

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA CAMBIO DE COMPONENTES  
CONTROLADORES DE FLUJO, EN UNA PLANTA DE PROCESOS QUÍMICOS.**

Memoria para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

ALUMNO : Randall López Albornoz

PROFESOR GUÍA : Orlando Durán Acevedo

Enero 2019

## **RESUMEN**

Este trabajo tiene por objetivo analizar técnica y económicamente la factibilidad de cambio del componente “válvula de diafragma” usadas en los intercambiadores de calor de la Unidad Térmica y en filtros del tipo prensa (*overflow* y *underfow*) de la 2º etapa de purificación de una planta química de tratamiento de litio en la cual se basa el estudio.

El componente y áreas específicas a intervenir fueron identificados mediante el principio de Pareto y sus comportamientos modelados mediante análisis de fiabilidad. El estudio del proceso productivo y su funcionamiento determinó las variables críticas presentes en el sistema que afectan a los componentes de éste. Las variables identificadas fueron principalmente: temperatura, corrosión y la abrasión producida por la pulpa procesada (sales de diferentes composiciones químicas). En función de las variables presentes se propuso un componente adecuado para el sistema “válvulas de bola”. Se realizaron pruebas por un año en un intercambiador de calor de la Unidad Térmica y en un filtro prensa de la etapa de purificación de la planta química.

Los resultados obtenidos del análisis de reemplazo realizado entregan un tiempo medio entre fallas mayor en válvulas de bola respecto a las válvulas diafragma. Además, las probabilidades de fallas resultantes indican que según aumente el tiempo operativo, estas son mayores en las válvulas diafragma en comparación a las válvulas de bola a lo largo del tiempo analizado. Se concluye entonces que el cambio de componente es adecuado desde el punto de vista técnico.

Respecto a la evaluación económica, para el periodo prueba indica un ahorro total de USD \$167.837 al cambiar el componente desde válvulas de diafragma a válvula de bola. Al realizar el análisis a todos los intercambiadores de calor de la unidad térmica y todos los filtros de prensa de la Segunda Etapa de Purificación en un horizonte de 5 años el ahorro total es de USD \$293.056. Por lo tanto, que económicamente el cambio es factible.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>1</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>3</b>
<b>INDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
1.1. Objetivo General .....	8
1.2. Objetivos específicos .....	8
1.3. Metodología .....	9
<b>2. PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBONATO DE COBRE</b> .....	<b>11</b>
2.1. Planta de procesamiento químico de litio .....	12
2.2. Filtros planta química .....	13
2.3. Intercambiadores de calor .....	14
2.4. Generalidades de las válvulas .....	15
<b>3. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO</b> .....	<b>19</b>
3.1. Estrategias corporativas de mantenimiento .....	19
3.2. Análisis de fiabilidad de equipos .....	33
3.3. Teoría de la fiabilidad.....	37
<b>4. EVALUACIÓN ECONÓMICA</b> .....	<b>43</b>
4.1. Valor actual de costos.....	43
4.2. Costo del mantenimiento .....	43
<b>5. DESARROLLO</b> .....	<b>45</b>
5.1. Evaluación zonas de intervención .....	45
5.2. Características de las válvulas en evaluación .....	48
5.3. Factores incidentes en los fallos .....	49
5.4. Modos de falla válvulas diafragma .....	51
5.5. Propuesta y contraste válvulas .....	52

5.6.	Seguimiento de componente propuesto .....	54
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS FIABILIDAD .....</b>	<b>55</b>
6.1.	Distribuciones de los datos .....	55
6.2.	Fiabilidad Unidad térmica .....	60
6.3.	Fiabilidad Segunda etapa de purificación .....	61
6.4.	Contraste fiabilidad .....	63
<b>7.</b>	<b>CONTRASTE INDICADORES DE CONFIABILIDAD .....</b>	<b>65</b>
7.1.	Tiempo medio entre fallos.....	65
7.2.	Tiempo medio de reparación .....	66
7.3.	Tiempo medio de falla.....	66
7.4.	Disponibilidad del sistema .....	67
7.5.	Evaluación económica .....	68
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>71</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	<b>Pruebas estadísticas .....</b>	<b>1</b>
	Prueba de bondad de ajuste de Kolmorov-Smirnov .....	1
<b>2.</b>	<b>Resultados análisis estadísticos .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>Anexo evaluación económica.....</b>	<b>10</b>
	Evaluación económica horizonte de evaluación de un año para la Unidad Térmica .....	10
	Evaluación económica horizonte de evaluación de un año para la Segunda Etapa de Purificación.....	11
	Evaluación económica horizonte de evaluación de cinco años para la Unidad Térmica ...	12
	Evaluación económica horizonte de evaluación de cinco años para la Segunda Etapa de Purificación.....	13

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Parámetros considerados por mantenimiento basado en la fiabilidad. Fuente: (Andrea & Sierra, 2017) .....	30
Tabla 2. Símbolos utilizados en la confección de los árboles de falla. Fuente (Piqué & Cejalvo, 1992).....	33
Tabla 3. Resumen de principales funciones y parámetros de mantenimiento distribución Normal. Fuente: (Andrea & Sierra, 2017).....	40
Tabla 4. Resumen de principales funciones y parámetros de mantenimiento distribución exponencial. Fuente (Andrea & Sierra, 2017) .....	40
Tabla 5. Resumen de principales funciones y parámetros de mantenimiento distribución Weibull. Fuente: (Andrea & Sierra, 2017) .....	41
Tabla 6. Variables presentes en el proceso productivo de la planta química de litio.	52
Tabla 7. Comparación componentes válvulas frente a agentes externos. Elaboración propia. ....	53
Tabla 8. Válvulas Prueba FP2 MM 12 septiembre 2017. ....	54
Tabla 9. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación. Elaboración propia. ....	56
Tabla 10. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación (componentes válvula diafragma). Elaboración propia. ....	57
Tabla 11. Parámetros de escala y forma de los test de distribuciones Unidad Térmica. ....	57
Tabla 12. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación como sistema. Elaboración propia. ....	58
Tabla 13. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación por tipo de falla. Elaboración propia. ....	59
Tabla 14. Parámetros de escala y forma de los test de distribuciones Segunda Etapa de Purificación.....	59
Tabla 15. Tiempo medio entre fallos áreas bajo estudio.....	65
Tabla 16. Tiempo medio de reparación áreas bajo estudio. ....	66

Tabla 17. Tiempo medio primera falla áreas bajo estudio.....	67
Tabla 18. Disponibilidad del sistema.....	68
Tabla 19. Resultados evaluación económica.....	69

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Metodología de trabajo. Elaboración propia.....	10
Figura 2: Proceso de obtención de carbonato de litio. Fuente: sitio web SQM (www.sqm.cl).....	12
Figura 3. Filtro tipo prensa. Fuente: FSI www.fis-filtración.com .....	14
Figura 4. Intercambiador de calor a Placas. Fuente: (Flowgasket, 2018) .....	14
Figura 5. Válvula de diafragma. Fuente:(Saidi, n.d.) .....	16
Figura 6: Válvula tipo bola. Fuente: (Vacoisa, 2018).....	17
Figura 7. Intervalo P-F. (Moubray, 1997). .....	28
Figura 8. Estructura genérica de un árbol de eventos. Fuente: (Bestratén Belloví, 1991) .....	31
Figura 9. Estructura genérica de un árbol de falla. Fuente: (Piqué & Cejalvo, 1992)32	
Figura 10. Curva de la bañera.....	35
Figura 11. Fallos e índices de confiabilidad. Fuente (Andrea & Sierra, 2017) .....	37
Figura 12. Análisis de Pareto de intervenciones realizadas en planta química (01-03-2016 al 01-03-2017). Elaboración propia. ....	46
Figura 13. Intervenciones por tipo de válvulas en Unidad Térmica y Segunda Etapa de Purificación.....	46
Figura 14. Segunda etapa de purificación Planta Química. Elaboración Propia. ...	47
Figura 15. Circuito funcionamiento Unidad Térmica. ....	48
Figura 16. Árbol de falla de válvulas de diafragma, unidad térmica. ....	49
Figura 17. Árbol de falla de válvulas de diafragma, segunda etapa de purificación.50	
Figura 18. Enumeración válvulas diafragma Prueba Filtro Prensa 2. ....	54
Figura 19. Gráfica probabilidad de falla válvula de diafragma en Unidad Térmica.60	
Figura 20. Gráfica probabilidad de falla válvula de diafragma en Segunda Etapa Purificación.....	61
Figura 21. Grafica de probabilidad de falla de válvulas tipo diafragma en la segunda etapa de purificación. ....	62

Figura 22: Gráfico tasa de fallos por componentes válvula de diafragma. Elaboración propia.....62

Figura 23. Gráfico tasa de fallos válvula de diafragma y válvula de bola. Elaboración propia.....63

Figura 24. Gráfico tasa de fallos válvula de diafragma y válvula bola. Elaboración propia.....64



## 1. INTRODUCCIÓN

El litio ha tomado un lugar importante a nivel país el último tiempo, esto por su valor estratégico y aumento en la proyección de su demanda para los próximos años. Chile posee las reservas de litio más importantes a nivel mundial, alrededor del 52% (Comisión Chilena del Cobre, 2017). Lo anterior posiciona al litio como una ventaja competitiva del país y para el desarrollo de su economía a futuro. Sin embargo, al igual que otras industrias extractivas, la explotación de litio es susceptible a mejoras significativas en toda su cadena de valor.

Este trabajo es un análisis riguroso de una planta de procesamiento químico de carbonato de litio. En una primera instancia se presenta la necesidad de analizar y generar soluciones a la problemática que va en aumento en la planta en cuestión, específicamente en el aumento de fallas de las diferentes válvulas que utiliza para su funcionamiento. Estas provocan que la disponibilidad física de la planta se vea afectada. Además de ser un factor relevante el elevado costo de reparación que presenta el componente.

El análisis se realiza sobre dos componentes principales presentes en el sistema. El primero de ellos, las válvulas de diafragma identificada más adelante como el componente crítico del sistema según la necesidad planteada. El segundo de ellos la válvula de tipo bola, componente con el cual se realizaron pruebas debido a sus excelentes características ante las variables presentes en la planta química, además de su costo reducido.

Para contextualizar al lector el análisis realizado se indican en los próximos capítulos, en una forma simple, el proceso de extracción de litio, el funcionamiento de la planta química bajo estudio y las características principales de los componentes mencionados.

## **1.1. Objetivo General**

Evaluar técnica y económicamente la factibilidad de cambios de tipos de válvulas utilizadas en una planta química de tratamiento de litio según unidades que presenten mayor cantidad de fallos del componente.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Determinar las unidades específicas que componen la planta química de litio que presenten problemas con las válvulas, identificando a la vez el tipo o tipos de válvulas en cuestión.
- Analizar las causas de fallo de las válvulas identificadas en el objetivo anterior considerando las variables de funcionamiento propias de las unidades que presentan la problemática.
- Proponer la sustitución adecuada a las válvulas que presenten problemas en la planta química mediante el análisis de los materiales que componen las válvulas y su resistencia a los factores de trabajo propios de la planta química.
- Evaluar económicamente la factibilidad de cambio de válvulas en la planta química.

### **1.3. Metodología**

Para el desarrollo de este trabajo se diseñó una metodología que permitiese el contraste de los resultados obtenidos del análisis del sistema operando con su diseño original y el sistema operando con una propuesta nueva, la cual nace del propio análisis. La metodología a seguir se detalla a continuación (ver Figura 1):

- Etapa 1. Identificación de la problemática a abordar: Mediante el principio de Pareto se identifica base de datos de fallos para identificar la o las zonas que se deben estudiar en mayor detalle respecto al ítem señalado en la introducción de este trabajo.
- Etapa 2. Análisis estadístico: Mediante herramientas computacionales se realizan los test estadísticos correspondientes para determinar el tipo de distribución y los indicadores de mantenimiento respectivos del sistema.
- Etapa 3. Análisis económico por costos de mantención del sistema con la metodología y componentes actuales utilizados en la operación.
- Etapa 4. Propuesta de mejora al sistema mediante análisis de árbol de fallo. Se identifican las causas de fallos de los componentes bajo estudio en las diferentes áreas en análisis y con ello se propone una alternativa que puede representar una mejora para el proceso.
- Etapa 5. Puesta en marcha y monitoreo de la propuesta realizada en la etapa anterior.
- Etapa 6. Análisis estadístico. Determinación de indicadores de confiabilidad. Análisis económico de la propuesta realizada.
- Etapa 7. Contraste de resultados: Se contrastan los resultados obtenidos del análisis del sistema operando al inicio del estudio con los resultados obtenidos de las pruebas de la propuesta generada entre en la etapa 4 de este procedimiento.

