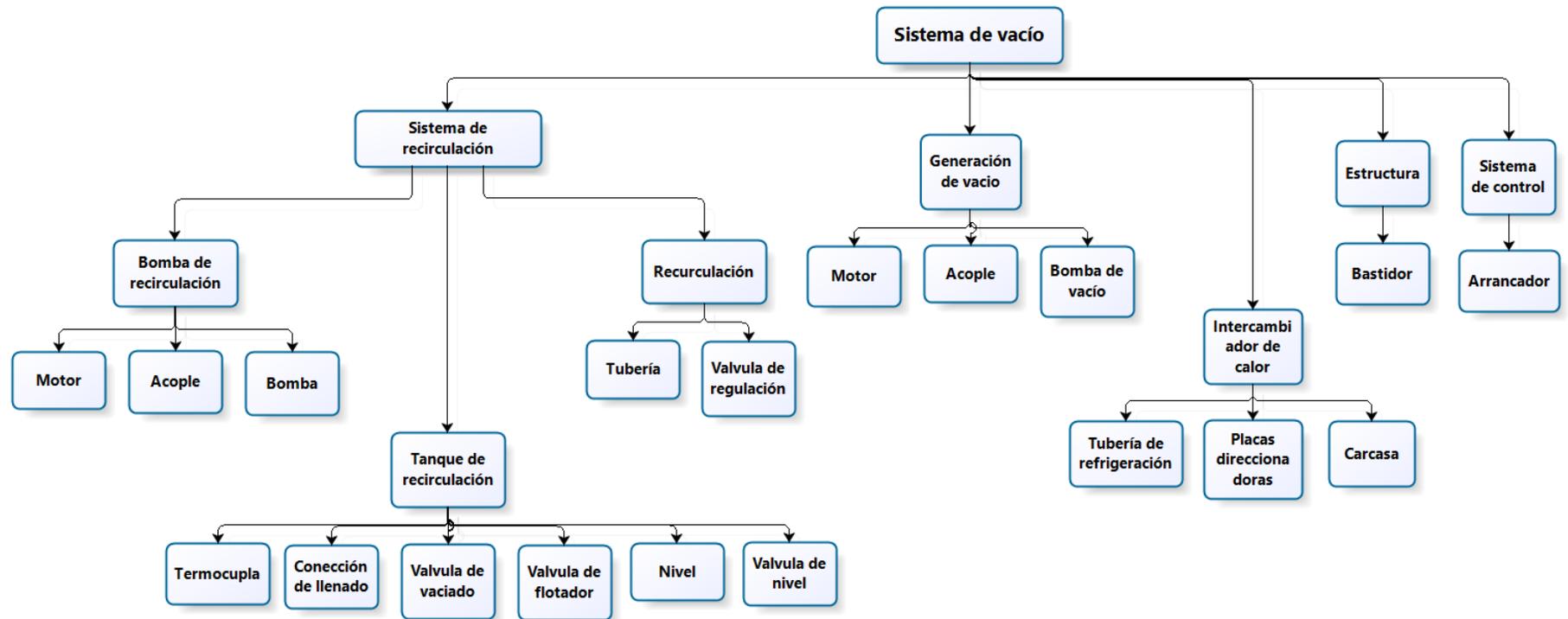


Figura 4-1: Árbol funcional del sistema de vacío.

#### 4.1.4 Análisis de confiabilidad

A partir de los datos colectados de los paros generados en el sistema de estudio, desde finales del 2012 hasta 2016 se construyeron los gráficos de confiabilidad y tasa de falla con el fin de determinar en qué etapa de vida se encuentra el sistema.

Es importante determinar el tipo de distribución que tenga un mejor ajuste a los datos, por lo que se considerará un análisis comparativo de diversos métodos.

#### 4.1.5 Aplicación Distribución exponencial

Para este caso, inicialmente los datos son modelados por medio de una distribución exponencial, cuya ecuación y parámetros se expresan como:

Distribución de densidad

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (\text{Ec } 20)$$

Distribución acumulada

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{Ec } 21)$$

Al linealizar la función de distribución de densidad se obtiene la función de confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{Ec } 22)$$

Donde  $R(t)$  es la confiabilidad del sistema,  $\lambda$  es la tasa de fallo la cual es una constante positiva expresada como  $\lambda: 1/\text{MTBF}$

### 4.1.6 Aplicación Distribución Weibull

Del mismo modo, los datos son modelados por medio de una distribución exponencial, cuya ecuación y parámetros son expresados como:

Distribución de densidad

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Ec 25})$$

Distribución acumulada

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Ec 26})$$

Al linealizar la función de distribución de densidad se obtiene la función de confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Ec 27})$$

Donde  $R(t)$  es la confiabilidad del sistema y  $\beta$  y  $\eta$  son los parámetros de dicha distribución.

A partir de los datos obtenidos registrados del listado de fallas, se calculan los tiempos medios entre falla (MTBF) y linealizando la función de densidad  $f(t)$  para ambas distribuciones, puede graficarse por medio de regresión lineal la recta que mejor se ajuste a la nube de datos y se obtiene la ecuación de la línea recta y el coeficiente de correlación empírico para el conjunto de datos. Los datos son modelados por medio de estas dos distribuciones, cuyas funciones de distribución se muestran a continuación en las Tablas 4-1 y 4-2.

<b>Lambda</b>	0,0029
<b>Intercepto</b>	0,2794
<b>Eta</b>	341,5231

**Tabla 4-1:** Parámetros de distribución de confiabilidad para Exponencial empírico.

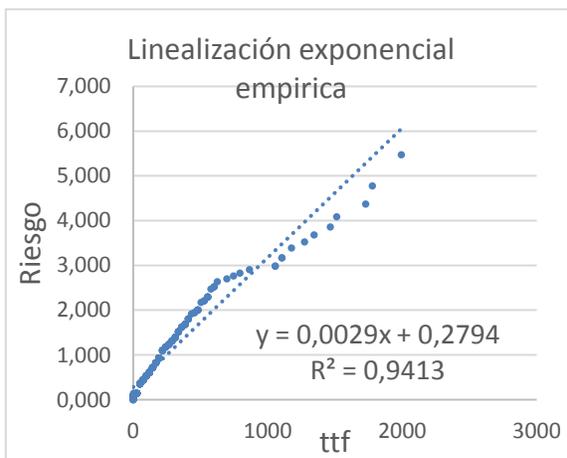
<b>Beta</b>	0.5744
<b>Intercepto</b>	-3,0038
<b>Eta</b>	189,7111

**Tabla 4-2:** Parámetros de distribución de confiabilidad para Weibull empírico.

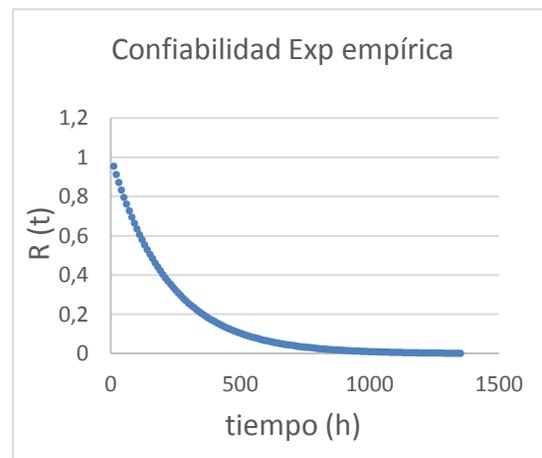
Puede verse que la información de la Figura 4-2 presenta un valor  $\beta < 1$ , de aquí puede decirse que el equipo se encuentra en la región de fallas precoces; esto significa que a medida que aumente el tiempo de operación del sistema las fallas se reducirán considerablemente.

Este tipo de comportamiento es considerado normal cuando son operados equipos de alta complejidad, a los cuales se les debe hacer ajustes constantes para encontrar el punto óptimo de operación, funcionalidad y rendimiento del proceso.

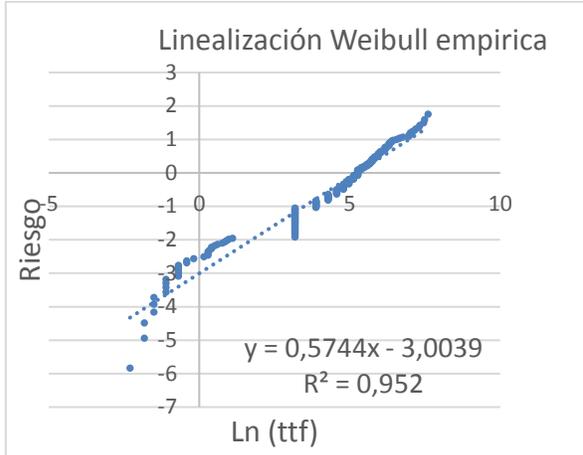
A continuación, se presentan los gráficos obtenidos de las regresiones realizadas con los datos obtenidos de los paros del sistema.



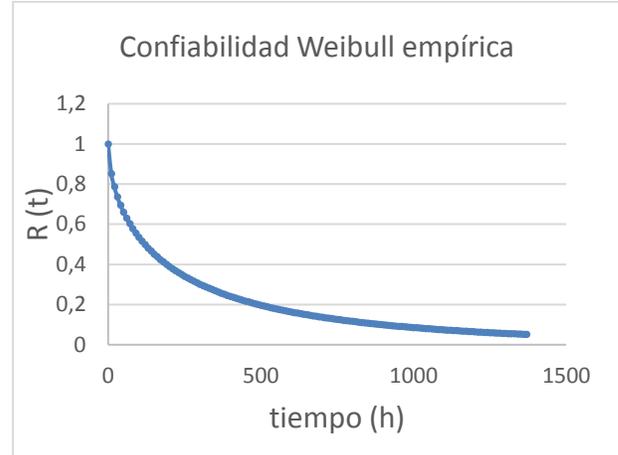
**Figura 4-2:** Regresión exponencial del sistema empírico.



**Figura 4-3:** Confiabilidad exponencial del sistema empírico.

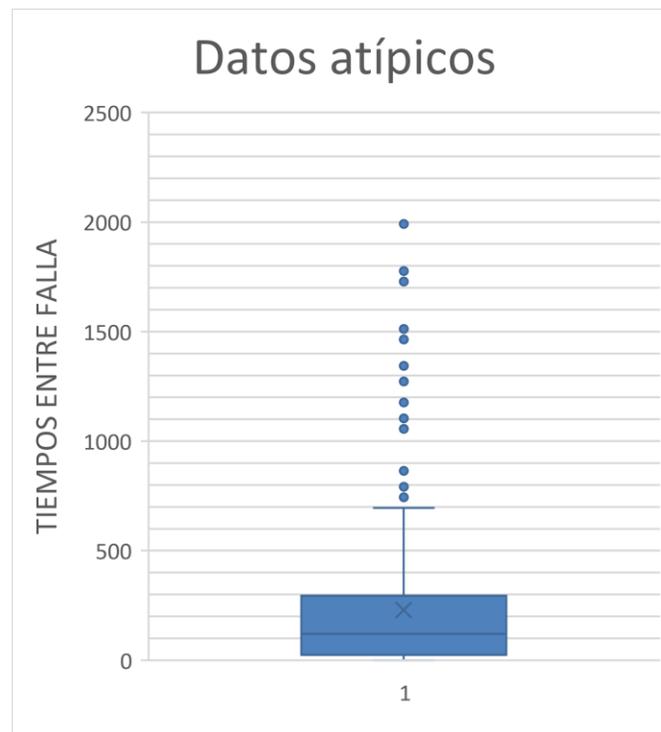


**Figura 4-4:** Regresión Weibull del sistema empírico.



**Figura 4-5:** Confiabilidad Weibull del sistema empírico.

Con el fin de tener una mejor aproximación del conjunto de datos en la regresión presentada en las Figura 4-2 y Figura 4-4, se construye un diagrama de caja (Figura 4-6), con el cual se podrá observar fácilmente la variación de los datos de los tiempos entre falla, y de esta forma se considerará eliminar los puntos más alejados de la regresión buscando una mejor estimación de los gráficos a comparar.