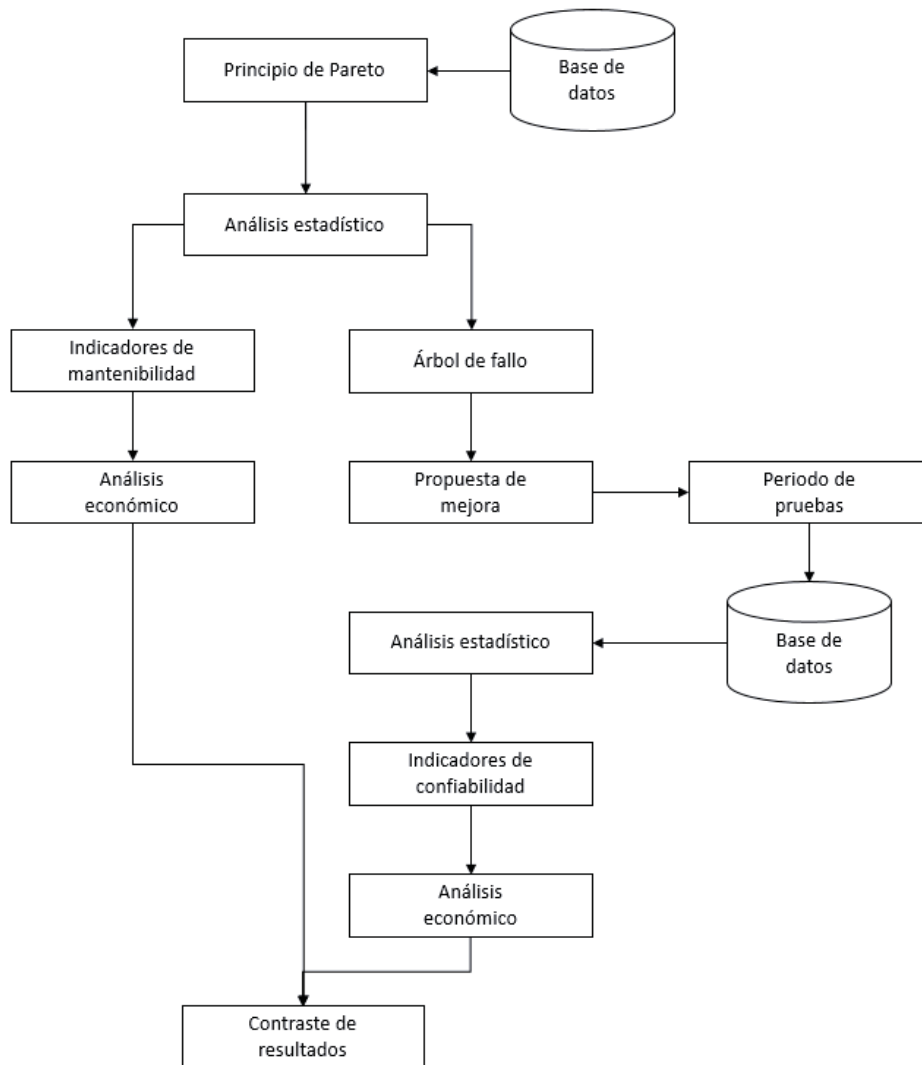


Figura 1. Metodología de trabajo. Elaboración propia.

## 2. PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBONATO DE COBRE

El proceso de obtención de carbonato de litio, en una forma genérica se puede resumir en tres etapas principales. Según explica SQM de Chile al mundo (2017) el proceso es el siguiente:

- **Obtención de salmuera:** Es proceso de extracción de la salmuera desde el macizo rocoso mediante un sistema de bombeo, el cual permite a través de un sistema de cañerías transportar dicha salmuera hacia piscinas o pozas de evaporación.
- **Concentración de soluciones:** Esta etapa es realizada mediante pozas de evaporación solar de poca de profundidad, con lo cual se logra un aumento de concentración de las salmueras. Siguiendo un modelo establecido las salmueras son traspasadas de una poza a otra logrando la obtención de distintas sales, que pueden ser o no comercializadas, al finalizar el proceso se obtiene el litio en una salmuera concentrada depositada las pozas de litio (ver Figura 2).
- **Tratamiento planta química:** Para lograr la producción de carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) con un 99,5% de pureza, las salmueras concentradas, provenientes de las pozas de litio, son purificadas y cristalizadas, luego se procede a realizar un proceso de carbonatación, una posterior precipitación y por último el secado de los cristales.

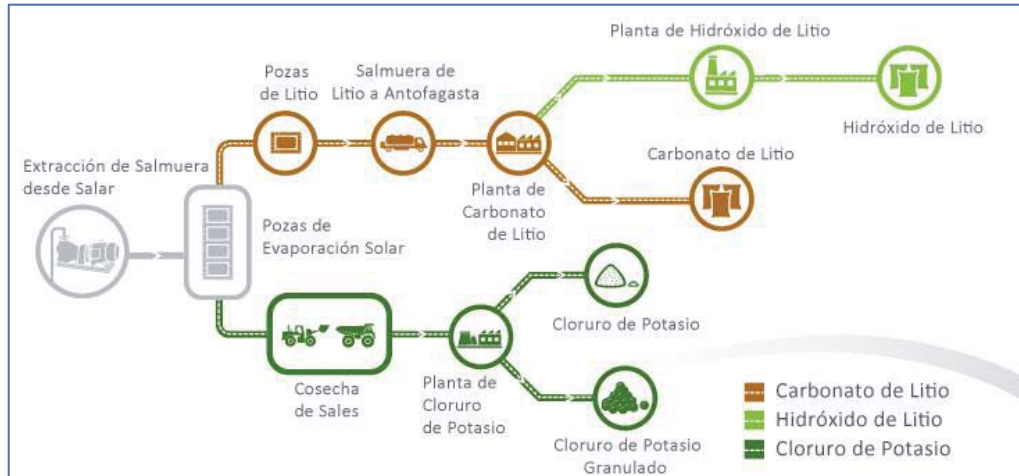


Figura 2: Proceso de obtención de carbonato de litio. Fuente: sitio web SQM ([www.sqm.cl](http://www.sqm.cl))

## 2.1. Planta de procesamiento químico de litio

Luego del proceso de concentración por evaporación de la salmuera que contiene litio, se procede a tratar químicamente. Según explica SQM de Chile al mundo (2017) se indica a continuación:

- La primera etapa del proceso de carbonatación es la eliminación del boro presente en la salmuera, mediante extracción por solvente para luego derivarla a estanques de almacenamiento para ser dirigida a la planta de Carbonato y Cloruro de Litio. Para esto, se cuenta con dos plantas de extracción por solvente, la materia prima de esta planta se denomina “salmuera concentrada” es la salmuera que se exporta desde el salar, la cual contiene un 6% de Litio. El Boro es extraído con alcohol diluido en Kerosene. El cual es recirculado en circuito cerrado. La regeneración del extractante se lleva a cabo con un agua industrial la cual posteriormente es enviada a las piscinas de salmueras. La salmuera de bajo contenido de boro se califica como “Salmuera Refinada” se almacena en 2 estanques y se distribuyen en entre la planta de Carbonato de Litio y la planta de Cloruro.
- En la segunda etapa se lleva a cabo la purificación. Esta etapa consiste en eliminar el Magnesio contenido en la salmuera. La eliminación del Magnesio se logra mediante un proceso donde se hace reaccionar el Magnesio con una

solución de Carbonato de sodio, produciendo una precipitación de Carbonato de Magnesio, de esta manera se logra extraer aproximadamente el 80% del Magnesio contenido, el otro 20% se elimina utilizando un reactivo de “Cal”, precipitando en Magnesio como Hidróxido de Magnesio de esta manera se tiene una salmuera apta para producir Carbonato de Litio.

- En la tercera etapa se obtiene los cristales de Carbonato de Litio y lo que se consigue haciendo reaccionar la salmuera con una solución de Carbonato de sodio.

## **2.2. Filtros planta química**

La planta química según sus diferentes etapas utiliza distintos tipos de filtros para lograr el éxito en su operación. Los filtros presentes en las etapas del proceso son: filtros tipo prensa, filtros tipo tambor y filtros tipo banda. Este estudio, como se explica en el Capítulo 5, se centra en los filtros de tipo prensa.

### **2.1.1. Filtros tipo prensa**

Un filtro de prensa separa de sólidos y líquidos mediante la filtración por presión. Este tipo de filtro son simples y confiable para lograr una alta compactación. Los sólidos se bombean entre cada par de bastidores del filtro y una vez llenos, mediante un tornillo se van oprimiendo unos contra otros expulsando el agua a través una tela que posee el filtro. Los filtros prensa pueden comprimir y deshidratar sólidos hasta obtener del 25% al 60% por peso de los lodos compactados (e-industria.com, 2008).

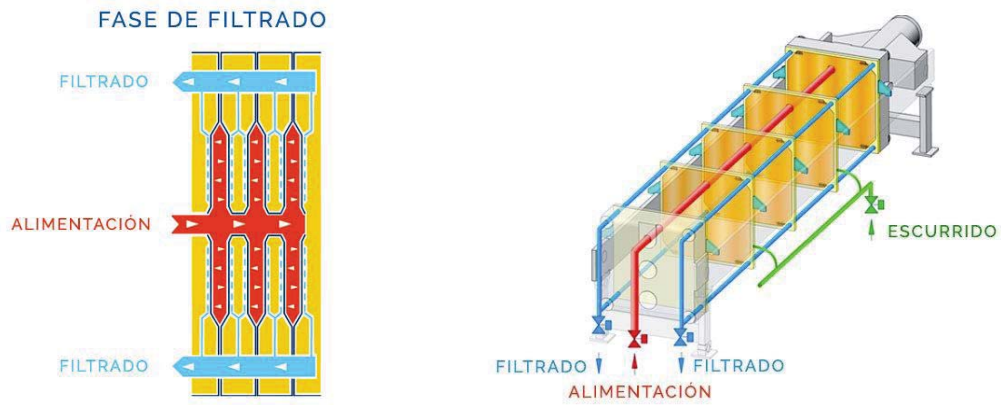


Figura 3. Filtro tipo prensa. Fuente: FSI [www.fis-filtración.com](http://www.fis-filtración.com)

### 2.3. Intercambiadores de calor

La planta química en su unidad térmica utiliza intercambiadores de calor (ITC). Los ITC son los equipos más comunes que se pueden encontrar en la mayoría de las industrias. Básicamente es un equipo en el que dos corrientes a distintas temperaturas fluyen sin mezclarse con el objeto de enfriar una de ella, calentar la otra o ambas a la vez.

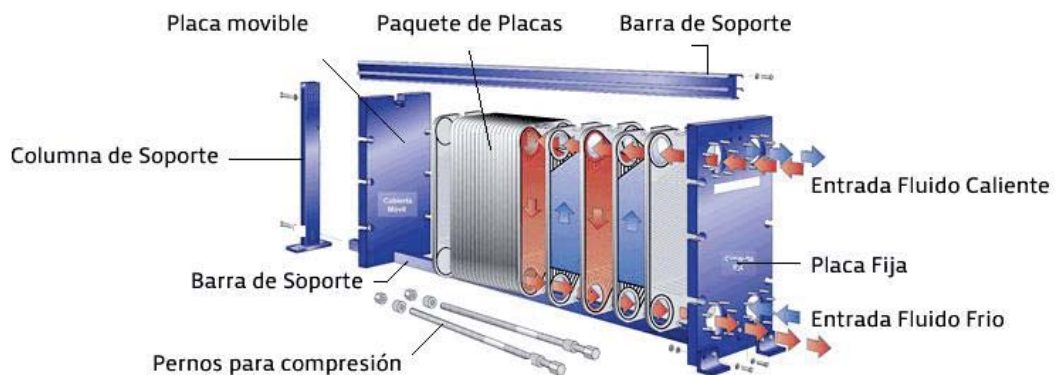


Figura 4. Intercambiador de calor a Placas. Fuente: (Flowgasket, 2018)



## **2.4. Generalidades de las válvulas**

Las válvulas corresponden a dispositivos que básicamente regulan o detienen el paso de líquidos y/o gases entre diferentes conductos mediante una pieza móvil que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más conductos. Estas poseen las siguientes funciones:

- Regular el flujo
- Regular presiones
- Protección de sobrepresiones y depresiones
- Aislar tramos de conducción
- Desviar fluidos
- Mezclar fluidos

Las funciones anteriores dependen del tamaño y del tipo de material con el que se encuentra fabricada la válvula.

### **2.4.1. Válvula diafragma**

Operan de forma simple causando presión sobre una membrana que, al ser desplazada, provoca una superficie de apoyo que obstruye el flujo. Poseen un volante de vueltas múltiples y efectúan el cierre por medio de un diafragma flexible sujeto a un compresor. Cuando el vástago de la válvula hace descender el compresor, el diafragma produce sellamiento y corta la circulación (Arroyo, 2009).

Sus aplicaciones pueden darse para fluidos corrosivos, materiales viscosos, pastas semilíquidas, lodos, alimentos, productos farmacéuticos, plantas químicas.

Ventajas:

- Bajo costo
- No tienen empaquetaduras
- No hay posibilidad de fugas por el vástago

Desventajas:

- Diafragma susceptible al desgaste
- Elevada torsión al cerrar con la tubería llena

Existen dos variaciones de esta válvula, siendo estas de paso ondulado y de paso recto.

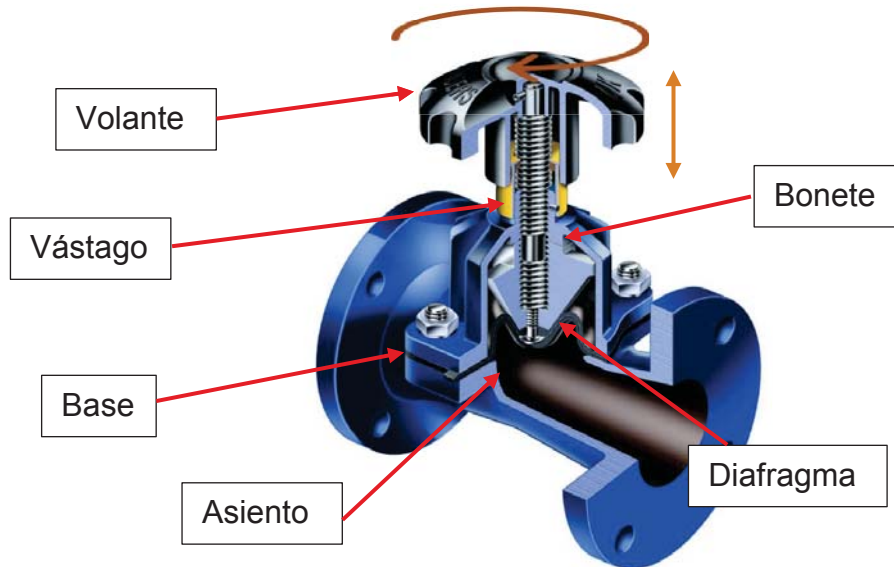


Figura 5. Válvula de diafragma. Fuente:(Saidi, n.d.).

Los materiales con los que puede ser fabricado son:

- Cuerpo: Bronce, hierro, hierro fundido, acero forjado, Monel, acero inoxidable, plásticos.
- Diafragma: Butilo, PTFE, EPDM.
- Componentes: Diversos.

#### 2.4.2. Válvula tipo bola

Las válvulas de bola son de  $\frac{1}{4}$  de vuelta, en las cuales una bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola  $90^\circ$  y cierra el conducto (Metso, 2013).

Este tipo de válvulas es aplicable para servicios generales, altas temperaturas y pastas semilíquidas.

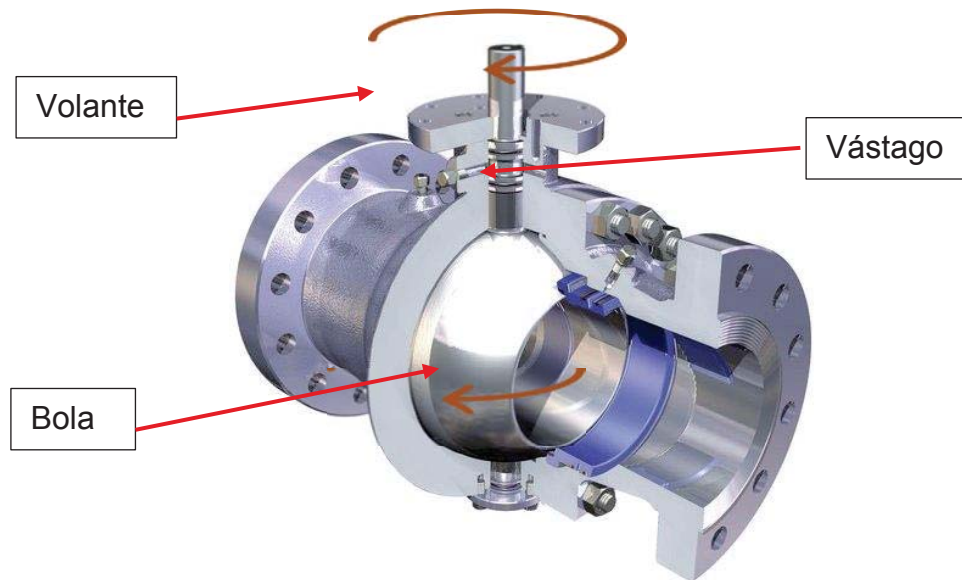


Figura 6: Válvula tipo bola. Fuente: (Vacoisa, 2018)

#### **Ventajas:**

- Bajo costo
- Alta capacidad
- Corte bidireccional
- Circulación en línea recta
- Pocas fugas
- Se limpia por sí sola
- Poco mantenimiento
- No requiere lubricación
- Tamaño compacto
- Cierre hermético con baja torsión

#### **Desventajas:**

- Características deficientes para estrangulación
- Alta torsión para accionarla

- Susceptible al desgaste de sellos o empaquetaduras
- Propensa a la cavitación

Las variantes para este tipo de válvulas pueden ser de entrada por la parte superior, cuerpo o entrada de extremo divididos (partidos), tres vías, Venturi, orificio de tamaño total, orificio de tamaño reducido (Arroyo, 2009).

Los materiales con los que puede ser fabricado son:

- Cuerpo: Hierro fundido, hierro dúctil, bronce, latón, aluminio, aceros al carbono, aceros inoxidable, titanio, tántalo, zirconio; plásticos de polipropileno y PVC.

### 3. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

En la industria extractiva de minerales es de vital importancia la productividad de las plantas y sistemas. La disponibilidad, maximización de capacidades y la minimización de costos operativos de estos procesos productivos son de vital importancia para este sector, es por ello que el control y la identificación de oportunidades de mejoras son tareas que buscan constantemente el aumento de indicadores de mantenimiento como la confiabilidad, disponibilidad y vida útil de sus plantas y equipos.

Desde el punto de vista del mantenimiento existen en la industria dos técnicas de gestión del mantenimiento que son ampliamente aceptadas para lograr cumplir los objetivos de los mismos, estos son el Mantenimiento Productivo Total y el Mantenimiento Centrado en la fiabilidad.

#### 3.1. Estrategias corporativas de mantenimiento

El TPM o mantenimiento productivo total es definido como una estrategia el cual se centra en incrementar la disponibilidad de los equipos y mejorar el diseño de la producción, logrando así una mayor eficiencia productiva (J. García, González, & Noriega, 2012). Para esto, el TPM se sustenta en el compromiso y acción de los trabajadores cuyos principios son clasificados en ocho enfoques conocidos como los ocho pilares fundamentales del mantenimiento productivo total. Según Martínez (2009) estos pilares son:

**Mejoras enfocadas:** Centrada en solventar inconvenientes desde la raíz dentro del proceso productivo con el propósito lograr una mejora en la efectividad de la instalación. Este principio, a su vez, trata de desarrollar e implementar un proceso de mejora continua con el motivo de eliminar las pérdidas generadas dentro de la fase de producción. Las técnicas recomendadas a utilizar para la eliminación de las averías y su detección antes de suceder son:

- Implementar el uso del ciclo de Deming, siendo esta una estrategia de mejora continua de la calidad en cuatro pasos los cuales son planear, hacer, verificar y actuar.
- Actividades de análisis y estudio basados en siete pasos:
  - Selección del problema sujeto a estudio
  - Crear una estructura para el proyecto
  - Identificar la situación actual y plantear objetivos
  - Diagnóstico del problema
  - Crear plan de acción
  - Implementar mejoras
  - Evaluar resultados
- Utilizar los principios básicos de la operación de los Círculos de control total de calidad:
  - Detección de los problemas
  - Selección del problema a resolver
  - Análisis de las condiciones presentadas
  - Identificación, efectos y causas
  - Plan de trabajo para cada causa seleccionada
  - Desglose de la causa de mayor influencia y descripción de posibles soluciones
  - Comprobación, análisis de las condiciones antes y después de la mejora.
  - Estandarización
  - Conclusiones

**Mantenimiento autónomo:** Hace referencia a las actividades que realizan los operarios para cuidar de forma correcta su área de trabajo, equipos, calidad y seguridad. Es por esto, que la cultura del orden y aseo presenta gran importancia y necesidad dentro de los trabajadores de una empresa, ya que son ellos quienes más conocen el trabajo y desempeño de la maquinaria.

El orden del mantenimiento autónomo se encuentra distribuido de la forma siguiente:

- Organización y orden
- Limpieza inicial
- Eliminación de fallas mecánicas
- Estandarización: Limpieza y lubricación
- Inspección general del equipo
- Inspección general del proceso
- Estandarización general
- Control autónomo total

El control autónomo total requiere de un entrenamiento necesario que permita incrementar el conocimiento del trabajador, contribuyendo a identificar los modos de fallos aptos para solventarse por personas poco cualificadas y aquellas que demanden una instrucción adicional.

Además, es necesaria la gestión de equipos por medios de normas de fiabilidad y prevención del mantenimiento, de esta forma la mantención del equipo se reduce a la identificación y control de factores críticos para aumentar la vida útil de la maquinaria y maximizan los intervalos de mantenimiento. Esto es inherente a los principios de identificación de fallos.

**Mantenimiento planeado**: Centrada en la eliminación de las averías y problemas del sistema o maquina a través de acciones de mejora, predicción y prevención, manteniendo de esta forma al equipo y proceso en condiciones óptimas.

El mantenimiento planeado se diferencia del mantenimiento preventivo en que este utiliza todo un conjunto de actividades sistemáticas y metódicas con la finalidad de construir y mejorar el proceso. Esto significa que el mantenimiento planeado apunta hacia un análisis paulatino de las causas y resultados a través del uso de un método científico de búsqueda para la situación que dio origen a las fallas.

Una de las ideas que posee el mantenimiento planeado es que el operario marque y diagnostique la avería, de tal forma que el mecánico al momento de revisar el equipo vaya directo a la falla para su eliminación (Clará, Domínguez, & Pérez, 2013).

**Control inicial:** Corresponden a un conjunto de actividades de mejora que se llevan a cabo durante la etapa de diseño y construcción de los equipos, cuyo objetivo es minimizar los costes de mantenimiento del equipo durante su vida útil a través de la reducción de las causas de averías y deterioro de estos.

Este principio utiliza las técnicas de prevención de mantenimiento, los cuales se fundamentan en la teoría de la fiabilidad, por lo cual se debe exigir una buena base de datos sobre la frecuencia de fallas y reparaciones sobre el equipo (Clará et al., 2013).

**Mantenimiento de calidad:** Tiene como objetivo aumentar la calidad del producto mediante el control de las condiciones de los componentes y equipos que presentan un impacto directo sobre la calidad de dicho producto.

El mejoramiento de la calidad corresponde a un tipo de mantenimiento preventivo el cual se encuentra orientando al cuidado de las condiciones de los equipos, cuya meta es ofrecer un producto sin defectos a partir de maquinarias con cero defectos, logrando este último a partir de la continua búsqueda de una mejora y optimización del proceso (Clará et al., 2013).

**Entrenamiento y formación:** Entregar una adecuada instrucción hacia los trabajadores sobre los procesos y equipos en los que cada uno opera, con la finalidad de desarrollar sus habilidades para el desempeño de sus labores y aplicar su conocimiento en la identificación y detección de averías, brindando alternativas de solución.

La capacitación puede ser planificada en tres áreas principales, las cuales son:

- **Área técnica:** Corresponde a una descripción general del equipo, herramientas e instalaciones. Esta área atiende de forma específica los puntos fundamentales del equipo antes del inicio, durante su funcionamiento y al término de este; así como la importancia del mantenimiento y sus beneficios.
- **Área humanística:** Esta área considera las relaciones humanas, comunicación y trabajo en equipo con la finalidad de mejorar el ambiente laboral, lo cual



permite enfocar la atención para identificar las causas de desviación y aportar con alternativas factibles de solución.

- Área de toma de decisiones: Permite que todo el personal adquiera el conocimiento de los fundamentos y elementos que se deben considerar para tomar decisiones según su nivel y actividades encomendadas, así como establecer los parámetros para saber cuándo se debe actuar.

Por lo tanto, este principio corresponde a la actividad que permite orientar al trabajador para que aplique su conocimiento y experiencia en el descubrimiento e identificación de las áreas en las que puede contribuir con alternativas de mejora (Martinez, 2009).

**TPM en áreas administrativas:** Posee como objetivo llevar la política de mejoramiento a las oficinas con el motivo de aumentar la eficiencia y eliminar las pérdidas en los procesos administrativos. Este principio es aplicable a todo tipo de departamento, los cuales no producen un valor directo como producción, pero ofrecen y facilitan la ayuda necesaria para que el proceso productivo opere de forma eficiente, con menores costes y alta calidad (Clará et al., 2013).

**Seguridad y medio ambiente:** Su principal enfoque es otorgar y mantener un ambiente laboral libre de accidentes y contaminación, lo cual permite minimizar la ocurrencia de un mal funcionamiento del equipo, así como también el número de accidentes laborales dentro de la empresa.

Los efectos generados por esta estrategia de mantenimiento se encuentran en función de su calidad de puesta en marcha. Una adecuada implementación de TPM permite obtener un cierto número de beneficios, dentro de los cuales se destaca:

- Incremento de la calidad del producto.
- Control y planificación de los gastos de manutención.
- Fácil programación del flujo de trabajo, debido a una mayor confiabilidad y de proceso más repetible.