**Figura 4-6:** Diagrama de caja de los tiempos atípicos entre falla.

En el diagrama de la Figura 4-6 se observan algunos datos atípicos que corresponden a la lista de fallas del sistema. Dichas fallas fueron revisadas detenidamente, teniendo en cuenta las observaciones descritas por los operadores quienes fueron los encargados de reportarlas en el histórico de fallas. De acuerdo a lo anterior, se evidenció una serie de errores asociados a la información registrada, ya que varios de estos datos fueron paros programados e incluso fallas asociadas al equipo sin una descripción clara del subsistema que falló. Por tanto, para obtener un resultado más preciso, dichos datos son descartados de la lista de fallas con el fin de realizar una comparación más clara entre las correlaciones empírica y ajustada.

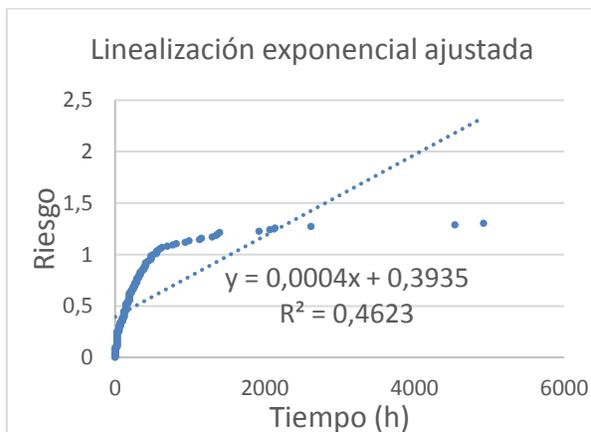
<b>Lambda</b>	0,00039
<b>Intercepto</b>	0,3934
<b>Eta</b>	2537,9767

**Tabla 4-3:** Parámetros de distribución de confiabilidad para exponencial ajustada.

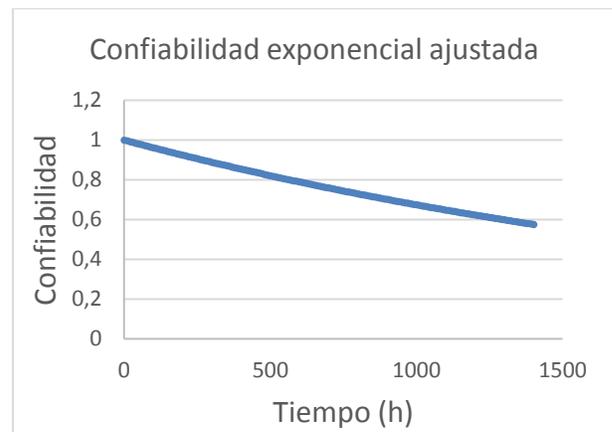
<b>Beta</b>	0,5010
<b>Intercepto</b>	-3,2417
<b>Eta</b>	645,4719

**Tabla 4-4:** Parámetros de distribución de confiabilidad para Weibull ajustada.

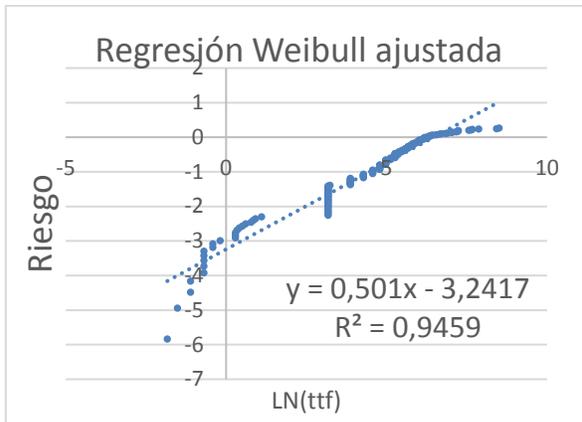
A continuación, se presentan los gráficos construidos con las regresiones realizadas a partir de los datos ajustados.



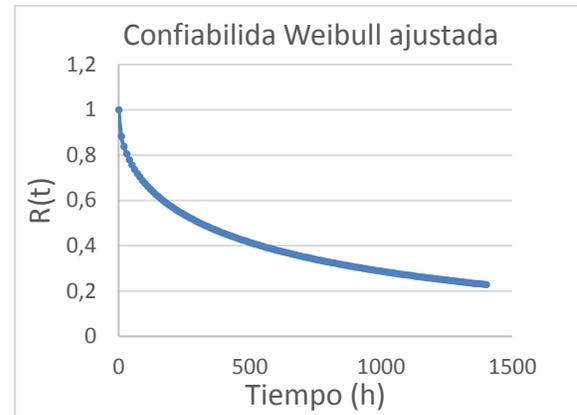
**Figura 4-7:** Regresión exponencial del sistema ajustado.



**Figura 4-8:** Confiabilidad exponencial del sistema ajustado.



**Figura 4-9:** Regresión Weibull del sistema ajustado.

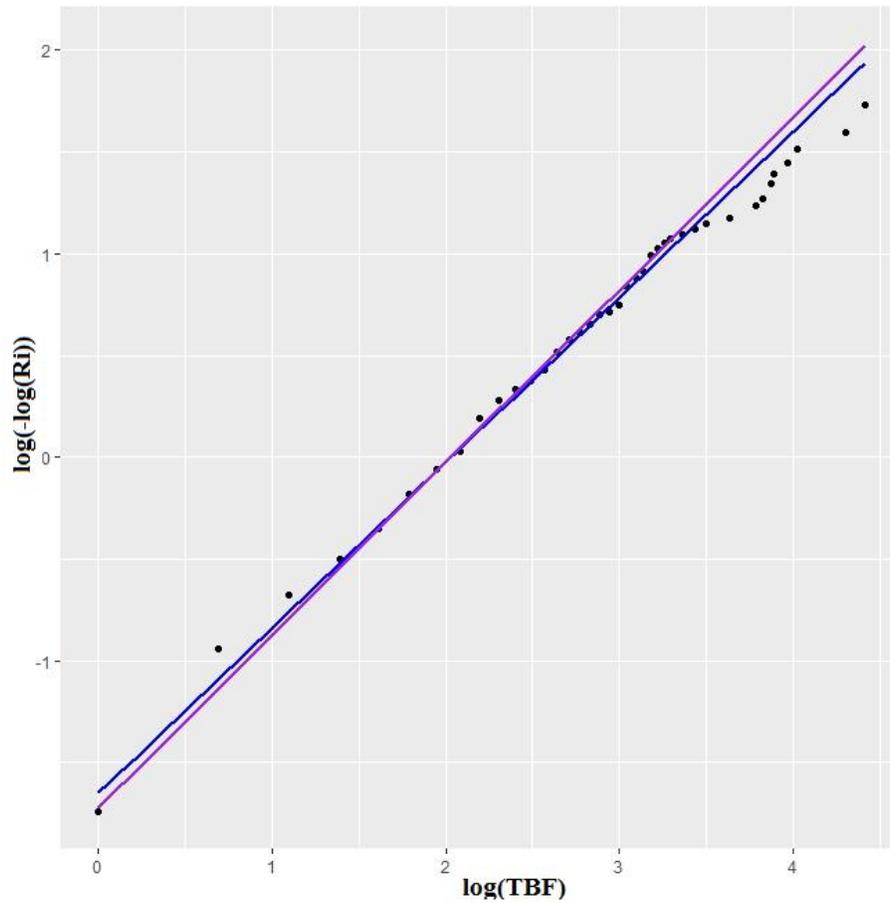


**Figura 4-10:** Confiabilidad Weibull del sistema ajustado.

Al comparar las confiabilidades del sistema empírico y ajustado luego de la eliminación de los datos atípicos, se evidencia claramente un gran cambio entre el coeficiente de correlación  $R^2$  obtenido para la distribución exponencial, por lo que puede considerarse descartar esta distribución como método de análisis.

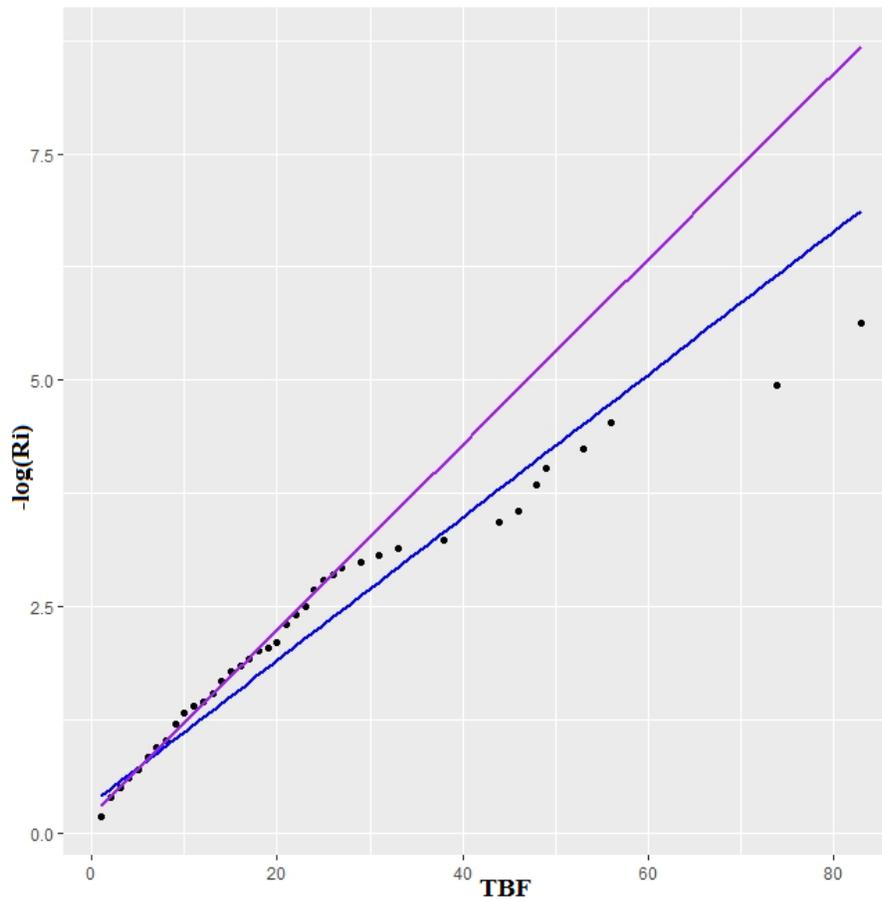
A demás, en los gráficos mostrados en las Figura 4-7 y Figura 4-9 calculados en Excel se evidencia un mayor ajuste en los datos ajustados y graficados bajo una regresión Weibull. Sin embargo, el coeficiente de correlación  $R^2$  no presenta mucha variación, lo que genera dudas en la interpretación de los datos, ya que generalmente una regresión ajustada debe tener menor ajuste entre los datos y por tanto un coeficiente de correlación  $R^2$  menor al obtenido en la Figura 4-4. Motivo por el que se decide graficar nuevamente los datos ajustados en el software estadístico R © y de esta forma hacer una comparación entre la información obtenida.

Del software se obtuvo lo siguiente.



**Figura 4-11:** Regresión Weibull ajustada y no ajustada.

La Figura 4-11 muestra la linealización de los datos bajo la distribución Weibull ajustado y no ajustado. La línea morada representa la linealización no ajustada con un  $R^2 = 0.9934$ ; siendo así, la azul la ajustada con un  $R^2 = 0.657$



**Figura 4-12:** Regresión exponencial con  $R^2 = 0.5616$ .

La Figura 4-12 muestra la linealización de los datos bajo la distribución Exponencial ajustado y no ajustado. Del mismo modo, la línea morada representa la linealización no ajustada con un  $R^2 = 0.9483$ ; siendo la azul, la ajustada con un  $R^2 = 0.5616$

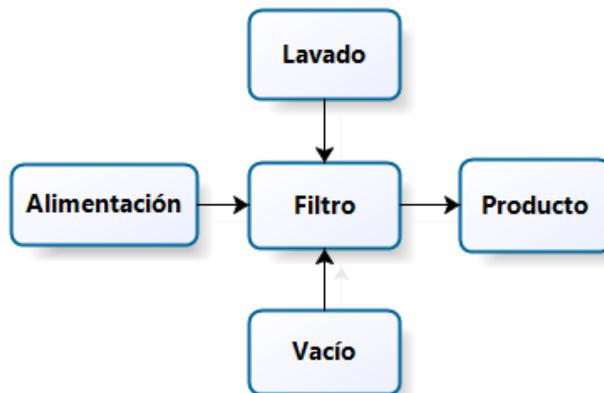
Al comparar los resultados obtenidos en las figuras, se evidencia un mayor ajuste para los datos graficados bajo la distribución Weibull, por lo que debe descartarse la distribución exponencial como método de análisis.