Por otro lado, un TPM mal implementado aumenta el riesgo de cometer pérdidas en el componente, siendo estas: velocidad de proceso menor, grandes tiempos de

preparación, micro paradas, obstáculos frecuentes, altos tiempos de arranque, disminución de calidad del producto, averías frecuentes del componente o sistema, entre otros. Estas pérdidas son manifestadas a través de los tiempos muertos o paro del sistema productivo, velocidad reducida de funcionamiento operativo y malfuncionamiento de la operación (J. García et al., 2012).

### **3.1.1. Mantenimiento centrado en la fiabilidad**

Según Moubray (1997) el mantenimiento centrado en la fiabilidad o RCM puede ser definido como un proceso estratégico usado para la determinación de acciones que se deben realizar para lograr asegurar que un elemento o equipo continúa desempeñando las funciones esperadas dentro de su contexto operacional.

Para una correcta implementación del RCM se debe identificar los equipos operacionales dentro de la empresa y analizar en cuales de estos se ha de aplicar el proceso de revisión RCM. Para un correcto análisis de las maquinarias se debe considerar el nivel de riesgo que cada uno supone dentro del contexto laboral (Barreda, 2015).

Una vez seleccionados los elementos a revisar, el RCM realiza siete preguntas acerca de cada elemento o equipo seleccionado, siendo estas las siguientes:

- ¿Cuáles son las funciones?
- ¿De qué forma puede fallar?
- ¿Qué causa que falle?
- ¿Qué sucede cuando falla?
- ¿Qué ocurre si falla?
- ¿Qué se puede realizar para evitar las fallas?
- ¿Qué sucede si no se puede prevenir la falla?

Las siete preguntas de la RCM pueden clasificarse en tres enfoques diferentes, siendo el objetivo de las cuatro primeras preguntas el de establecer objetivos; definición del problema; y recoger la información básica acerca del elemento analizado. La quinta

pregunta se encuentra enfocada en las consecuencias producidas por una o más fallas, mientras que las últimas dos preguntas se encuentran centradas en las estrategias de mantenimiento (Vásquez, 2008).

Según Barreda (2015) en cada equipo se establece un contexto operacional en el que se deben constar los siguientes factores:

- Administración de la operación del equipo.
- Disponibilidad de operadores y repuestos.
- Consecuencias de la no disponibilidad del equipo.
- Objetivos de seguridad y medio ambiente.

Las funciones y el comportamiento de los equipos vienen otorgados según el contexto operacional en el que se encuentra. Una pérdida total o parcial de estas funciones afecta de cierta manera a la empresa, por lo que desde un inicio debe definirse los estándares de comportamiento y funciones de cada elemento o equipo (Moubray, 1997).

Una vez establecido el funcionamiento de cada elemento, el RCM pone gran énfasis en cuantificar los estándares de funcionamiento siempre que sea posible. Estos estándares se extienden en la calidad del producto, costo operacional, seguridad y a la producción.

Las fallas funcionales pueden ser definidas como la incapacidad de lograr la función deseada, las cuales dependen del contexto operacional, es decir, el estado de un elemento puede considerarse una falla en ciertas ocasiones y no en otras. Al momento de definir las fallas posibles sobre un equipo se debe seguir un cierto número de criterios de funcionamiento definidos dentro del contexto operacional, esto permite no exista confusión entre los operadores y el personal de mantenimiento al momento de considerar algo como una falla (Barreda, 2015).

Un modo de falla corresponde a una posible causa por la cual un equipo puede llegar a un estado de falla. Cada falla funcional suele poseer más de un modo de falla. Todos

los modos de falla asociados a una falla funcional deben ser identificados durante el análisis del RCM.

Durante la identificación de los modos de falla, es fundamental listar e identificar la causa raíz de la falla. Este listado permite dar una idea precisa de por qué ocurre la falla y por ende qué podría realizarse para manejarla de forma adecuada (Cerra & Pacheco, 2012)

Luego de definir e identificar los modos de fallas de un elemento o maquinaria, el análisis del RCM prosigue con el proceso de preguntar cómo y cuánto importa cada falla, debido a que las consecuencias de cada una de las averías dan una idea si es necesario tratar de prevenirlos.

El RCM clasifica las consecuencias de las fallas en cuatro grupos diferentes, los cuales son:

- Consecuencias de las fallas no evidentes: Este tipo de fallas no poseen un impacto directo, pero facilitan la ocurrencia de otras fallas con consecuencias más serias y posiblemente catastróficas. Es por esto, por lo que el RCM otorga una alta prioridad a este tipo de consecuencias y adopta una vía práctica y simple con relación a su mantenimiento.
- Consecuencias en la seguridad y medio ambiente: Se dice de las fallas con consecuencias sobre la seguridad si estas pueden afectar de forma física a un operador, mientras que una falla con consecuencias sobre el medio ambiente se caracteriza por infringir las normas gubernamentales relacionadas al medio ambiente. El RCM considera los efectos de cada falla antes de considerar el tema del funcionamiento, es decir, prioriza el análisis de la seguridad y el medio ambiente por sobre la problemática de la producción.
- Consecuencias operacionales: Se habla de fallas con consecuencias operacionales si afecta de forma directa la producción. Estas consecuencias al costar dinero permiten generar una idea de cuánto gastar para tratar de prevenirlas.

- Consecuencias que no son operacionales: Las fallas que se presentan en este grupo no afectan a la seguridad ni a la producción, por lo que su único gasto es la reparación.

El tratamiento y mantenimiento de una falla presente en un equipo depende del grado de consecuencias que esta falla posea, es decir, si la falla presenta consecuencias significativas en cualquiera de las cuatro categorías, es de gran importancia tratar de prevenirlas, por otro lado, si la falla no posee consecuencias significativas entonces no es necesario realizar un mantenimiento sistemático a parte de las rutinas básicas de lubricación y servicio. Por eso en este punto del proceso del RCM, es necesario preguntar si cada falla presenta consecuencias significativas dentro de la empresa (Moubray, 1997)

El RCM clasifica en tres grupos diferentes las categorías preventivas para solventar las fallas con consecuencias significativas, siendo estas:

- Reacondicionamiento cíclico: Corresponde a la revisión de los equipos o reparo de estos con una determinada frecuencia sin importar el estado en que se encuentre. La frecuencia de revisión se encuentra condicionada por la edad del equipo a la que se incrementan las opciones de falla. Este tipo de labores son rentables si existe alguna edad a la cual la probabilidad de falla en los componentes o equipos incrementa, y si realizando un mantenimiento se es capaz de devolver al elemento al estado inicial.
- Tareas de sustitución cíclica: Consisten en reemplazar un equipo de forma periódica. Este periodo es determinado a partir de la vida de los elementos. Estas tareas son factibles si los elementos poseen una edad a partir de la cual la probabilidad de falla aumenta de manera considerable. En este tipo de método de prevención de falla se consigue recuperar el estado inicial del equipo, ya que los elementos sustituidos son completamente nuevos.
- Tareas a condición: Estas tareas se basan en aquellas fallas que se van produciendo poco a poco, no de forma puntual (Figura 7). Las labores de este tipo deben satisfacer los siguientes puntos:

- Debe existir una falla potencial correctamente definida.
- Debe poseer un intervalo de tiempo entre el punto en que una falla potencial es detectable y el punto en el que se convierte en una falla funcional (P-F), de forma definida.
- El intervalo de la labor a realizar debe ser menor al intervalo P-F.
- El tiempo de descubrimiento de la falla debe ser corto, debido a que después todavía se tiene que analizar investigar cómo actúa la falla y se deba realizar la tarea de prevención. Todo esto debe ser menor que el intervalo P-F.
- 

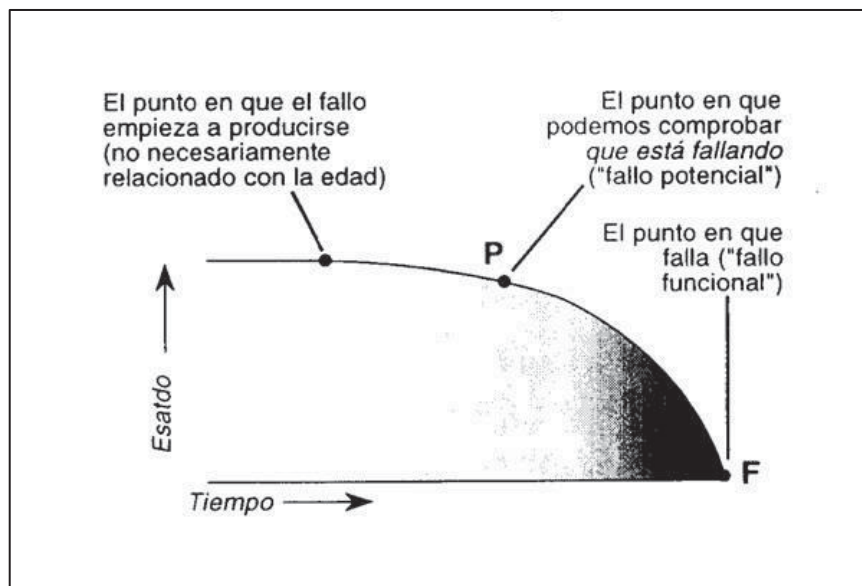


Figura 7. Intervalo P-F. (Moubray, 1997).

La detección temprana de la falla potencial antes de la ocurrencia de la falla funcional se logra si el intervalo de intervenciones del equipo es menor al intervalo P-F.

El RCM a través de principios simples es capaz de decidir que tarea sistemática es la más adecuada para cada situación, además de determinar los periodos de actuación, también se encarga de elegir al personal que deberá ejecutarla (Barreda, 2015).

Si se comprueba que no es factible utilizar ninguna tarea de este tipo, el RCM efectúa otro tipo de tareas catalogadas “a falta de” los cuales lidian con el estado de la falla, distribuyéndose en tres tipos:

- Búsqueda de falla: Aplicada a las fallas ocultas, es decir a solo elementos de protección
- Rediseño: Cambio de las características o especificaciones de los elementos
- Este incluye la adición, sustitución o reubicación dentro del rediseño
- Tareas de rutina

Según Barreda (2015) dentro de las ventajas que aporta el RCM dentro de la empresa pueden destacarse:

- Una mejor comunicación entre los operadores
- Buen provecho del conocimiento y habilidad
- Elaboración de un mejor análisis de cada componente de los equipos
- Detección temprana de fallas antes de que sucedan
- Mayor protección y seguridad del entorno laboral
- Mejores rendimientos operativos
- Mayor control de los costes de mantenimiento
- Amplia base de datos de mantenimiento
- Mayor motivación de los trabajadores
- Mejor trabajo de grupo en el análisis de problemas y toma de decisiones

### **3.1.2. Análisis modo de fallo y efectos**

El análisis de modo de fallo y efectos FMEA por sus siglas en inglés (*Failure Mode Affect Analysis*) es una técnica que ayuda a la identificación y análisis para establecer medidas ante la presencia de posibles fallos que pueden presentarse en un sistema, planta, equipo o componente.

Según Andrea & Sierra (2017) posee las siguientes características formales:

- Carácter preventivo: anticipa la forma de actuar ante los fallos que se especulan.
- Sistematización: su organización permite detectar fallos que de otro modo serían ignorados.
- Trabajo en equipo: la experiencia de todas las partes implicadas es fundamental para su puesta en marcha.

Los parámetros considerados por la FMEA para su desarrollo y su evaluación se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros considerados por mantenimiento basado en la fiabilidad. Fuente: (Andrea & Sierra, 2017)

Define		Analiza			Actúa	Ratios			
Operación u objeto	Función	Modo de fallo	Efecto	Causas	Modo de detección y/o recomendación	Índice de gravedad (G)	Índice Ocurrencia (A)	Probabilidad de detectar (D)	Número de prioridad de Riesgo (NPR) NPR=GxAxD

El número de prioridad de riesgo estimado con la FMEA es una variable que ayuda a determinar la prioridad de aquellos fallos que tengan mayor riesgo.

### 3.1.3. Árbol de eventos

El árbol de eventos es un método que permite realizar un análisis estadístico de la respuesta de un sistema ante un fallo previsto. El árbol inicia con un evento que va analizando las respuestas sucesivas de los diferentes componentes del sistema que se activarían ante la situación inicial (el fallo). A medida que se avanza en el árbol se asignan probabilidades de éxito y fracaso de la acción de las respuestas ante el fallo (Andrea & Sierra, 2017).