Al igual que la información obtenida en Excel, en R © se evidencia que la regresión realizada para la distribución Weibull obtiene un mayor ajuste en el coeficiente de correlación comparado con el obtenido por la distribución exponencial, esto se debe a que el conjunto de datos atípicos puede ser discriminado por el software automáticamente, obteniendo así un mejor ajuste de la información graficada. De esta forma se concluye que los tiempos de falla obtenidos provienen de una distribución Weibull. En este punto, cabe resaltar la importancia que tiene el uso de programas especializados para el análisis de datos.

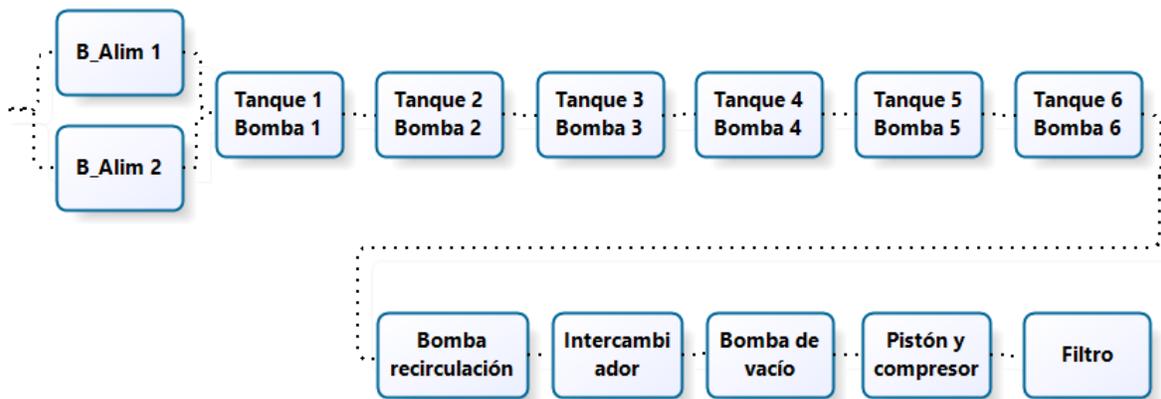
## 4.2 Aplicación cuantitativa de las herramientas de análisis

### 4.2.1 Diagrama de bloques

A continuación, se presenta el esquema general del sistema de lavado y su configuración por subsistema, con el cual se debe construir y evaluar la ecuación general para dicho sistema (Bourouni, 2013).



**Figura 4-13:** Esquema general del sistema de lavado y filtración.



**Figura 4-14:** Diagrama de bloques por subsistemas para el equipo de lavado y filtración.

A partir de los diagramas generados y teniendo en cuenta las consideraciones generales para los diagramas de bloques en serie y paralelo en el Capítulo 2, puede construirse la ecuación de confiabilidad que representa el sistema de análisis.

#### 4.2.1.1 Ecuaciones para los subsistemas presentados en el diagrama.

Cabe resaltar que, para la alimentación, el subsistema se encuentra en paralelo, debido a que si fallan las dos bombas todo el sistema colapsa. Por lo que la ecuación es representada así:

$$R(t)_{Alim} = 1 - [(1 - R_1(t)) * (1 - R_2(t))] \quad (\text{Ec } 27)$$

$$R(t)_{Alim} = 1 - [(1 - R(t)_{B1}) * (1 - R(t)_{B2})] \quad (\text{Ec } 28)$$

En este punto se debe considerar que ambas bombas son exactamente iguales en características, por lo que se asume que la confiabilidad es la misma para ambas.

La ecuación que describe los bloques en serie está determinada de la siguiente forma:

$$R(t) = e^{-\sum_{j=1}^n \lambda_j * t} = R(t)_{Filtro} * R(t)_{Neuma} * R(t)_{S_{vacio}} * R(t)_{S_{lavado}}$$

(Ec29)

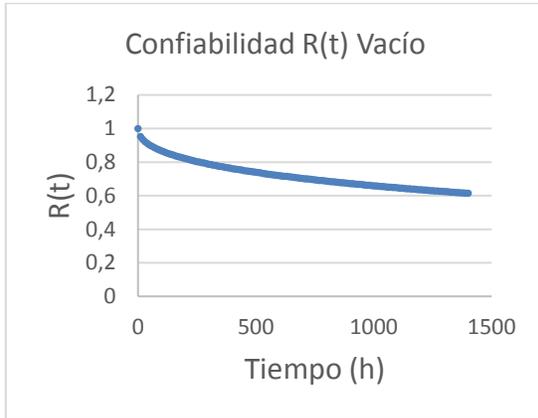
La ecuación general del sistema se define como:

$$R(t) = (R(t)_{Alim}) * (R(t)_{Filtro} * R(t)_{Neuma} * R(t)_{S_{vacio}} * R(t)_{S_{lavado}})$$

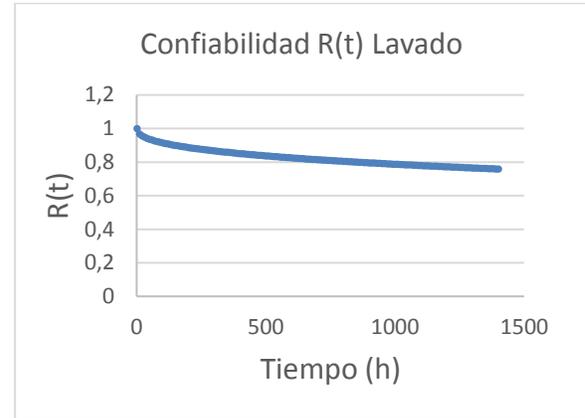
(Ec 30)

Para resolver esta ecuación, se debe calcular la confiabilidad a partir del historial de falla del sistema, y por tanto se deben reagrupar por subsistema (alimentación, filtro, sistema neumático, sistema de vacío y sistema de lavado) todas las fallas obtenidas en el histórico, y de esta forma calcular su confiabilidad a partir de la distribución Weibull y evaluarlo en un tiempo  $t$ .

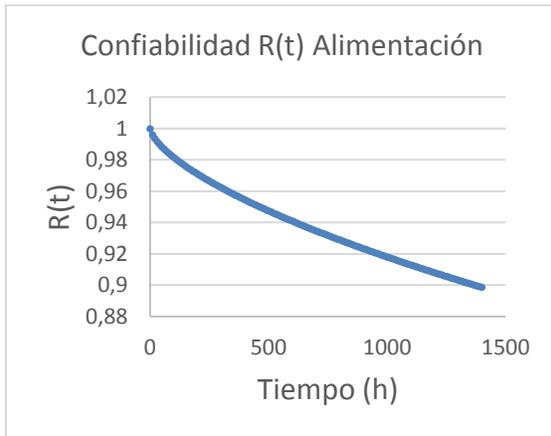
Los resultados obtenidos y las gráficas son mostrados a continuación.



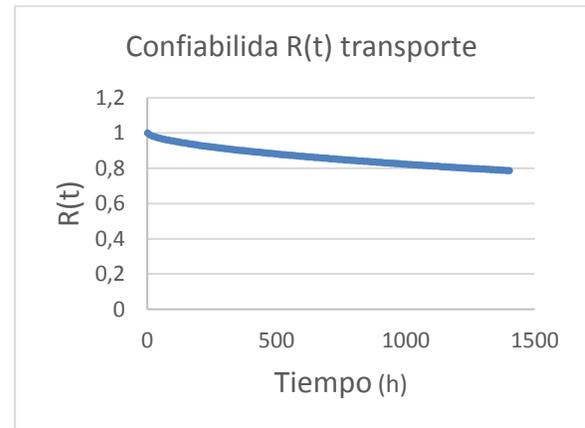
**Figura 4-15:** Confiabilidad sistema de vacío en 1400 h de operación.



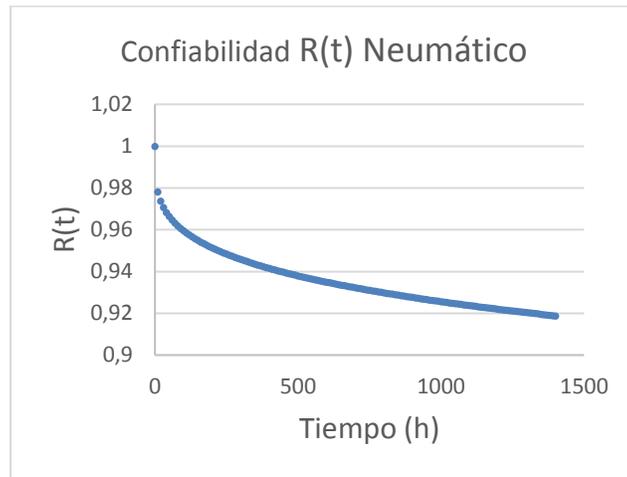
**Figura 4-17:** Confiabilidad sistema de lavado en 1400 h de operación.



**Figura 4-16:** Confiabilidad sistema de alimentación en 1400 h de operación.



**Figura 4-18:** Confiabilidad sistema de transporte en 1400 h de operación.



**Figura 4-19:** Confiabilidad sistema neumático en 1400 h de operación.

La confiabilidad obtenida en 1400 h de operación para cada uno de los subsistemas es:

$$R(t)_{Vacío} = R(1400 h)_{Vacío} = 0.6148$$

$$R(t)_{Alimen} = R(1400 h)_{Alimen} = 0.8987$$

$$R(t)_{Lavado} = R(1400 h)_{Lavado} = 0.7593$$

$$R(t)_{Filtro} = R(1400 h)_{Filtro} = 0.7880$$

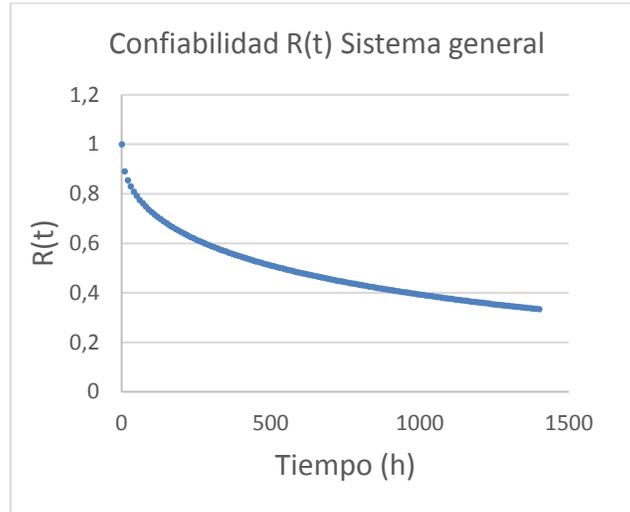
$$R(t)_{Neuma} = R(1400 h)_{Neuma} = 0.9188$$

Una vez más, se evidencia que el subsistema que menor confiabilidad tiene en el tiempo de evaluación es el sistema de vacío, por tanto, a partir de este análisis se confirma que el subsistema que primero debe atacarse debe ser el de vacío, el cual es primordial para mantener el sistema general con una confiabilidad alta.

A continuación, se evalúa la confiabilidad del sistema general, Ecuación 30.

$$R(t) = (R(t)_{Alim}) * (R(t)_{Filtro} * R(t)_{Neuma} * R(t)_{Svacío} * R(t)_{Slavado})$$

La ecuación se evalúa para diferentes tiempos a partir de las confiabilidades obtenidas de los subsistemas en el mismo tiempo.



**Figura 4-20:** Confiabilidad del sistema general en el tiempo t (h).

Y evaluando para un tiempo de 1400 h (58 días de trabajo) se obtiene que:

$$\begin{aligned}
 R(t)_{Alim} &= 1 - [(1 - R(t)_{B1}) * (1 - R(t)_{B2})] \\
 &= 1 - (1 - 0.8987)(1 - 0.8987) = 0.9897 \\
 R(1400) &= (0.9897) * (0.7880) * (0.9188) * (0.6148) * (0.7593) \\
 R(1400) &= 0.3342
 \end{aligned}$$

Como puede verse, el sistema general conserva una confiabilidad baja debido a que algunos de los subsistemas tienen la confiabilidad baja, por tanto, es importante enfocarse en el análisis y desarrollo de un plan de mantenimiento que se enfoque en los subsistemas más críticos.

Al comparar los gráficos de la Figura 4-10 (Confiabilidad del sistema ajustado  $R(1400) = 0.229$ ) y la Figura 4-20 (Confiabilidad del sistema general  $R(1400) = 0.334$ ), claramente se evidencia una diferencia entre los resultados obtenidos por los métodos evaluados. Esto se debe, a que el resultado presentado en el sistema ajustado reúne el total de las fallas de todo el sistema (subsistemas: vacío, lavado, alimentación, filtro y neumático), a diferencia del sistema de bloques, donde algunos de los tiempos entre falla (MTBF) de cada subsistema se hacen más extensos generando poca variación.

Con el desarrollo de este caso de estudio, se elaboró (Cap.5) un plan de mantenimiento para aumentar la confiabilidad del subsistema de vacío a valores de al menos 95%, buscando que se ajuste adecuadamente a las necesidades del proceso y aumente su confiabilidad en al menos 50% para el mismo periodo de tiempo. Estudios posteriores serán enfocados en aumentar la confiabilidad de los subsistemas restantes.

### **4.2.2 Aplicación del análisis de modos y efectos de fallas (FMEA)**

En el análisis funcional realizado en el inciso anterior, pudo identificarse los componentes críticos del sistema, los cuales bajo un mal programa de mantenimiento pueden ser responsables de múltiples paros del sistema y por tanto múltiples paros de la planta de producción, lo que se reflejaría en bajas de producción, posibles pérdidas de calidad y utilidades para la empresa. Por lo que desarrollar un análisis de cada modo y efecto de falla proporcionará información detallada para mejorar el programa de mantenimiento.

Es importante resaltar que, para la evaluación y valoración de los riesgos en el análisis FMEA, se siguen los criterios establecidos en la norma SAE J-1739 (ver anexo A).

### **4.2.3 Identificación y evaluación de riesgos**

Como se mencionó previamente, en el inciso anterior pudo identificarse que el subsistema que presenta una confiabilidad menor es el subsistema de vacío, por lo que se tomarán como referencia para el desarrollo del análisis FMEA todas las fallas asociadas a este en el histórico y a su vez se valorará su ocurrencia.

Durante el desarrollo del FMEA, fueron analizados los posibles modos de fallas asociados a cada uno de los equipos del subsistema. Estos junto con sus componentes fueron descritos en el numeral 4.1.3 (motor, bomba de vacío, motor y bomba de recirculación, intercambiador de calor).

Una vez construido y evaluado el FMEA se presentan las fallas más importantes según la valoración del RPN (número de riesgo prioritario) identificadas en el análisis, los cuales son asociados a las fallas ocurridas. Éstas al no tener un plan de mantenimiento adecuado, pueden causar nuevamente el paro del sistema de vacío y por tanto un paro en la línea de producción.

De esta forma (Duffuaa y Ben-Daya, 2009), menciona que el uso de análisis RPN para priorizar los modos de falla presentan algunas limitaciones como:

- Diferentes valores de severidad, ocurrencia y detección pueden producir el mismo RPN, aunque las implicaciones de riesgo puedan ser diferentes.
- La severidad, la ocurrencia y la detección tienen la misma importancia para calcular el RPN.

Debido a las razones expuestas en el párrafo anterior, se opta por priorizar el análisis de fallas desarrollando una matriz de riesgo. En esta matriz se identifican todos los posibles modos de fallas encontrados en el FMEA, los cuales fueron discriminados según su ocurrencia y severidad en el proceso de producción de CMC. Ver Figura 4-21.

Del mismo modo, se identificaron en el FMEA las fallas más ocurrentes en el histórico de fallas, las cuales se vinculan a la matriz entre riesgo medio y alto, por lo que deben ser consideradas como tal. A su vez, estas fallas por ser críticas en el proceso y por tener un historial de ocurrencia alto, serán analizados más adelante en un análisis causa raíz.

A continuación, en las Tablas 4-5 hasta 4-8 se muestran algunas de las fallas encontradas en el análisis FMEA y presentes en el histórico del sistema.

**Bomba de vacío con fuga:****Tabla 4-5:** Fallas críticas reportadas en el histórico para la bomba de vacío con fuga.

<b>Modo potencial de falla</b>	<b>Causas potenciales de la falla</b>	<b>Efectos potenciales de la falla</b>
<b>Sellos mecánicos rotos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desalineación.</li> <li>2. Vibración</li> <li>3. Exceso de horas de trabajo</li> <li>4. Desajuste del resorte</li> <li>5. Falta de refrigeración</li> <li>6. Temperaturas excesivas</li> </ol>	Fugas apreciables de alcohol, conlleva pérdidas de producto en la instalación

**Bomba de vacío pegada:****Tabla 4-6:** Fallas críticas reportadas en el histórico para la bomba de vacío pegada.

<b>Modo potencial de falla</b>	<b>Causas potenciales de la falla</b>	<b>Efectos potenciales de la falla</b>
<b>Rodamientos desgastados</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Por falta o exceso de lubricación.</li> <li>2. Por exceso de horas de trabajo.</li> <li>3. Alta temperatura.</li> <li>4. Vibración.</li> <li>5. Mal instalado.</li> </ol>	La bomba vibra más de lo normal, puede aumentarse el consumo de potencia exigiendo al motor eléctrico, hasta llevar a cabo la activación de las protecciones del motor parando el proceso.
<b>Rotor desbalanceado</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vibración excesiva</li> <li>2. Error de alineación</li> <li>3. Montaje inadecuado</li> </ol>	Paro inmediato del equipo, posibles daños internos.
<b>Rotor desgastado</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Exceso de horas de trabajo.</li> <li>2. Refrigeración deficiente</li> <li>3. Erosión por partículas contaminantes.</li> </ol>	Bajo rendimiento del equipo, pérdidas de aspiración, aumento del gasto energético.

**Bomba de recirculación con fuga:****Tabla 4-7:** Fallas críticas reportadas en el histórico para la bomba de recirculación.

<b>Modo potencial de falla</b>	<b>Causas potenciales de la falla</b>	<b>Efectos potenciales de la falla</b>
<b>Empaques</b>	1. Cristalizados 2. Ajuste inadecuado	Fugas apreciables del fluido
<b>Sellos mecánicos rotos</b>	1. Desalineación 2. Vibración 3. Exceso de horas de trabajo 4. Desajuste del resorte 5. Falta de refrigeración 6. Temperaturas excesivas	Fugas apreciables de líquido, conlleva a posibles daños en el impulsor de la bomba, sobre esfuerzo para mantener niveles adecuados

**Falla en vacío:****Tabla 4-8:** Fallas críticas reportadas en el histórico para falla en vacío.

<b>Modo potencial de falla</b>	<b>Causas potenciales de la falla</b>	<b>Efectos potenciales de la falla</b>
<b>Vacío insuficiente</b>	1. Motor defectuoso 2. Alta temperatura en el líquido del anillo 3. Alto o Bajo flujo de líquido 4. Sello mecánico roto 5. Mangueras de aspiración rotas 6. Contra presión en la tubería	Vacío insuficiente en el equipo, pérdidas de filtración en la cinta.

**Matriz de riesgo**

En la matriz de riesgo se vincula la información obtenida en el análisis de modos y efectos de falla FMEA, en el cual se identifican los modos potenciales de fallas de alto riesgo. Para esto, en cada uno de los cuadros de criticidad se referencian cada una de las causas potenciales de falla del subsistema de vacío, encontradas durante el desarrollo del FMEA

(Ver Apéndice A), cuyas criticidades se definieron según la valoración dada a las fallas presentadas en el histórico del subsistema, dependiendo que tan frecuente ocurrió y que tan severa fue.

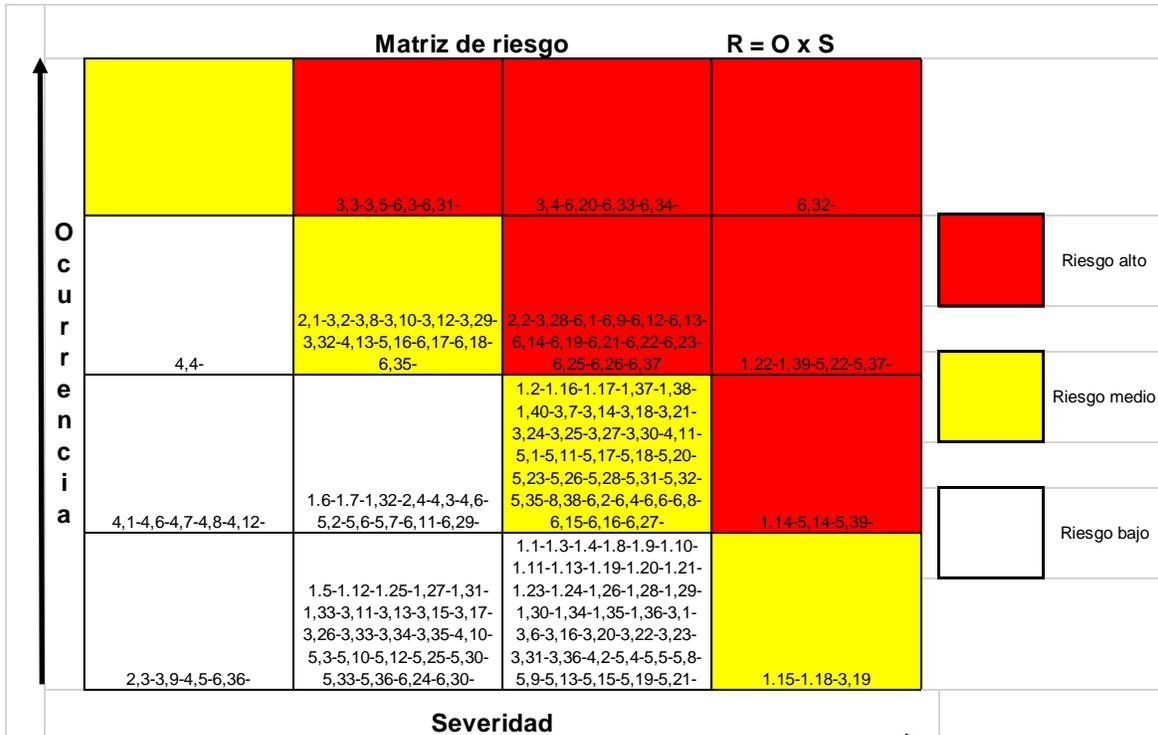
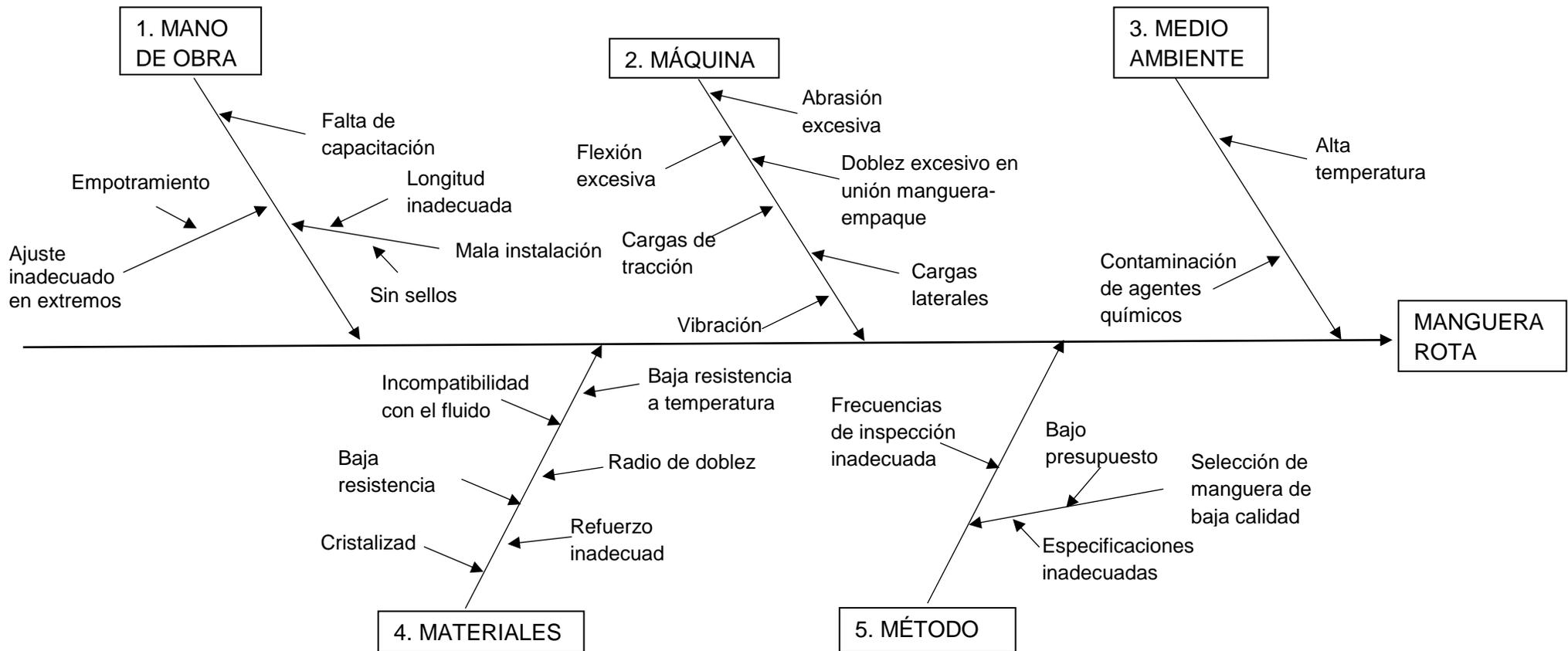