Generalmente el árbol de eventos comienza con el fallo como iniciador, seguido de las funciones de diferentes componentes del sistema de seguridad. Gráficamente su representación se hace con una línea de izquierda a derecha con ramificaciones en



cada componente de seguridad. La rama superior del componente representa la función que tiene éxito ante el fallo, la rama inferior representa el fracaso ante el fallo. Algunas ramas pueden ser más desarrolladas que otras según necesidad. Finalmente, el árbol recogerá las situaciones de éxito y fracaso ante el fallo de un sistema, componente, equipo, etc. (Piqué & Cejalvo, 1992)

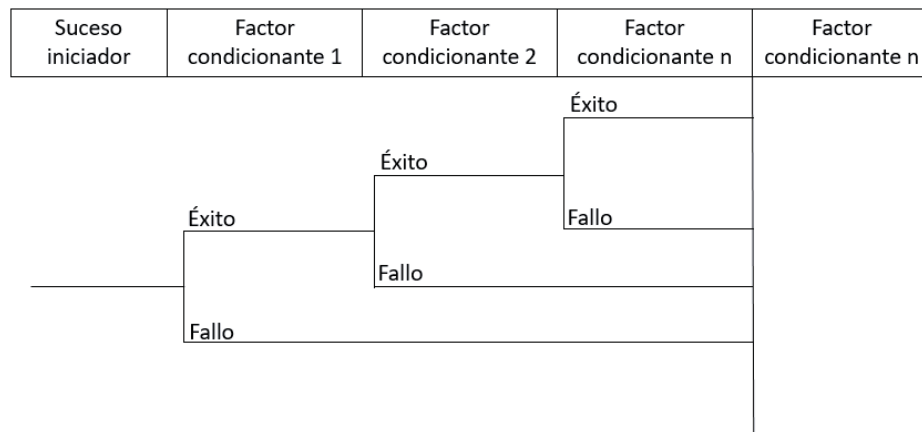


Figura 8. Estructura genérica de un árbol de eventos. Fuente: (Bestratén Belloví, 1991)

### 3.1.4. Árbol de fallo

El método de árbol de fallo, FTA por sus siglas en inglés (*Faul Tree Analysis*) permite el análisis visual deductivo que inicia con la selección de un suceso no deseado o evento que se desea evitar, ya sea un accidente o un fallo en un componente, sistema, equipo o planta, para averiguar cuáles son los orígenes del mismo (Andrea & Sierra, 2017).

Los sucesos se relacionan entre sí en un diagrama de árbol mediante puertas lógicas. Los sucesos pueden ser clasificados en tres tipos: suceso superior, sucesos intermedios, sucesos básicos. El suceso superior corresponde a la situación inicial o compleja para la cual se está haciendo el estudio, se ubica en la parte superior del diagrama y generalmente se representa mediante un rectángulo. Estos corresponden a la descomposición del suceso superior, pueden ser dos o más y se representan generalmente con un rectángulo. Los sucesos básicos corresponden a los sucesos finales de la descomposición realizada, es decir, después de estos no existe lógica en

seguir el análisis. Se representan comúnmente mediante círculos. En este mismo nivel existen también los sucesos no desarrollados, que corresponde a aquel que carece de importancia o porque la información que se posee de él es escasa.

Según Piqué & Cejalvo (1992) en este método se emplean las siguientes puertas lógicas:

- AND, indica un (Y) lógico: para que ocurra la salida es necesario que tengan lugar de modo conjunto las dos entradas lógicas.
- OR, que se utiliza para indicar un (O) lógico: para que ocurra el suceso es necesario que ocurra al menos una de las entradas lógicas.

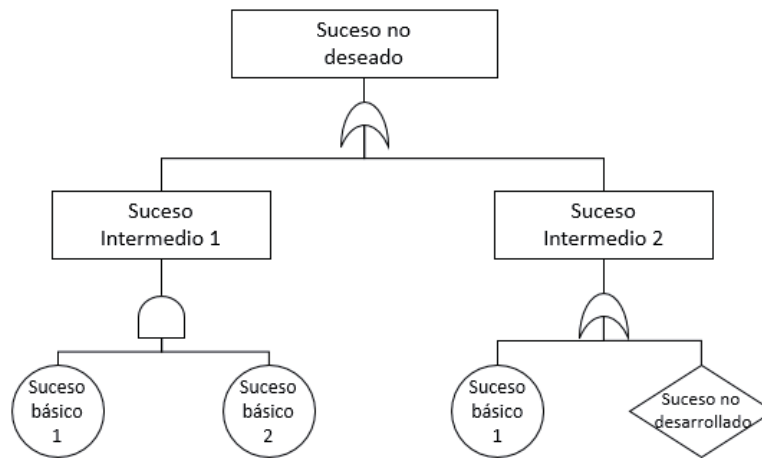








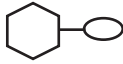


Figura 9. Estructura genérica de un árbol de falla. Fuente: (Piqué & Cejalvo, 1992)

Para la representación gráfica de los árboles de falla, con el fin de normalizar, han sido seleccionados los símbolos de la Tabla 2.

Tabla 2. Símbolos utilizados en la confección de los árboles de falla. Fuente (Piqué & Cejalvo, 1992).

Símbolo	Significado
	Suceso básico. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	Suceso no desarrollado. No se puede considerar como básico, pero sus causas no se desarrollan, ya sea por poco interés o por falta de información.
	Suceso Intermedio. Resultado de la combinación de sucesos elementales mediante puertas lógicas. También utilizado para el suceso no deseado o parte superior del árbol de fallo.
	Suceso de salida. Ocurre si y solo si ocurren todos los sucesos de entrada (inferiores).
	Suceso de salida. Ocurren uno o más de los sucesos de entrada (inferiores).
	Símbolo de transferencia. Indica que el árbol sigue en otro lugar.
	Puerta "Y" prioritaria. EL suceso de salida ocurrirá, si y solo si, todas as entradas ocurren en una secuencia determinada que normalmente se especifican en una elipse dibujada a la derecha de la puerta.
	Puerta "O" exclusiva. El suceso de salida ocurrirá si lo hace una de las entradas, pero no si ocurren dos o más de ellas.
	Puerta de inhibición. La salida ocurrirá si, y solo si lo hace su entrada y además se cumple una condición "x".

### 3.2. Análisis de fiabilidad de equipos

Los indicadores de mantenimiento asociados al área de efectividad de una compañía permiten evaluar la efectividad operacional de las instalaciones, sistemas, equipos y componentes de la misma. Con ellos es posible implementar y dar seguimiento al plan

de mantenimiento que está orientado a perfeccionar la labor y el sistema en particular (Amendola, 2003).

### **3.2.1. Confiabilidad**

Según Mesa, Ortiz, & Pinzon (2006) existen dos posibles definiciones de confiabilidad. La primera entiende como confiabilidad a la “confianza” que se tiene de que un componente, equipo o sistema pueda desempeñarse, según para lo que fue fabricado, durante un tiempo determinado, bajo condiciones estándar de operación. La segunda, indica que la confiabilidad es la probabilidad de que un componente, equipo o sistema pueda desempeñar la función requerida y bajo condiciones de uso definidas, durante un tiempo determinado.

### **3.2.2. Disponibilidad**

Es la métrica más usada al momento de evaluar la efectividad de un sistema. Se entiende como disponibilidad a la cualidad de que los sistemas, plantas o equipos puedan ser utilizados libremente. En relación a los sistemas se entiende como disponibilidad al porcentaje de la vida operativa que se encuentra utilizable para aquello para lo que fue diseñado. De una forma general la disponibilidad de un sistema se puede definir como la probabilidad media de que este se encuentre operativo (Díaz, 2010).

### **3.2.3. Confiabilidad**

Se puede definir como confiabilidad a la expectativa de que un componente, equipo o sistema pueda ser puesto como disponible en un periodo de tiempo determinado, cuando la acción del mantenimiento es ejecutada bajo estándares preestablecidos (Mesa et al., 2006).

### **3.2.4. Tasa de fallos por componente**

La tasa de falla se puede definir como el número de fallas por unidad de tiempo. Esta puede variar en el tiempo según las condiciones del componente, equipo o sistema la

curva de la bañera Figura 10 es una gráfica conocida que describe la variación de la tasa de fallo de componentes, equipos o sistemas durante su vida útil. En la primera parte de la curva la tasa de fallo se presenta en forma decreciente, a este tramo se denomina fallas prematuras o infantiles (Meruane, n.d.), este comportamiento es explicado por el aprendizaje que se necesita generar de un nuevo sistema tanto en su funcionamiento y calibración como en su misma operación. La parte central de la curva es denominada como fallo normal, en este tramo se presenta una tasa de fallo constante, esto debido a un buen funcionamiento del sistema. La tercera parte de la curva se denomina fallo de desgaste, en este tramo la tasa de fallo comienza a aumentar principalmente al desgaste natural y envejecimiento de los equipos y sistemas.

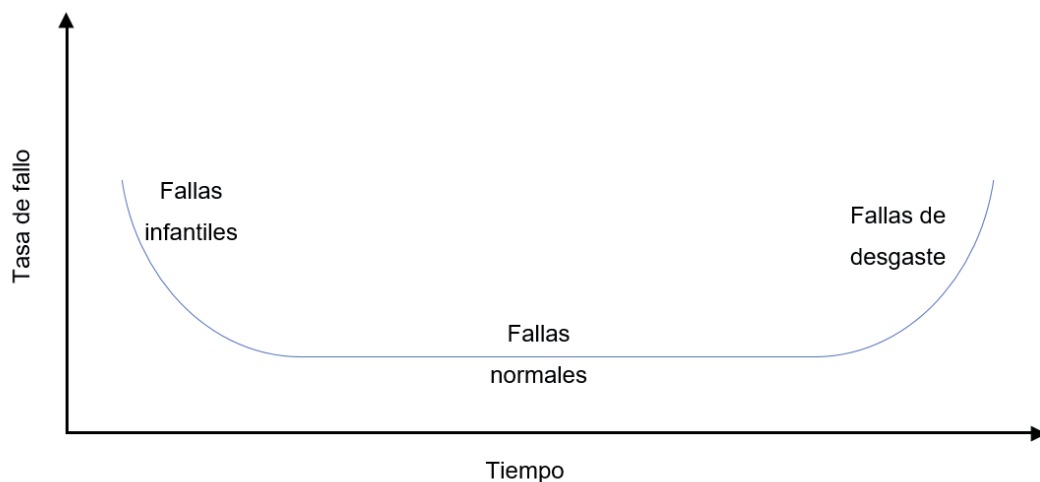


Figura 10. Curva de la bañera.

### 3.2.5. Tiempo medio de falla

Parámetro de medición que entrega el tiempo promedio de falla para un periodo en la vida de un componente, equipo y/o sistema (Andrea & Sierra, 2017). El cálculo de este depende directamente del tipo de distribución al cual se ajusten los datos bajo estudio.

Según Meruane (n.d.) si se tiene una función de densidad de probabilidad de falla, el tiempo medio para fallar está dado por la esperanza de la función:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t) \quad (1)$$

Esta es la probabilidad de que un componente que no ha fallado en  $(0, t)$  falle en el intervalo  $(t, t+dt)$ .

### 3.2.6. Tiempo medio de parada y tiempo medio de reparación

Se entiende como el tiempo de parada a aquel tiempo en que el equipo o sistema se encuentra detenido por causa de una falla. El tiempo medio de parada entonces corresponde al promedio aritmético entre todos los tiempos de parada del equipo. Corresponde al tiempo desde que se detecta la falla hasta que el equipo o sistema queda nuevamente disponible.

Se entiende cómo tiempo de reparación al tiempo que toma la reparación de un componente o sistema, se inicia cuando se cuenta con todos los componentes, herramientas y maquinarias necesarias para la reparación y finaliza cuando el equipo en reparación queda nuevamente disponible.

### 3.2.7. Tiempo medio entre fallos

El tiempo medio entre fallos o MTBF por sus siglas en inglés (*Mean Time Between Failures*) Corresponde a un parámetro de medición de fallas el cual estudia el tiempo o la vida promedio que un componente y/o sistema tendrá hasta que falle. Su análisis se realiza utilizando el tiempo acumulado del número total de fallas por componentes durante el periodo analizado (Andrea & Sierra, 2017).

Se define el tiempo medio entre fallos como:

$$MTTBF = MTTF + MTTR \quad (2)$$

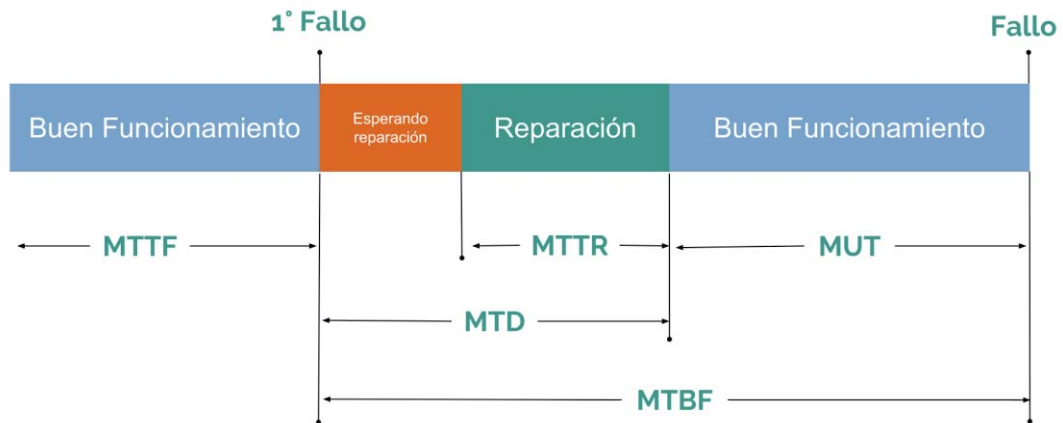


Figura 11. Fallos e índices de confiabilidad. Fuente (Andrea & Sierra, 2017)

### 3.3. Teoría de la fiabilidad

Según Luna (2005) la fiabilidad de un sistema y/o componente es definida como la probabilidad de que este no falle dentro de cierto intervalo de tiempo, desarrollando su función específica de manera satisfactoria. Esta función presenta un comportamiento decreciente a medida que transcurre el tiempo.