Figura 4-21: Matriz de criticidad para los modos de fallo presentados en el AMFE, tomado de (Mora Gutiérrez, 2009).

### 4.2.4 Análisis de causa raíz

Como ya se ha mencionado, un diagrama de causa y efecto es una herramienta que ayuda a organizar, identificar, ordenar y mostrar todas las posibles causas por la que un equipo puede fallar (Duffuaa y Ben-Daya, 2009), este tipo de diagramas tiene algunas similitudes con los árboles de falla y aunque son menos estructurados no son convenientes para análisis cuantitativos (Rausand y Høyland, 2004).

En el presente caso, se analizarán dos de los tipos de fallas encontradas tanto en el histórico de falla como en el análisis FMEA con alto NPR y catalogadas como críticas. Ver Figura 4-22 y Figura 4-23.



**Figura 4-22:** Análisis causa raíz para fallas en vacío, mangueras de vacío rotas.

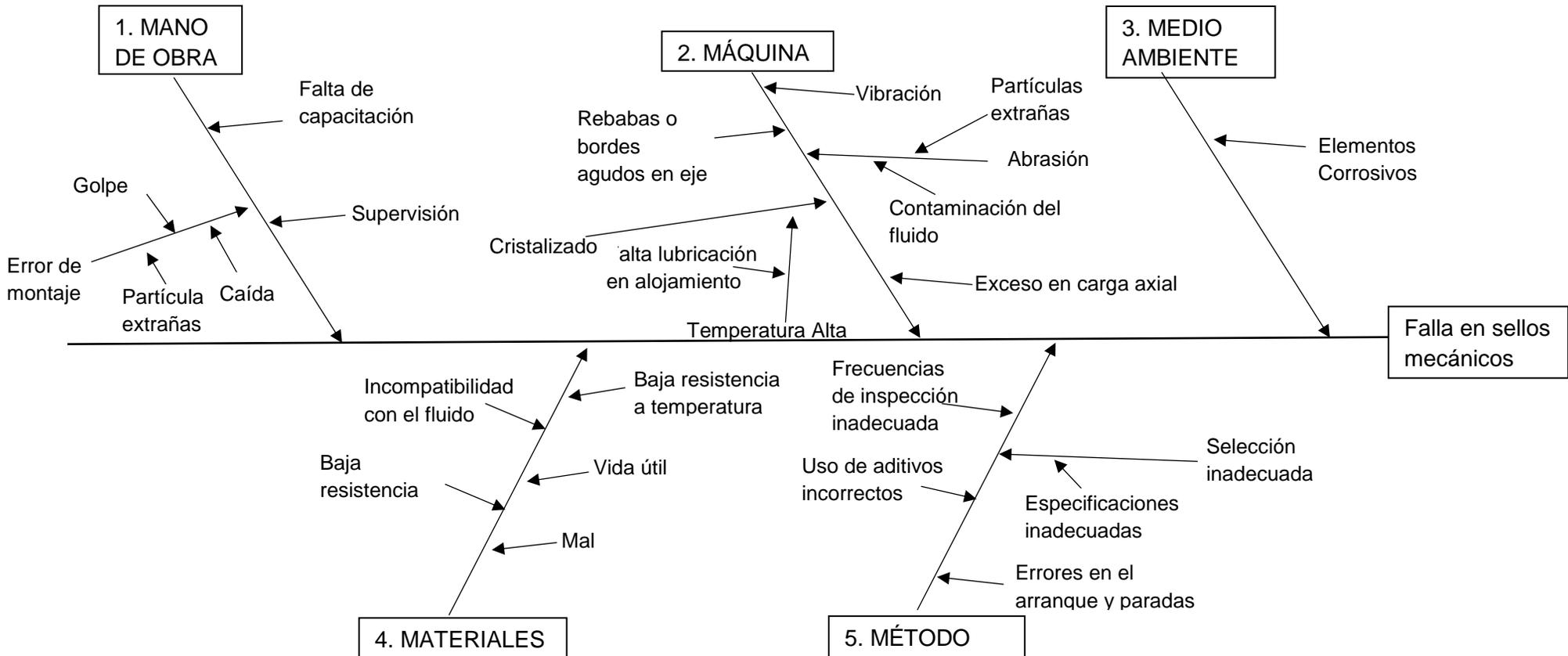
**Tabla 4-9:** Análisis causa raíz para las mangueras de aspiración rotas.

Causa	Raíz 1	Raíz 2	Acciones
Mano de Obra	Falta de capacitación		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se recomienda capacitar a personal de mantenimiento y de compras las especificaciones requeridas para el pedido de la manguera.</li> <li>- El personal técnico debe conocer el proceso adecuado de montaje de la manguera debe verificar estado, radio de dobléz, torsión, cargas, acoplamientos y sellos.</li> </ul>
	Mala instalación	Longitud inadecuada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si la manguera es muy corta se pueden inducir cargas de tracción con el movimiento lineal de ida y regreso en la bandeja</li> </ul>
		Sin sellos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La manguera debe tener sus respectivos sellos en los acoples, debe ser verificado por el personal de almacén a la hora de recibir la manguera y el técnico debe cerciorarse a la hora de la instalación que la manguera quede instalada con estos</li> </ul>
	Ajuste inadecuado en los extremos	Empotramiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un empotramiento no permite un movimiento de dobléz en la manguera lo que inducirá a un dobléz excesivo en la unión acople manguera; debe verificarse si se pueden usar adaptadores giratorios</li> </ul>
Máquina	Abrasión excesiva		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Debe revisarse después de la instalación que en la operación no se estén produciendo ningún tipo de cargas mecánicas si es inevitable debe revisarse la especificación del material</li> </ul>
	Flexión excesiva		
	Dobléz excesivo en unión manguera		
	Cargas de tracción		
	Cargas laterales		
	Vibración		
Medio ambiente	Alta temperatura		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar que no haya temperaturas excesivas que puedan sobrepasar la capacidad de material de la manguera</li> </ul>
	Contaminación con agentes químicos		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La manguera no debe estar en contacto con agentes químicos en su superficie que no sean compatibles con el material del que está hecho</li> </ul>
			-

Causa	Raíz 1	Raíz 2	Acciones
Materiales	Incompatibilidad con el fluido		- Se debe verificar si el alcohol no tiene efectos adversos o degrada el material con el que está fabricada la manguera
	Baja resistencia mecánica		- La resistencia de la manguera debe ser alta para que pueda resistir las cargas mecánicas a las que está sometida
	Refuerzo inadecuado		- El refuerzo debe ser en mayor medida con buena resistente a la fractura por los esfuerzos cíclicos que se producen en el movimiento de la bandeja
	Cristalizada		- Inspeccionar las mangueras para verificar si hay desgaste en las mismas
	Radio de doblez		- Debe verificarse cuál es el ángulo de doblez máximo que se forma en la operación y rectificar que sea mayor al que puede soportar la manguera
	Baja resistencia a temperatura		- Establecer la temperatura máxima que se genera en el ambiente y verificar que el material pueda soportarla
Método	Frecuencias de inspección inadecuadas		- Incluir en el plan de mantenimiento frecuencia de inspección de la manguera para evitar fallas
	Selección de manguera de baja calidad	Bajo presupuesto	- Verificar costo beneficio, es mejor comprar una manguera que cumpla las especificaciones y de buena calidad así la inversión sea un poco más alta
		Especificaciones inadecuadas	- Debe tenerse en cuenta todas las especificaciones requeridas según la operación para que la manguera cumpla la función

Para el análisis del Figura 4-22, puede decirse que, debido a que la manguera está constantemente sometida a flexiones causadas por los movimientos de la bandeja, se está exigiendo fuertemente el ángulo de torsión de la misma, por lo que se considera necesario utilizar acoples de giro en los puntos más críticos para reducir la tensión, así como analizar el impacto que puede tener un tipo de manguera con refuerzo de doble espiral.

Por otra parte, se considera importante analizar los efectos que tienen las sales del solvente con el material de recubrimiento interno de la manguera, ya que durante los paros extensos residuos de sales pueden adherirse en su interior, por lo que la manguera puede cristalizarse rápidamente y presentar ruptura por el punto más débil (ángulo de torsión).



**Figura 4-23:** Análisis causa raíz para fallas en vacío, sellos mecánicos.

**Tabla 4-10:** Análisis causa raíz para sellos mecánicos rotos.

<b>Causa</b>	<b>Raíz 1</b>	<b>Raíz 2</b>	<b>Acciones</b>	
Mano de Obra	Falta de capacitación		- Debe verificarse que el personal es idóneo para llevar a cabo la instalación del sello mecánico, aplicando la técnica adecuada para reducir las fallas por instalación.	
	Error de montaje	Golpes	- Los materiales de los sellos son de baja resistencia al impacto si se golpean pueden permitir fisuras que dan espacio para fugas del fluido.	
		Partículas extrañas	- Si el o-ring que está en contacto con el eje se contamina con algún tipo de partículas, se inducirá desgaste abrasivo por lo que se da espacio a fugas.	
		Caídas	- Una caída puede dejar inservible el sello o inducirle grietas y fracturas que permiten la fuga.	
	Supervisión		- El equipo de técnicos debe ser guiado y la tarea de instalación debe ser revisada para que no queden errores en la instalación.	
Máquina	Rebabas o bordes agudos en eje		- Revisar el mecanizado del eje, el acabado superficial no debe tener rebabas o bordes que afecten el o-ring del sello mecánico.	
	Vibración		- Los desgastes en rodamientos, impulsor eje, desalineaciones existentes disminuyen la vida útil de los sellos mecánicos.	
	Exceso en carga axial			
	Abrasión	Partículas extrañas		- El fluido de trabajo de la bomba debe estar en gran medida libre de impurezas de cualquier tipo ya que pueden quedarse alojadas en el alojamiento del sello.
		Contaminación del fluido		
Cristalizado	Falta de lubricación en el alojamiento		- Es necesario que el fluido llegue hasta el espacio que hay entre el eje y el sello debido a que allí se genera fricción y por ende temperatura, lo que debe ser controlado por la lubricación del fluido de trabajo en este lugar, además, es conveniente para evitar la suspensión de material particulado en esa zona.	

Causa	Raíz 1	Raíz 2	Acciones
			- Evitar en el arranque que la cara del sello esté seca porque se puede inducir desgaste por fricción.
Medio ambiente	Elementos corrosivos		- Verificar el fluido de trabajo de la bomba y comparar si los materiales del sello no reaccionan con este.
Materiales	Incompatibilidad con el fluido de trabajo		- Verificar el fluido de trabajo de la bomba y comparar si los materiales del sello no reaccionan con este, se debe elegir un material compatible con el fluido.
	Baja resistencia mecánica		- No se está utilizando un sello que cumpla con la resistencia a los esfuerzos generados en la operación.
	Baja resistencia a la temperatura		- El material de los sellos no resiste las temperaturas generadas en la operación lo cual induce al desgaste de los mismos.
	Deformación del resorte		- La compresión del eje es incorrecta entre los límites operacionales permitidos
Método	Errores en el arranque y paradas		- Por ningún motivo el sello debe trabajar en seco porque esto induce a un desgaste abrasivo y por fricción.
	Selección inadecuada	Especificaciones inadecuadas	- Debe revisarse el manual del fabricante y las condiciones de operación para analizar cuáles son las especificaciones adecuadas para la operación.
	Uso de aditivos incorrectos		- Se debe verificar si los aditivos y base de la grasa usados en el montaje del sello en el eje son compatibles con el material del sello.
	Frecuencias de inspección inadecuada		

La Figura 4-23 representa un análisis para la ruptura de los sellos mecánicos, por lo que se deben reanalizar los esfuerzos generados en la operación, ya que cuando el impulsor, los rodamientos u otro elemento tienen problemas, se presentan mayores desgastes en el sello

y por tanto en el eje; similarmente, cuando la bomba trabaja sin fluido o sin seba, el desgaste es reflejado en el sello debido a las altas temperaturas que se pueden presentar.

Entendido esto, deben tomarse medidas respecto a la operación de los operadores del área de producción, ya que en esto recae el uso adecuado de los equipos involucrados en el proceso, es por esto que, desde el área de mantenimiento, deben proporcionarse elementos de ayuda que permitan al operador identificar cuando este tipo de equipos puede estar trabajando en vacío. Del mismo modo, debe considerarse aumentar y/o implementar capacitaciones de actualización de conocimientos para el personal de mantenimiento con el fin de renovar y mejorar sus competencias en los componentes de mayor criticidad de los sistemas.

## **5 Propuesta de plan de mantenimiento**

### **5.1 Plan de mantenimiento**

Un plan de mantenimiento, es un modelo de gestión de activos que define las actividades que deben programarse y realizarse con el fin de mantener y mejorar la eficiencia de los equipos, realizando tareas necesarias y oportunas (Nowlan y Heap, 1978). Es por esto que una planeación efectiva y eficiente requiere de recursos, control, frecuencias y procedimientos claros que permitan al técnico desarrollar eficazmente las tareas propuestas (Moubray, 2004).

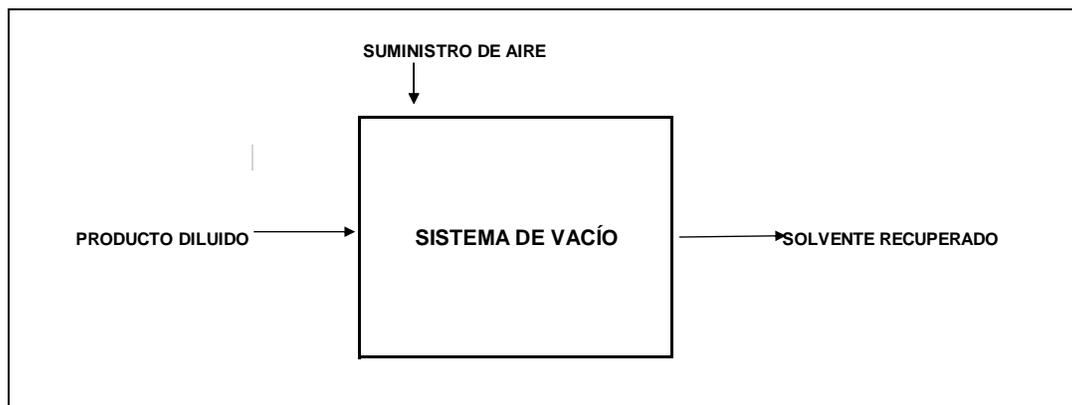
De este modo, (Duffuaa y Ben-Daya, 2009) argumenta que, la carga de trabajo en mantenimiento, se compone de dos componentes principales. El mantenimiento preventivo planificado, que compone la parte determinista de la carga de trabajo y el mantenimiento de emergencias que depende del patrón probabilístico de fallas.

De aquí que, muchas industrias realicen estudios de confiabilidad con el fin de mejorar y planificar los programas de mantenimiento en sus equipos críticos (Rausand y Høyland, 2004), por lo que puede decirse que un plan de mantenimiento es una serie de tareas programadas en función de mejorar la confiabilidad de los equipos.

## 5.2 Generalidades de la implementación

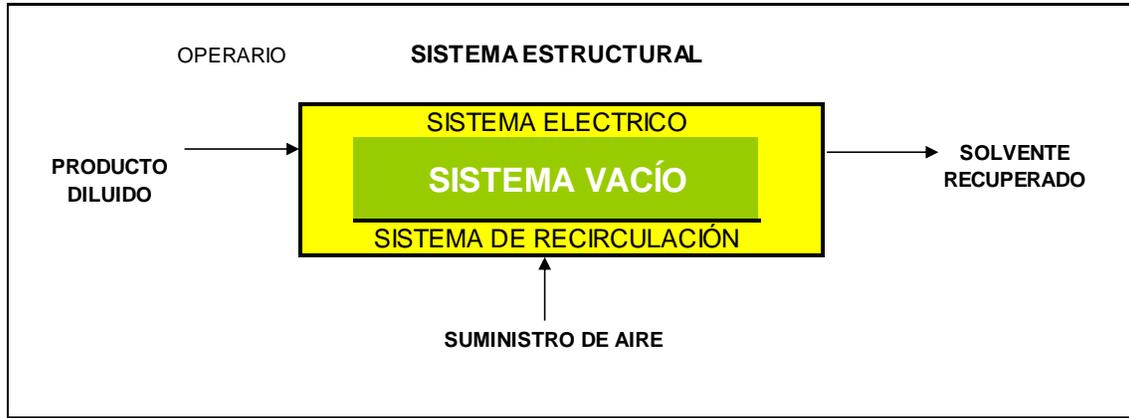
Durante la realización del estudio de confiabilidad aplicado al sistema de interés, se pudo identificar las fallas críticas presentes en el historial de fallas, además de las halladas durante el desarrollo del FMEA, motivo por el cual se elaboró un análisis más completo del subsistema de estudio.

En este mismo contexto, se desarrolló un plan de mantenimiento para el subsistema de análisis, basado en la teoría de caja negra. Dicha teoría, inicialmente estudia solo las entradas y salidas del sistema sin tener en cuenta el funcionamiento interno de la caja (Cuevas,2008). Razón por la cual, se asemeja al análisis elaborado con el histórico de fallas, en el cual solo se conocen las fallas del sistema o subsistema, pero no la causa real de la falla. En la Figura 5-1 se puede observar, el esquema de caja negra para el subsistema de vacío.



**Figura 5-1:** Análisis de caja negra para el subsistema de vacío.

Del mismo modo, se desarrolló un análisis de caja blanca, el cual analiza no solo los componentes de la entrada y salida del sistema, sino que también incluye todos los componentes que hacen parte de éste (Cuevas,2008). En este sentido, para el caso desarrollado en el presente trabajo se identificaron cada uno de los componentes de la caja (entradas, entorno y salidas) como lo indica la Figura 5-2.



**Figura 5-2:** Análisis de caja blanca para el subsistema de vacío.

Así mismo, los componentes mencionados en la Figura 5-2 son descritos en la Figura 5-3, donde se analiza la finalidad de cada uno de los componentes en la caja.

		VERBO	OBJETO	ESTÁNDAR DE FUNCIONAMIENTO
<b>MÁQUINA</b>	Sistema de vacío	Recuperar	Solvente de lavado del producto	Asegurando la buena filtración a través de la cinta
<b>Sistema de vacío</b>	Motor	Transformar	Energía eléctrica en energía mecánica	Para entregar 100 HP de potencia al eje de la bomba a una velocidad de 1185rpm
	Acople de rejilla	Transmitir	El movimiento del motor al eje de la bomba	Garantizando 100 Hp de potencia y 1185 rpm en el eje de la bomba
	Bomba de vacío	Extraer	El solvente líquido y gaseoso proveniente de lavado del producto, garantizando una correcta filtración	A una presión de 40 mbar y caudales de 1550 m <sup>3</sup> /h
	Intercambiador de calor	Intercambiar	Calor entre el líquido del anillo y el refrigerante	Mantener la temperatura interna de la bomba entre 20 y 30 grados
	Bomba recirculación	Asegurar	Líquido del anillo a los impulsores de la bomba de vacío	Bombeando caudales de mínimo 20 litros por minuto
	Motor de recirculación	Transformar	Energía eléctrica en energía mecánica	Para entregar 1,5 HP de potencia al eje de la bomba de recirculación a 1750 rpm

**Figura 5-3:** Funcionalidad de los componentes del sistema de vacío.

Finalmente, a partir de la información adquirida se construye el plan de mantenimiento para el subsistema de vacío, el cual se identificó como el subsistema con mayor cantidad de fallas y componentes más críticos, y por tanto con menor confiabilidad.

A continuación, desde la Tabla 5-1 a la Tabla 5.6 se presenta el plan de mantenimiento para el subsistema de vacío (subsistema de menor confiabilidad, pág. 70), el cual se construyó a partir de los resultados obtenidos del estudio de confiabilidad y el desarrollo de la herramienta de análisis FMEA. Método con el cual se identificó los componentes críticos del subsistema, con el fin de evaluar y proponer actividades de mejora que hagan el subsistema más confiable.

Con la implementación de este plan de mantenimiento, se pretende incrementar de forma fija una rutina de revisión y monitoreo periódico del subsistema de vacío, y a su vez del sistema general de filtración. Es importante resaltar que con el desarrollo de este plan debe considerarse llevar un registro y monitoreo de las actividades, ya que, a partir de la información que se obtenga, podrán reevaluarse y reestructurarse las frecuencias de las tareas programadas, esto con el fin de optimizar los tiempos llave en mano.









**Tabla 5-5:** Plan de mantenimiento para el subsistema de vacío parte 1.5.

<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN</b>																										
Actividades de mantenimiento	Frecuencia	Técnico	Semana																							
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Inspeccionar fugas	Diario	Mecánico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Medir temperatura	Semestral	Mecánico		X																						
Inspeccionar cierre	Bimensual	Mecánico			X								X							X						
Revisar fugas	Quincenal	Mecánico	X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X	
Cambiar mangueras	Semestral	Instrumentista				X																				
Limpiar	Semestral	Instrumentista					X																			
Cambiar	Anual	Instrumentista										X														
Inspeccionar	Diario	Mecánico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cambiar	Trimestral	Mecánico			X											X										
Revisar acoples	Quincenal	Mecánico		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X
Realignar	Anual	Mecánico													X											
Lubricar	Trimestral	Lubricación				X											X									
Inspeccionar T	Bimensual	Mecánico		X								X								X						
Inspeccionar	Anual	Mecánico													X											
Inspeccionar	Semestral	Mecánico								X																
Cambiar	Anual	Mecánico													X											
Lubricar	Mensual	Lubricación	X				X			X				X			X			X			X			X
Inspeccionar	Semestral	Mecánico								X																
Cambiar	Anual	Mecánico													X											
Revisar	Semestral	Mecánico							X																	
Medir temperatura	Mensual	Instrumentista				X			X				X				X			X			X			X



## 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

El análisis de confiabilidad desarrollado en el presente trabajo, se formuló mediante la aplicación del método de diagrama de bloques y la ecuación de confiabilidad del sistema general. Con lo anterior, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis realizado mediante el histórico de fallas por subsistemas; se proponen nuevas políticas de mantenimiento para los sistemas periféricos, los cuales han tenido gran efecto sobre las causas principales de las fallas ocurridas y la baja confiabilidad del sistema general.