Cabe destacar que el tiempo “ $t$ ” en el cual ocurre la falla de un componente, es un instante que no es posible predecir mediante modelos deterministas, en otras palabras, diversos componentes sometidos al mismo esfuerzo fallarán en instantes impredecibles y diferentes. El valor de “ $t$ ” se puede considerar como una variable aleatoria continua de una función de densidad de probabilidad (Luna, 2005).

Para la evaluación de la fiabilidad se utilizan dos métodos:

1. A través de datos históricos: con elaboración estadística o no dependiendo de la cantidad de datos disponibles, si son pocos datos, se debe determinar el grado de confianza.
2. Usando la fiabilidad conocida de partes para determinar la fiabilidad del conjunto.

Si se considera “t” como el tiempo hasta que un elemento falla, como variable independiente (periodo al que se refiere fiabilidad). Suponiendo que t es continuo f(t) denota su función de densidad y su función de distribución F(t) será:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3)$$

La función de fiabilidad de cada componente puede representarse matemáticamente a través de la siguiente ecuación:

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t) \quad (4)$$

Donde  $R(t)$  corresponde a una función acumulativa la cual representa la confiabilidad del producto. Mientras que  $F(t)$  representa la probabilidad de falla del componente hasta el tiempo “t”.

El análisis de confiabilidad de un sistema conectado en serie puede estimarse a través de la confiabilidad individual de cada componente, ya que cada uno de ellos debe operar de forma independiente para que el sistema completo funcione correctamente. Es por esto, que la confiabilidad de un sistema en serie se podría obtener en términos de la confiabilidad de cada uno de sus componentes, la cual es descrita matemáticamente a continuación:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T_1 > t) * P(T_2 > t) * \dots * P(T_n > t) \\ &= R_1(t) * R_2(t) * \dots * R_n(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Por lo tanto, la confiabilidad de un sistema formado por componentes en serie es menor que la confiabilidad de cualquiera de sus partes.

Por otro lado, la funcionalidad de un sistema cuyos componentes se encuentran instalados en paralelo sólo se ve afectada si todos los componentes dejan de



funcionar. Esto, suponiendo que cada componente trabaja de forma independiente, permite expresar la confiabilidad del sistema a través de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T_1 > t) * P(T_2 > t) * \dots * P(T_n > t) \\ &= R_1(t) * R_2(t) * \dots * R_n(t) \end{aligned} \quad (6)$$

Lo anterior indica que la confiabilidad de un sistema compuesto por varios componentes independientes, conectados en paralelo será más confiable que cualquiera de los componentes por sí solo, esto debido a que la caída de un solo componente no afecta de forma directa al sistema (Andrea & Sierra, 2017).

Dentro de la estadística, el estudio de la confiabilidad puede ser llevada a cabo a través de un ajuste del histograma de frecuencias de una población de datos de fallas a una distribución probabilística, siendo en la mayoría de los casos las distribuciones: Normal, exponencial, Poisson y Weibull las más características (G. García, 2006)

### **3.3.1. Distribución normal**

Según Andrea & Sierra (2017) este tipo de distribución se ajusta generalmente a dos tipos de mantenimiento. Para el caso en el cual los elementos están sometidos a desgaste, como fallos mecánicos, y en estudio del cumplimiento de las especificaciones dadas por los ítems fabricados. La función normal está determinada por dos parámetros, la media ( $\mu$ ) y su desviación típica ( $\sigma$ ) y es representada de la siguiente forma:  $N(\mu, \sigma)$ .

Los parámetros de mantenimiento asociados a la distribución Normal de indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de principales funciones y parámetros de mantenimiento distribución Normal. Fuente: (Andrea & Sierra, 2017)

Parámetros de mantenimiento	Modelo
Densidad de fallo $f(t)$	$\frac{e^{-\frac{z^2}{2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$
Fiabilidad $R(t)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{(t-\mu)}{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$
Tasa de Fallo $h(t)$ o $Z(t)$	$\frac{t * \mu}{\sigma}$
MTBF	$\mu$
Rangos	Variable de tiempo $-\infty \leq t \leq \infty$

### 3.3.2. Distribución Exponencial

Esta distribución es muy utilizada para modelar la fiabilidad de equipos. Es una distribución sencilla y se adapta bastante bien a la zona central de la curva de la bañera en la cual la tasa de fallos es constante y aleatoria.

Tabla 4. Resumen de principales funciones y parámetros de mantenimiento distribución exponencial. Fuente (Andrea & Sierra, 2017)

Parámetros de mantenimiento	Modelo
Densidad de fallo $f(t)$	$\lambda * e^{-\lambda t}$
Fiabilidad $R(t)$	$e^{-\lambda t}$
Tasa de Fallo $h(t)$ o $Z(t)$	$\lambda$
MTBF	$\frac{1}{\lambda}$
Rangos	Variable de tiempo $t \geq 0$ Parámetro $\lambda \geq 0$

### 3.3.3. Distribución de Weibull

Una de las distribuciones utilizadas dentro de la gestión del mantenimiento corresponde a la distribución de Weibull, la cual corresponde a un modelo para tratar problemas de vida en fiabilidad industrial y describir la duración de un sistema y/o componentes de un equipo (Andrea & Sierra, 2017).

La distribución de Weibull puede ser utilizada a base dos parámetros, siendo estas:

- Parámetro de forma ( $\beta$ ): Variable que permite generar curvas de probabilidad según su valor, adaptándose de mejor forma a sucesos concretos.
- Parámetro de escala ( $\eta$ ): Proporciona la amplitud de la distribución según su valor, a medida que aumenta más se extiende la distribución sobre el eje X.

Tabla 5. Resumen de principales funciones y parámetros de mantenimiento distribución Weibull. Fuente: (Andrea & Sierra, 2017)

Parámetros de mantenimiento	Modelo
Densidad de fallo $f(t)$	$\left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{t^\beta}{\eta}}$
Fiabilidad $R(t)$	$e^{-\frac{t^\beta}{\eta}}$
Tasa de Fallo $h(t)$ o $Z(t)$	$\left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$
MTBF	$\eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$
Rangos	Variable de tiempo (t): $t \geq 0$ y Parámetros $(\beta, \eta)$ ; $\beta > 0$ ; $\eta >$

La función de riesgo o tasa de fallos adopta diferentes formas según el valor del parámetro de forma “ $\beta$ ”:

- Si  $\beta < 1$  la función de riesgo es decreciente al aumentar el tiempo.

- Si  $\beta = 1$  la función de riesgo es constante, es decir, esta es independiente del tiempo. La distribución Weibull en este caso llega a coincidir con la distribución exponencial.
- Si  $\beta > 1$  la función de riesgo es creciente a medida que transcurre el tiempo.
- Si  $1 < \beta < 2$  la tasa de fallos crece de forma rápida en el origen y de forma lenta a medida que el tiempo avanza.
- Si  $\beta = 2$  la función crece de forma lineal.
- Si  $\beta > 2$  la tasa crece poco mientras  $t$  se encuentre cercano a cero y después empieza de forma rápida.

Un caso especial se aprecia cuando  $\beta = 3,44$ , debido a que en esta situación en concreto la distribución de Weibull se parece a la distribución Normal.

## 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En todo proyecto, ya sea nuevo o en marcha, es importante incluir su correspondiente evaluación económica. Para el caso del ítem de mantención se debe, además de evaluar técnicamente la implementación de sistemas nuevos o cambios en sistemas en marcha, considerar su evaluación económica, específicamente el costo que este representará para la compañía.

### 4.1. Valor actual de costos

Las tareas de mantención en si representan un costo para las compañías, por lo tanto, es correcto que sus evaluaciones se realicen considerando el Valor Actual de Costos (VAC). Según indica Sapag (2011) para proyectos en marcha las evaluaciones solo deben centrarse en aquellos ítems de mayor relevancia y que influyen finalmente en la evaluación del proyecto. En este caso se hace innecesario una evaluación de ingresos del proyecto ya que el cambio en evaluación no aumentaría en primera instancia el flujo de dineros por concepto de venta de la materia prima.

El VAC al igual que el VAN (valor actual neto) es un índice utilizado para la evaluación y contraste de proyectos que mantienen beneficios constantes.

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (7)$$

Donde  $C_t$  es el costo al final del periodo t.

### 4.2. Costo del mantenimiento

Según Sanmartin & Quezada (2014) se puede considerar al costo total de mantenimiento como la sumatoria de la gestión del mantenimiento, en términos económicos, lo cual sirve para determinar el resultado del costo-beneficio. Se puede definir el costo de mantenimiento según la siguiente ecuación:

$$C_g = C_i + C_f + C_a + A_i \quad (8)$$

Donde:

$C_g$  : costo de mantenimiento

$C_i$  : costo de intervenciones de mantenimiento

$C_f$  : costo de fallas de mantención

$C_a$  : costo almacenamiento mantención

$A_i$  : costo amortización inversiones en mantención

#### **4.2.1. Costo de intervención**

Considera los costos relacionados con la mantención preventiva y correctiva. No se incluyen en este ítem inversiones, ni gastos relacionados directamente con la producción (ajuste de parámetros, limpieza, etc.).

El costo de intervención está compuesto por el costo de la mano de obra (interna y externa), los costos de repuestos necesarios adquiridos para realizar las tareas Costo de fallas. Corresponde a las pérdidas que tenga el sistema de producción ya sea por una disminución en la producción o por pérdida de un negocio específico. Este costo es generado por el mantenimiento correctivo o mantenimiento preventivo mal planificado.

#### **4.2.2. Costo de almacenamiento**

En este costo se integran aquellos necesarios para el manejo de inventarios de repuestos y suministros. Se deben considerar en este ítem los siguientes:

- Depreciación de los repuestos
- Gastos por seguros asociados
- Amortización de sistemas necesarios en las tareas (informáticos, administrativos, etc.)

- Mantenimiento de la infraestructura necesaria
- Remuneraciones del personal de bodega
- Interés del capital inmovilizado por el inventario

## **5. DESARROLLO**

Como se indica en la metodología de este trabajo (Sección 1.3), luego de la problemática detectada en forma global por la gerencia de la compañía (aumento en el consumo de válvulas), se procede a la determinación de las zonas específicas a evaluar con mayor detalle. Una vez detectadas las zonas se analizarán en profundidad se siguen una serie de pasos definidos secuencialmente para el logro del objetivo del proyecto.

Para el análisis inicial de este estudio, se consideró información entregada por el sistema de reportabilidad de mantenimiento de la compañía dueña de la planta química bajo estudio. La información obtenida del sistema corresponde al periodo 01-03-2016 al 01-03-2017.

### **5.1. Evaluación zonas de intervención**

La identificación de los sectores a intervenir se estableció mediante análisis de Pareto. Para el análisis se consideraron los porcentajes de intervención o reparaciones por válvulas de cada una de las etapas que componen la planta química. El análisis mostró que las unidades con mayor ocurrencia de intervenciones eran la Unidad Térmica y la Segunda Etapa de Purificación de la planta química con 13% y 11% en intervenciones respectivamente (Figura 12).

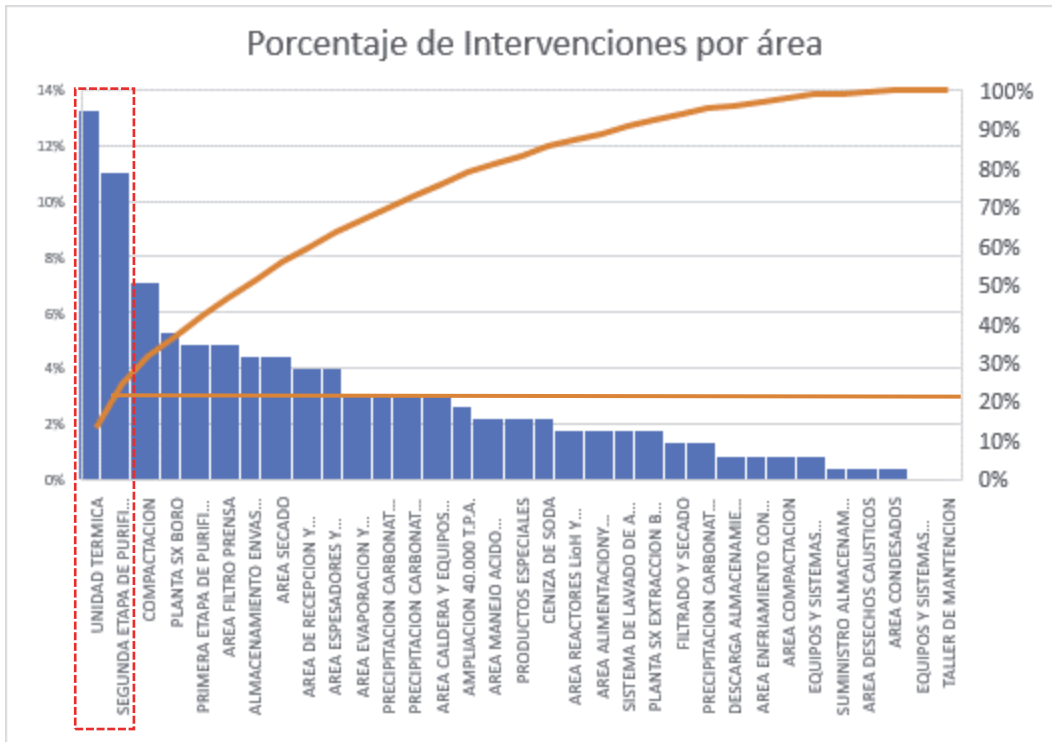


Figura 12. Análisis de Pareto de intervenciones realizadas en planta química (01-03-2016 al 01-03-2017).  
Elaboración propia.