Las herramientas usadas para el análisis de confiabilidad, mostraron claramente la necesidad de implementar mejoras en los planes de mantenimiento de los equipos periféricos pertenecientes al sistema general. En efecto, el análisis por subsistemas indicó que los equipos periféricos no son considerados a un mismo nivel de importancia dentro del proceso, en comparación con el sistema general. Razón por la cual, son más propensos en presentar fallas repentinas que dificultan la operación normal de la planta.

Mediante el análisis de diagrama de bloques, se seleccionó de forma lógica y coherente el subsistema crítico del proceso, el cual fue analizado con el fin de aumentar la confiabilidad del sistema general. A su vez, se identificó la importancia y necesidad de conocer en detalle el historial de falla de los equipos periféricos del sistema.

El análisis de modos y efectos de falla (FMEA) determinó la importancia de seleccionar tareas de revisión y monitoreo periódicas, que permitan minimizar la probabilidad de ocurrencia de fallas con bajos índices de NPR. Con el fin de prevenir, de que a futuro otros mecanismos más complejos puedan ser afectados. Además, la construcción de un árbol funcional antes de aplicar el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), permite determinar

de forma más simple todos los componentes del sistema y a su vez asociar los modos potenciales de falla.

El estudio de confiabilidad desarrollado en el caso de estudio, muestra la importancia de implementar mayores controles sobre el registro de la información en las órdenes de trabajo. Puesto que, los resultados obtenidos son pieza clave para desarrollar mejoras en los planes de mantenimiento, los cuales se ajusten a las condiciones de operación de los equipos. Es por esto que, durante el estudio y construcción de los diferentes métodos de análisis, se identificó la necesidad de mejorar los registros existentes de las operaciones del área de mantenimiento; ya que, a partir de ellos, pueden implementarse nuevas metodologías de mejora en la gestión de activos, que sin duda servirán como complemento a las diferentes líneas de proceso de la planta.

El análisis de criticidad es una metodología que permite jerarquizar sistemas y equipos en función de su impacto global, motivo por el cual durante su desarrollo debe tenerse en cuenta factores como el histórico de fallas de los activos y los modos potenciales de falla desarrollados en la metodología FMEA. Con esto, se realiza una identificación de las tareas de mantenimiento que deben implementarse en función de prevenir de forma repetitiva las fallas inesperadas.

El trabajo desarrollado en la presente tesis se basa en el estudio de múltiples técnicas de detección y análisis de fallas, las cuales fueron de gran ayuda para determinar la confiabilidad del sistema general a partir del análisis e histórico de fallas de los equipos periféricos.

El plan de mantenimiento presentado está enfocado en las fallas críticas del subsistema de análisis, el cual fue elaborado con el objetivo de mejorar la confiabilidad del sistema general. A partir de esto, se recomienda realizar un estudio similar que desarrolle nuevos planes de mantenimiento para cada uno de los subsistemas pertenecientes al sistema de lavado.

## 6.2 Recomendaciones

Durante el desarrollo del presente trabajo, se identificó que los reportes de fallas y los tiempos en las cuales se presentan, no son reportados correctamente. Esto genera, que existan fallas que no puedan ser determinadas, y por tanto no se pueda realizar un análisis correcto de los equipos. A su vez, los reportes de falla son generados por el personal de producción quienes en su mayoría no cuentan con la capacitación requerida para elaborar los reportes de forma correcta, y el área de mantenimiento no lleva registro de los tiempos entre reparaciones, lo que sin duda hace más difícil obtener información adecuada para la construcción, elaboración y análisis de este tipo de técnicas de mejora.

Por tanto, se recomienda diseñar formatos en que los técnicos de mantenimiento puedan reportar los tiempos exactos de las reparaciones e intervenciones en los equipos (tiempos llave en mano, tiempos entre reparaciones), y de esta forma empezar a crear un nuevo historial de fallas y reparaciones que puedan ser usados para futuros estudios y nuevas técnicas de mejora.

Es necesario capacitar al personal de producción para elaborar de forma correcta el reporte de los paros en los equipos de operación. Así, se podrá identificar si la causa que genera el paro es debido a condiciones de producción o mantenimiento. De esta forma se tendrá mayor control de cada una de las áreas.

Se sugiere como trabajo futuro, realizar un análisis de confiabilidad aplicado a los subsistemas de alimentación y transporte, ya que en el estudio realizado en nivel de importancia éstos presentaron confiabilidad baja. Por tanto, es necesario analizarlos para eliminar las fallas potenciales presentes.

**A. Anexo: Análisis de modos y efectos de falla del subsistema de vacío.**

**Tabla de Severidad**

<b>Efecto</b>	<b>Rango</b>	<b>Criterios: Severidad del Efecto en el Proceso (Efecto en la Manufactura/ Ensamble)</b>
Falla en el Cumplimiento con Requerimientos de Seguridad y/o Regulatorios	10	Puede poner en peligro al operador (equipo o ensamble) sin advertencia
	9	Puede poner en peligro al operador (equipo o ensamble) con advertencia
Interrupción Mayor	8	Puede ser que el 100% del producto se deseche. Paro de línea Pérdida o paro de envíos
Interrupción Significativa	7	Puede ser que una proporción de la corrida de producción se deseche. Desviación del proceso primario incluyendo un decremento en la velocidad de la línea o adición de mano de obra
Interrupción Moderada	6	Puede ser que el 100% de la corrida de producción tenga que volver a trabajarse fuera de la línea y ser aceptada
	5	Puede ser que una proporción de la corrida de producción tenga que volver a trabajarse fuera de la línea y ser aceptada
Interrupción Moderada	4	Puede ser que el 100% de la corrida de producción tenga que volver a trabajarse en la estación, antes de ser procesada
	3	Puede ser que una proporción de la corrida de producción tenga que volver a trabajarse en la estación, antes de ser procesada
Interrupción Menor	2	Leve o ligera inconveniencia al proceso, operación u operador
Sin Efecto	1	Sin efecto discernible

**Tabla 6-1:** Severidad propuesta por el manual de referencia Análisis de modos y efectos de falla (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008).

Tabla de Ocurrencia

Probabilidad de Falla	Criterios: Ocurrencia de las Causas – FMEA's (Incidentes por ítems/vehículos)	Rango
Muy Alta	> 100 por mil > 1 en 10	10
Alta	50 por mil 1 en 20	9
	20 por mil 1 en 50	8
	10 por mil 1 en 100	7
Moderada	2 por mil 1 en 500	6
	.5 por mil Moderada 1 en 2,000	5
	.1 por mil 1 en 10,000	4
Baja	.1 por mil 1 en 100,000	3
	< .001 por mil 1 en 1,000,000	2
Muy Baja	La falla es eliminada a través de controles preventivos	1

**Tabla 6-2:** Ocurrencia propuesta por el manual de referencia Análisis de modos y efectos de falla (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008).

**Tabla de Detección**

<b>Oportunidad para Detección</b>	<b>Criterios: Probabilidad de Detección por Controles del Proceso</b>	<b>Rango</b>	<b>Probabilidad de Detección</b>
Oportunidad de No Detección	Sin control de proceso actual; no puede detectarse o no es analizado.	10	Casi Imposible
Sin probabilidad de detección en ninguna etapa	(Causa) del Modo de la Falla y/o Error no es fácilmente detectado (ej., auditorias aleatorias).	9	Muy Remota
Detección del Problema Posterior al Procesamiento	Detección del Modo de la Falla posterior al procesamiento por el operador a través de medios visuales/táctiles/audibles.	8	Remota
Detección del Problema en la Fuente	Detección del Modo de la Falla en la estación por el operador a través de medios visuales/ táctiles/ audibles o posterior al procesamiento (pasa/no pasa, chequeo manual, etc.).	7	Muy Baja
Detección del Problema Posterior al Procesamiento	Detección del Modo de la Falla posterior al procesamiento por el operador, con el uso de medidores de variables o, en la estación por el operador, con el uso de medición de atributos (pasa/no pasa, chequeo manual del torque/Llave con clic, etc.).	6	Baja
Detección del Problema en la Fuente	Detección (de las Causas) del Modo de la Falla o Error en la estación por el operador, a través del uso de medidores de variables o, por controles automatizados en la estación, que detecten la parte discrepante y notifiquen al operador (luz, timbre). El chequeo se ejecuta en los ajustes y en la verificación de la primera pieza (para causas de ajuste solamente).	5	Moderada

Detección del Problema Posterior al Procesamiento	Detección del Modo de la Falla posterior al procesamiento por controles automatizados que detectan la parte discrepante y aseguran la parte para prevenir algún procesamiento posterior.	4	Altamente Moderada
Detección del Problema en la Fuente	Detección del Modo de la Falla en la estación por controles automatizados que detectan la parte discrepante y aseguren automáticamente la parte en la estación para prevenir algún procesamiento posterior.	3	Alta
Detección del Error y/o Prevención del Problema	Detección (de las Causas) del Error en la estación por controles automatizados que detectan el error y previenen que la parte discrepante sea hecha.	2	Muy Alta
Detección no aplica; Prevención de Errores	Prevención (de las Causas) del Error como resultado del diseño de un dispositivo, diseño de la máquina o diseño de la parte. Partes discrepantes no pueden hacerse porque el ítem/ artículo se ha hecho a prueba de errores por el diseño del producto/proceso.	1	Casi Cierta

**Tabla 6-3:** Detección propuesta por el manual de referencia Análisis de modos y efectos de falla (Chrysler LLC, Ford Motor Company, 2008).

### Análisis de modos y efectos de falla FMEA

# Falla	Función	Modo potencial de falla	Causas potenciales de la falla	Efectos potenciales de la falla
1.1	Motor eléctrico bomba de vacío	Rodamientos desgastados	Falta o exceso de lubricación	"Se incrementa el consumo de corriente y ruido en el motor, si no se toma una acción a corto plazo el rotor del motor puede hacer contacto con el estator generando un corto circuito y posterior parada del equipo. Si los rodamientos trabajan mucho tiempo en esta condición se puede generar desgaste en el eje del rotor y las tapas del motor lo que haría que la reparación sea más costosa y tarde más tiempo."
1.2			Exceso de horas de trabajo (vida útil)	
1.3			Rodamiento mal seleccionado	
1.4			Error de montaje	
1.5			Error de alineación	
1.6			Armónicos de corriente excesivos en el sistema eléctrico	
1.7			Vibración	
1.8		Eje roto	Vibración excesiva	Se interrumpe el giro del motor, lo que dejaría fuera de servicio el sistema de forma inmediata. Entraría en contacto el rotor y estator produciendo un corto circuito que quema el bobinado del motor. En este caso se requiere rebobinar o cambiar el motor
1.9			Falta de lubricación	
1.10			Error de alineación	
1.11			Falla en rodamientos	
1.12			Fatiga	
1.13			Desgaste	
1.14		Motor en corto circuito	Falla de rodamientos	Se interrumpe el servicio del motor y dejaría de transmitir movimiento de forma instantánea
1.15			Entrada de agua al motor	
1.16			Sobrecarga de voltaje	
1.17			Falta de ventilación	
1.18			Desgaste de bobinado	
1.19			Armónicos de corriente	
1.20			Desfase de corriente	
1.21			Bobinas flojas	
1.22			Falla en tierras	

1.23		Tapas desajustadas	Desalineación	Conlleva a vibraciones en el motor, destrucción mecánica y soltura de partes, deformaciones y desgaste en el eje y en los rodamientos, llegando a producir bloqueo del motor	
1.24			Vibración excesiva		
1.25			Error de montaje de rodamientos		
1.26	Eje desbalanceado	Eje desbalanceado	Vibración excesiva		
1.27			Error de alineación		
1.28			Rodamientos desgastados		
1.29			Desgaste en el alojamiento de los rodamientos		
1.30	Bornera sulfatada	Bornera sulfatada	Entrada de agua		Paro del motor o falla en el arranque, el motor puede requerir corriente a las fases que este bien conectadas lo que puede llevar a un desequilibrio de cargas produciendo daños en el motor
1.31			Desajuste en los conectores		
1.32			Falta de ventilación		
1.33			Humedad		
1.34	Cables mal asegurados en bornera	Cables mal asegurados en bornera	Vibración		
1.35			Error de conexión		
1.36	Desgaste en el aislante del motor	Desgaste en el aislante del motor	Errores de mantenimiento o montaje	Cortocircuito entre fases que puede llevar a paros del motor, llevando a un paro del proceso de generación de vacío	
1.37			Sobrecarga externa		
1.38			Falta de ventilación		
1.39			Inercia de arranque considerable		
1.40			Envejecimiento		
2.1	Acople de rejilla	Acople reventado	Vibración	No permite la transmisión de potencia a la bomba de vacío, por tanto, no se puede generar vacío	
2.2			Desgaste		
2.3		Acople mal ajustado	Acople mal ajustado	Error de montaje	Se interrumpe la transmisión de potencia del motor, se generan vibraciones y desbalance
2.4				Mala selección	

3.1	Bomba de vacío	Vacío insuficiente	Motor defectuoso	Vacío insuficiente en el equipo, pérdidas de filtración en la cinta
3.2			Alta temperatura en el líquido del anillo	
3.3			Alto o Bajo flujo de líquido	
3.4			Sello mecánico roto	
3.5			Tuberías de aspiración rotas	
3.6			Contra presión en la tubería	
3.7	Rodamientos desgastados	Rodamientos desgastados	Por falta o exceso de lubricación	La bomba vibra más de lo normal, puede aumentarse el consumo de potencia exigiendo al motor eléctrico, hasta llevar a cabo la activación de las protecciones del motor parando el proceso
3.8			Por exceso de horas de trabajo	
3.9			Rodamiento mal seleccionado	
3.10			Alta temperatura	
3.11			Error de alineación	
3.12			Vibración	
3.13			Mal instalado	
3.14	Eje roto	Eje roto	Vibración excesiva	Paro inmediato del equipo, posibles daños internos
3.15			Falta de lubricación	
3.16			Fatiga	
3.17			Error de alineación	
3.18	Rotor desbalanceado	Rotor desbalanceado	Vibración excesiva	Paro inmediato del equipo, posibles daños internos
3.19			Error de alineación	
3.20			Montaje inadecuado	

3.21		Rotor desgastado	Exceso de horas de trabajo	Bajo rendimiento del equipo, perdidas de aspiración, aumento del gasto energético
3.22	Falta de lubricación			
3.23	Error de montaje de rodamientos			
3.24	Refrigeración deficiente			
3.25	Erosión por partículas contaminantes			
3.26		Sellos mecánicos rotos	Desalineación	Fugas apreciables de alcohol, conlleva perdidas de producto en la instalación
3.27	Vibración			
3.28	Exceso de horas de trabajo			
3.29	Desajuste del resorte			
3.30	Falta de refrigeración			
3.31	Error de instalación			
3.32	Temperaturas excesivas			
3.33		Carcasa fisurada	Vibración	Paro inmediato del equipo, fuga de líquido
3.34	Desalienación			
3.35	Golpes			
3.36	Desgaste de la carcasa			
4.1	Intercambiador de calor de placas	Paredes transversales de los Conductos de refrigeración obstruidos	Filtro obstruido	Retención de partículas o suciedad en suspensión que provengan de la aspiración, ya que se crea una pérdida de carga que, si es excesiva, puede perjudicar las funciones de la bomba.
4.2		Intercambiador de placas sucio	Vida útil	Pérdida de transferencia de calor, el líquido excede la temperatura requerida para entrar en la bomba de vacío lo que conlleva a una disminución de generación de vacío
4.3	Falta de filtro			
4.4	Placas obstruidas			
4.5	Líquido de refrigeración sucio			

4.6		Empaques de intercambiador rotos	Error de montaje o ensamble	Pérdida de líquido refrigerante lo que lleva a necesitar más producto del necesario
4.7	Selección de material inadecuado			
4.8	Cristalizados			
4.9		Sensor de temperatura descalibrado	Vida útil	No se puede verificar la temperatura de salida del fluido caliente, lo que conlleva a tener pérdidas en la generación de vacío
4.10	Falta de mantenimiento			
4.11		Tuberías de enfriamiento obstruidas o rotas	Filtro roto	No llega cantidad de fluido suficiente para poder realizar el proceso de transferencia de calor, por lo tanto, no se obtiene la temperatura necesaria para entrar en la bomba de vacío perdiendo generación de vacío
4.12	Golpe en tuberías			
4.13	Corrosión			
5.1	Motor eléctrico bomba de recirculación	Rodamientos de motor desgastados	Falta o exceso de lubricación	"Se incrementa el consumo de corriente y ruido en el motor, si no se toma una acción a corto plazo el rotor del motor puede hacer contacto con el estator generando un corto circuito y posterior parada del equipo. Si los rodamientos trabajan mucho tiempo en esta condición se puede generar desgaste en el eje del rotor y las tapas del motor lo que haría que la reparación sea más costosa y tarde más tiempo."
5.2			Exceso de horas de trabajo (vida útil)	
5.3			Rodamiento mal seleccionado	
5.4			Error de montaje	
5.5			Error de alineación	
5.6			Armónicos de corriente excesivos en el sistema eléctrico	
5.7			Vibración	
5.8		Eje roto	Vibración excesiva	Se interrumpe el giro del motor, lo que dejaría fuera de servicio el sistema de forma inmediata. Entraría en contacto el rotor y estator produciendo un corto circuito que quema el bobinado del motor. En este caso se requiere rebobinar o cambiar el motor
5.9	Falta de lubricación			
5.10	Error de alineación			
5.11	Falla en rodamientos			
5.12	Fatiga			
5.13	Desgaste			

5.14		Motor en corto circuito	Falla de rodamientos	Se interrumpe el servicio del motor y dejaría de transmitir movimiento de forma instantánea	
5.15			Entrada de agua al motor		
5.16			Sobrecarga de voltaje		
5.17			Falta de ventilación		
5.18			Desgaste de bobinado		
5.19			Armónicos de corriente		
5.20			Desfase de corriente		
5.21			Bobinas flojas		
5.22			Falla de aislamiento		
5.23			Tapas desajustadas		Desalineación
5.24		Vibración excesiva			
5.25		Error de montaje de rodamientos			
5.26		Eje desbalanceado	Vibración excesiva		
5.27			Error de alineación		
5.28			Rodamientos desgastados		
5.29			Desgaste en el alojamiento de los rodamientos		
5.30		Bornera sulfatada	Entrada de agua	Paro del motor o falla en el arranque, el motor puede requerir corriente a las fases que este bien conectadas lo que puede llevar a un desequilibrio de cargas produciendo daños en el motor	
5.31			Desajuste en los conectores		
5.32			Falta de ventilación		
5.33			Humedad		
5.34		Cables mal asegurados en bornera	Vibración		
5.35			Error de conexión		

5.36		Desgaste de aislante en el motor	Errores de mantenimiento o montaje	Cortocircuito entre fases que puede llevar a paros del motor, llevando a un paro del proceso de generación de vacío
5.37	Sobrecarga externa			
5.38	Falta de ventilación			
5.39	Inercia de arranque considerable			
5.40	Envejecimiento			
6.1	Bomba centrífuga de recirculación	Rodamientos desgastados	Vibraciones	La bomba vibra más de lo normal, puede aumentarse el consumo de potencia exigiendo al motor eléctrico, hasta llevar a cabo la activación de las protecciones del motor parando el proceso
6.2			Desalineación del eje	
6.3			Vida útil	
6.4			Falta o exceso de lubricación	
6.5			Mal seleccionado	
6.6			Instalación inadecuada	
6.7		Eje roto	Fallas en diseño	Paro inmediato del equipo, posibles daños en el interior del equipo
6.8			Fatiga	
6.9			Vibraciones	
6.10			Desalineación	
6.11			Desbalanceo	
6.12		Desajuste en Acople	Desalineación	Se interrumpe la transmisión de potencia del motor, se generan vibraciones y desbalance
6.13			Vibraciones	
6.14			Fallas en rodamiento lado acople	
6.15		Rotura en acople	Error de montaje	No permite la transmisión de potencia a la bomba, por tanto, no se puede generar presión para suministrar fluido al intercambiador de calor
6.16			Mala selección	
6.17		Empaques	Cristalizados	Fugas apreciables del fluido
6.18			Ajuste inadecuado	

6.19		Desgaste impeler	Vibraciones	Bajo rendimiento del equipo. Perdidas de presión. Aumento energético del motor eléctrico
6.20	Desgaste erosivo			
6.21	Holgura con el eje			
6.22		Rotura Impeler	Vida útil	Falla el equipo de bombeo, no se puede suministrar al intercambiador de calor, por tanto, no llega el fluido necesario a los anillos líquidos del sistema de generación de vacío y se para el proceso
6.23	Cavitación			
6.24	Error de montaje			
6.25	Vibraciones			
6.26		Desgaste Anillos de desgaste	Erosión	Se pierde la protección interna de la carcasa permitiendo la salida del fluido y para del proceso
6.27	Vibraciones			
6.28	Cavitación			
6.29		Desajuste de estoperas	Error de montaje	Perdida del fluido
6.30			Vibraciones	
6.31		Sellos mecánicos rotos	Desalineación	Fugas apreciables de alcohol, conlleva perdidas de producto en la instalación
6.32			Vibración	
6.33			Exceso de horas de trabajo	
6.34			Desajuste del resorte	
6.35			Falta de refrigeración	
6.36			Error de instalación	
6.37			Temperaturas excesivas	
6.38		Carcasa fisurada	Vibración	Paro inmediato del equipo, fuga de líquido
6.39			Desalienación	
6.40			Golpes	
6.41			Desgaste de la carcasa	

## Bibliografía

Afey, I. H. (2010). Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study. *Engineering*, 2(11), 863–873.

Aken, D. Van. (2008). *Reliability Based Maintenance*.

Ali Ebrahimi. (2010). *Effect analysis of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS ) Parameters in design and operation of Dynamic Positioning (DP) systems in floating offshore structures*.

Bourouni, K. (2013). Availability assessment of a reverse osmosis plant: Comparison between Reliability Block Diagram and Fault Tree Analysis Methods.

Catalogo\_pompetravaini. (n.d.).

Chrysler LLC, Ford Motor Company, G. M. C. (2008). Analisis de modos y efectos de fallas potenciales, 4 ed, 1–151.

Deshpande, V. S., & Modak, J. P. (2001). Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 77(1), 31–43.

Dhillon, B. S. (2005). *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*. (C. Press, Ed.), Library. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. (C. Press,

Ed.). Taylor & Francis Group.

Duffuaa, S. O., & Ben-Daya, M. (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering. Handbook of Maintenance Management and Engineering.*

Fogel, G., & Petersen, D. (1996). Reliability-Based Maintenance as a Breakthrough Strategy in Maintenance Improvement, 1–10.

Guevara Carazas, F. J., & Souza, G. F. M. (2008). RCM application for availability improvement of gas turbines used in combined cycle power stations. *IEEE Latin America Transactions*, 6(5), 401–407.

ICONTEC. GUÍA TÉCNICA COLOMBIANA GTC 62 (1999).

Mora Gutiérrez, L. A. (2009). *Mantenimiento. Planeación, Ejecución y control.*

Moubray, J. (2004). *RCM-ii\_Moubray.pdf.*

Navarrete Muela, S. (2014). Universidad de Granada CONFIABILIDAD : FIABILIDAD Y MANTENIBILIDAD Análisis Paramétrico y no Paramétrico en R.

Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *RELIABILITY-CENTERED MAINTENANC.*

Oreda, A. I. S. O., Rcm-fmea, R. C. O. N., & Troffé, I. M. (n.d.). ANÁLISIS ISO 14224 /OREDA. RELACIÓN CON RCM-FMEA . Ing. Mario Troffé, 1–9.

Pacheco, C. B. (2002). *Síntesis de carboximetilcelulosa ( CMC ) a partir de pastas de plantas anuales.* Retrieved from

Patiño, Carmen Elena y Souza, G. F. M. de. (2006). Análisis de confiabilidad para herramientas de corte aplicado al proceso de taladrado. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (36), 56–69.

- Pulido, Humberto Gutiérrez; Salazar, R. de la V. (2009). *CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD Y SEIS SIGMA* (Segunda ed). Mexico, D.F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Rausand, M. (1998). Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 60, 121–132.
- Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System reliability theory: models, statistical methods, and applications* (Vol. 396).
- Tejeda, A. S. (2011). Mejoras de Lean Manufacturing en los sistemas productivos. *Ciencia Y Sociedad*, XXXVI, 276–310.