Luego de determinar las áreas a intervenir se procedió a determinar el tipo de válvulas específicas que se deben estudiar para cumplir el objetivo de este trabajo. Los resultados se muestran a continuación:

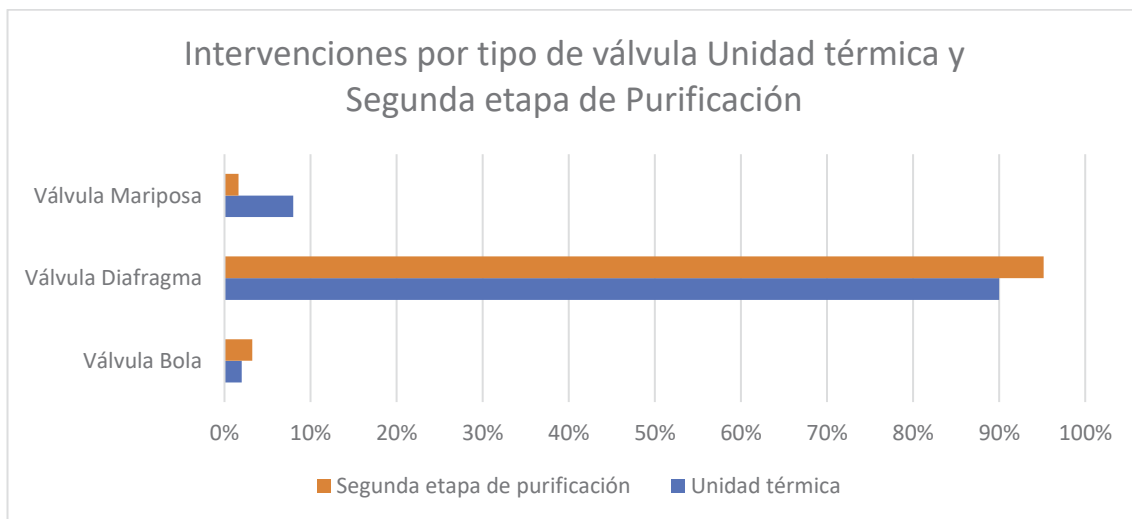


Figura 13. Intervenciones por tipo de válvulas en Unidad Térmica y Segunda Etapa de Purificación.



Como se aprecia en la Figura 13, las válvulas de tipo Diafragma son las que representan, para el caso de ambas unidades clasificadas como críticas, el mayor porcentaje de intervenciones realizadas durante el periodo de estudio con un 95% y 90% respectivamente para la Segunda Etapa de Purificación y la Unidad Térmica.

En la segunda etapa de purificación (ver Figura 14) de la planta química, se utilizan filtros de tipo prensa con funciones similares: los filtros Underflow y los filtros Overflow. El filtro del tipo prensa overflow posee como objetivo la purificación de la solución acuosa menos densa proveniente del decantador, mientras que los filtros prensa underflow tienen como objeto colar la solución más densa. Ambos filtros utilizan para su funcionamiento, cinco válvulas del tipo diafragma. La planta química en esta etapa cuenta con un total de 7 filtros de tipo prensa.

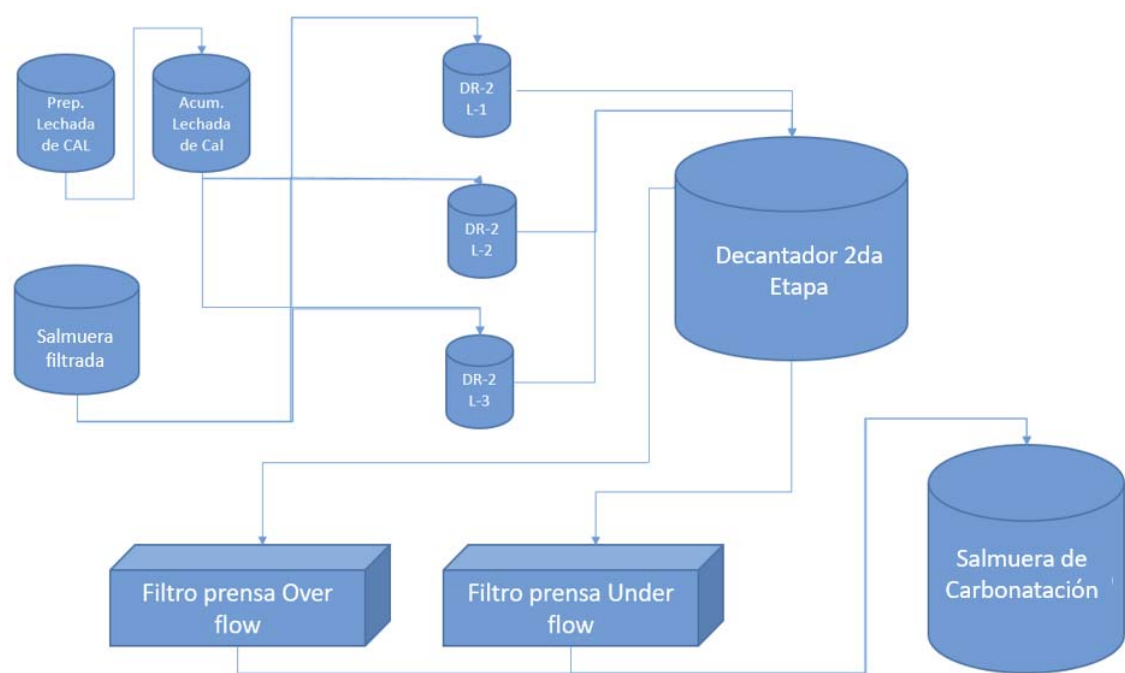


Figura 14. Segunda etapa de purificación Planta Química. Elaboración Propia.

Por otro lado, en la Unidad Térmica de la planta química, la utilización de válvulas de tipo de diafragma es en los intercambiadores de calor. La planta de procesamiento de carbonato de litio necesita para las reacciones químicas necesarias funcionar con ciertas temperaturas, esta temperatura se entrega por medio de calderas a gas natural

(calderines) y transferida a las pulpas mediante los intercambiadores de calor. Básicamente, se circula agua industrial que ingresa a la caldera alcanzando los 100°C. El agua industrial caliente sale de la caldera y se dirige por medio de tuberías hasta el intercambiador de calor, en este, el agua industrial pierde temperatura, transfiriéndola a la salmuera fría que también circula por el intercambiador de calor y que proviene de alguno de las unidades de la planta. El agua industrial, ahora tibia (60°C aprox.), se dirige nuevamente a la caldera para iniciar el circuito nuevamente. Por otro lado, la salmuera, ahora tibia (65°C aprox.) sigue su circuito a la unidad de la planta química que corresponda (Figura 15). Cada intercambiador de calor a placas de esta unidad utiliza 4 válvulas de diafragma. La planta química en esta etapa cuenta con cinco intercambiadores de calor, todos funcionando a circuito cerrado.

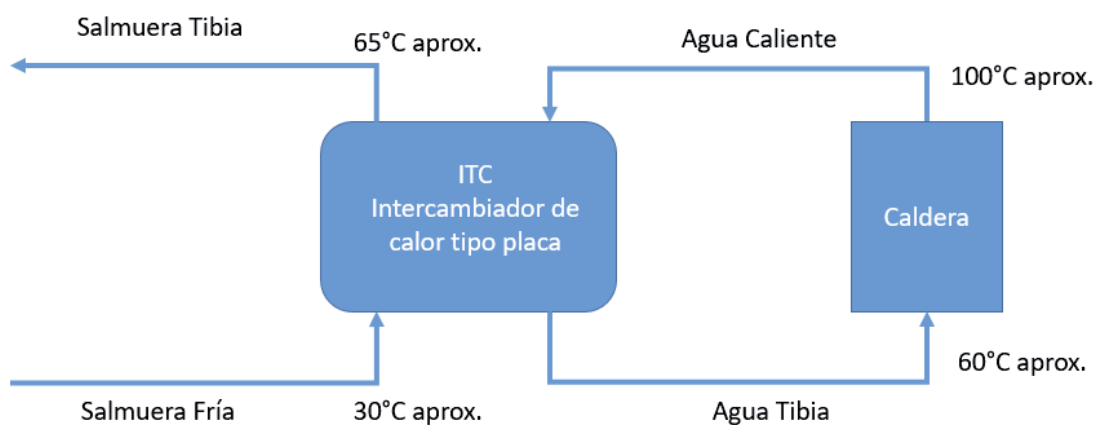


Figura 15. Circuito funcionamiento Unidad Térmica.

## 5.2. Características de las válvulas en evaluación

Las válvulas de diafragma utilizadas en la planta química corresponden al tipo 6" y 4", Unidad Térmica y Segunda Etapa de Purificación respectivamente. Las válvulas poseen un cuerpo sin recubrimiento fabricado de hierro fundido (*cast iron* ASTM A126

CI B), el cual posee un rango de temperatura de trabajo entre  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $175^{\circ}\text{C}$  junto con una presión límite de 10 bar (1Mpa) y una dureza de 160 a 220 Brinell (HB).

Por otro lado, el diafragma utilizado en este tipo de válvulas se encuentra compuesto por EPDM (20), utilizado para transporte de químicos corrosivos y líquidos abrasivos con un intervalo de temperatura de trabajo entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $275^{\circ}\text{C}$ .

### 5.3. Factores incidentes en los fallos

Luego de la identificación de las válvulas que presentan mayor tasa de fallos en las unidades analizadas, se procede al análisis de causalidad de fallo de la mismas. Los árboles de falla para cada etapa bajo evaluación son muy similares (ver Figura 16 e Figura 17) la distinción entre ambas etapas es la temperatura a la cual son sometidas las válvulas en cada proceso.

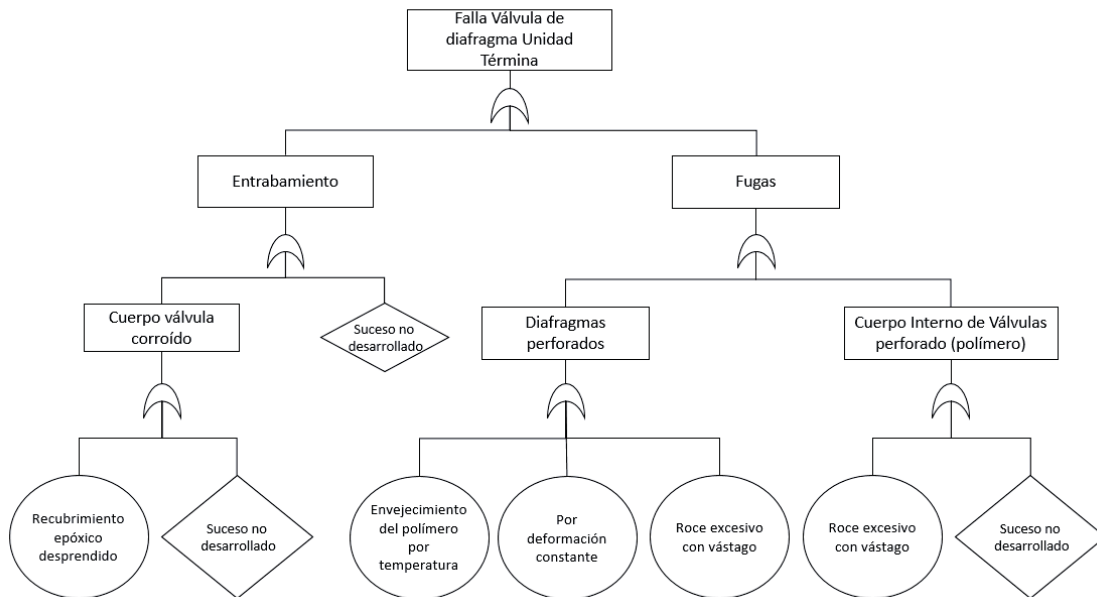


Figura 16. Árbol de falla de válvulas de diafragma, unidad térmica.

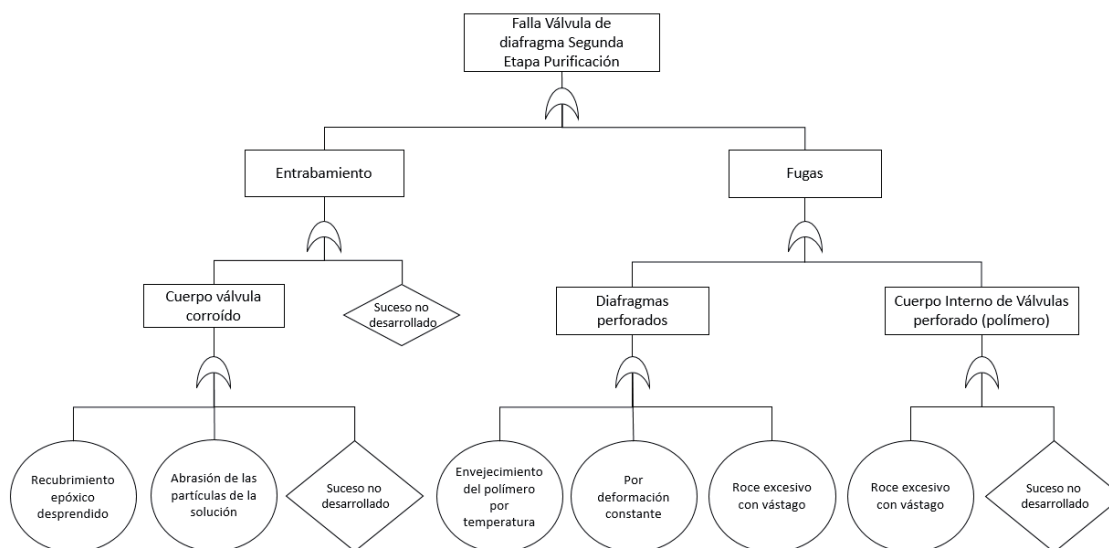


Figura 17. Árbol de falla de válvulas de diafragma, segunda etapa de purificación.

De los árboles de fallo de las válvulas de diafragma de cada etapa, se determinaron tres (3) factores que inducen al fallo de las válvulas. Los factores identificados se explican a continuación:

- **Abrasión:** el proceso de la planta química considera el tratamiento de salmueras concentradas con un alto porcentaje en sólidos. La abrasión de los fluidos que circulan por ellas desgasta progresivamente los materiales que constituyen las válvulas.
- **Temperatura:** para lograr la reacción química necesaria, la temperatura de la planta química puede llegar en algunos casos hasta los 100°C. Indudablemente este factor afecta negativamente los componentes de las válvulas utilizadas por la planta química, debido a la continuidad permanente de la operación.
- **Corrosión:** el efecto de corrosión se presenta por la propia salmuera y las sales que la componen, estos generan un deterioro acelerado de los componentes de la válvula. Además, se adicionan los químicos utilizados en la limpieza y mantención del sistema de cañerías de la planta, los cuales poseen niveles de acides elevados.

#### **5.4. Modos de falla válvulas diafragma**

Mediante el análisis de los factores que inciden en el funcionamiento de las válvulas y la observación de las fallas que ocurrieron durante el periodo de evaluación, se logró determinar los modos de falla de la válvula de diafragma para las dos unidades bajo análisis. Las válvulas de diafragma utilizadas presentaban principalmente tres (3) formas de falla, estas se explican a continuación.

- Falla de la válvula completa: Producida principalmente por la falla del asiento o recubrimiento interior del asiento la válvula, el cual se perforó o agrietó, permitiendo fugas a través de rendijas o espacios. Lo anterior sucede producto de la abrasión producida por la pulpa procesada, al ser un proceso continuo finalmente los componentes fallan por desgaste. Otra causa de debe al desprendimiento del recubrimiento epóxico.
- Falla del diafragma de la válvula: Cuando se observan fugas por el volante de la válvula, indica que el diafragma está roto. Sin embargo, el asiento y el bonete de la válvula no presentan daños. El daño del diafragma en ambas unidades se produce mayormente por tres razones: producto de la presión constante a la cual se encuentran sometidos los diafragma causando su deformación; por el roce excesivo del diafragma con el vástago de la válvula; y finalmente para el caso de la unidad térmica por el envejecimiento del diafragma producto de la alta temperatura al cual se encuentra sometido constantemente.
- Falla del bonete y diafragma de la válvula (simultaneo): Producida por la falla del diafragma el cual permite el paso de la pulpa al bonete de la válvula, desplazándolo y finalmente trabando el volante, no permitiendo abrir o cerrar la misma. Esta falla de debe principalmente al roce excesivo con el vástago de la válvula.

## 5.5. Propuesta y contraste válvulas

Para la correcta determinación del tipo de válvula que podría reemplazar al componente detectado como crítico (válvula de tipo de diafragma), es necesario determinar las características de funcionamiento de la planta química. Según los arboles de falla generados para el componente crítico detectado y los procesos de extracción del litio de la planta química y las variables que afectan directamente las válvulas y sus componentes. Las características físicas de la pulpa, elementos contenidos en la pulpa y temperatura de las unidades se indican en la Tabla 6.

Tabla 6. Variables presentes en el proceso productivo de la planta química de litio.

Variables presentes en el sistema	Área de estudio	
	Unidad Térmica	Segunda Etapa de Purificación
Temperatura (°C)	Hasta 100°	55° a 65°
Características Pulpa	24% solido Flujo volumétrico máximo de diseño 44,44 m <sup>3</sup> /h Flujo másico máximo de diseño 62,88 t/h	Prensa Over 0.61% solido Prensa Under 10.77% solido Flujo volumétrico máximo de diseño 126,72 m <sup>3</sup> /h Flujo másico máximo de diseño 147 t/h
Elementos presentes	Litio, magnesio, sodio, potasio, cloro, boro, sulfato, carbonato, calcio, agua.	Litio, magnesio, sodio, potasio, cloro, boro, sulfato, carbonato, calcio, agua.
Químicos de limpieza	Ácido Sulfúrico 15-20%	--

### 5.5.1. Propuesta de válvula

Con el análisis de la información de las características que provocan el fallo de las válvulas de diafragma y las características propias del proceso de tratamiento de la planta química de litio, se procede a la determinación del tipo de válvula adecuada al sistema. Esta se realiza mediante el análisis de los componentes presentes (en stock) en bodegas de la compañía por expresa solicitud de la jefatura a cargo de las unidades bajo análisis.

Según los elementos presentados hasta ahora e identificando los materiales que constituyen los distintos tipos de válvulas se revisa cuidadosamente la resistencia química de los componentes según la clasificación entregada por Thermo Fisher Scientific (2016) se determina que la válvula adecuada para reemplazar a las válvulas de diafragma es la válvula de tipo Bola.

La válvula tipo bola actualmente usada en la operación de la planta (en unidades distintas) corresponde al modelo Q41F de 3", cuyo material de cuerpo se encuentra fabricado por acero inoxidable (ASTM A351 Grade CF8M), límites de temperatura de trabajo de -29 y 150°C, rango de presión entre 1,6 – 6,4 Mpa y una dureza de 156 a 170 Brinell.

La Tabla 7 muestra un contraste entre las características de la válvula de diafragma y la válvula de bola utilizadas por la compañía en las etapas de la planta química que fueron detectadas como críticas.

Tabla 7. Comparación componentes válvulas frente a agentes externos. Elaboración propia.

Ítem	Tipo de válvula	
	Válvula tipo diafragma	Válvula tipo bola
Temperatura	Su cuerpo de hierro fundido permite trabajar con una temperatura entre -10 a 175°C.	El acero inoxidable utilizado para su fabricación permite un trabajo con un rango de temperatura entre -29 a 150°C.
Presión	Permite soportar una presión de hasta 1Mpa.	Capaz de operar entre un rango de presión de 1,6 a 6,4 Mpa.
Corrosión	El hierro fundido presenta una gran resistencia a la corrosión frente a líquidos neutros y alcalinos, no así frente a soluciones ácidas.	El acero inoxidable modelo CF8M corresponde al tipo AISI316, el cual presenta una alta resistencia a la corrosión frente a atmosferas industriales y marinas, y frente a agua salada.
Resistencia químicos	No recomendable con ácido sulfúrico	Recomendable para concentración de ácido sulfúrico hasta 70%

## 5.6. Seguimiento de componente propuesto

Para un adecuado seguimiento del componente sugerido como mejora del proceso, se identifica cada válvula de los filtros correspondientes a cada etapa intervenida del proceso de la planta química, con su enumeración (ver Figura 18).

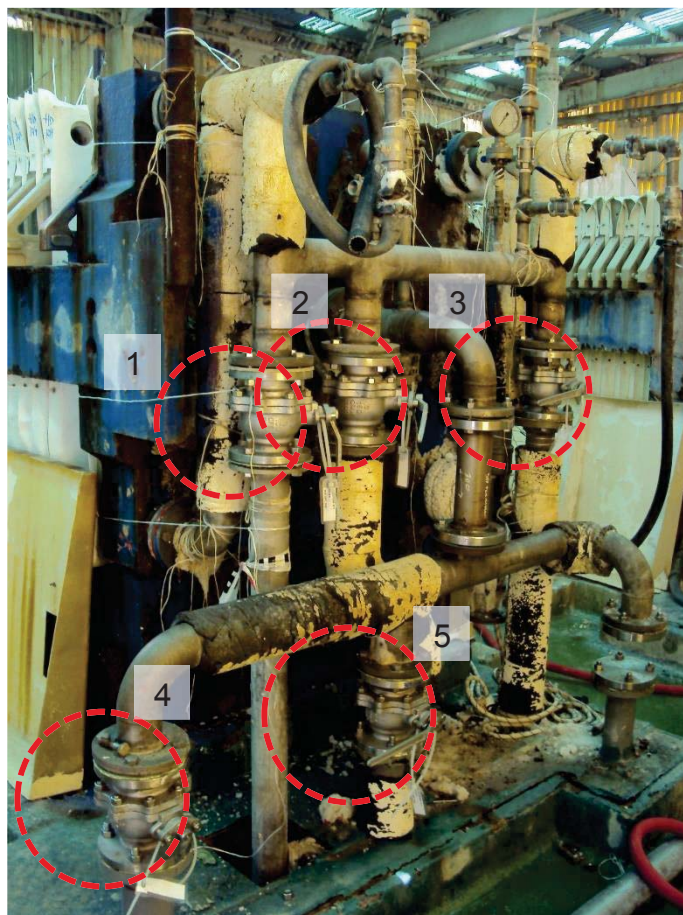


Figura 18. Enumeración válvulas diafragma Prueba Filtro Prensa 2.

Tabla 8. Válvulas Prueba FP2 MM 12 septiembre 2017.

N°	Descripción línea	Válvula bola Nueva
1	Descarga a TK Carbonatación	13-09-2017
2	Descarga Recirculación a Decantador 2	13-09-2017
3	Descarga Recirculación a TK Precoat	13-09-2017
4	Alimentación Decantador 2 (over)	13-09-2017
5	Alimentación TK Precoat	13-09-2017



El seguimiento de las válvulas propuestas se realizó por un (1) año, desde 13-09-2017 hasta el 01-09-2018. Para el caso de esta válvula (bola), los fallos se presentaban en todas ellas por la acumulación de material al interior de la válvula, obstaculizando el paso a la pulpa, por lo tanto, al ocurrir este problema se optó por el cambio de la válvula completa y no la reparación del componente específico de la válvula.

## **6. ANÁLISIS FIABILIDAD**

El paso siguiente indicado en la metodología e este trabajo es el contraste de los datos de la planta química consecuencia del uso de las válvulas que poseía el sistema, con los resultados obtenidos de la implementación de prueba de la válvula propuesta para el sistema (válvula de bola).

El primer paso antes de poder realizar el contraste de los datos provenientes del uso de las diferentes válvulas, es determinar el tipo de distribución al cual se ajustan los mismos. Con ella se pueden determinar los indicadores de confiabilidad para ambos casos y concluir en función de estos.

### **6.1. Distribuciones de los datos**

Los datos modelados corresponden a las fallas presentadas en un año de las válvulas de tipo diafragma (01-03-2016 al 01-03-2017) y aproximadamente a 6 meses de pruebas realizadas con las válvulas de tipo bola (13-09-2017 al 01-09-2018).

Para determinar las distribuciones a las cuales se ajustan los datos se aplicó un test de bondad de ajuste sobre cada grupo de datos (ver anexo 1). La distribución que se presentó con mayor frecuencia fue la distribución probabilística Weibull, esta distribución es muy utilizada para tratar problemas de vida en fiabilidad industrial y describir la duración de un sistema y/o componentes de un equipo.

Los test de bondad de ajuste para la Unidad Térmica como para la Segunda Etapa de Purificación de la planta química, se aplicaron a los siguientes grupos:

- Falla del bonete y diafragma de la válvula (simultáneos) [F1]

- Falla solo del diafragma de la válvula [F2]
- Falla de la válvula completa [F3]
- Falla del sistema (filtro) [F1+F2+F3]
- Falla de la válvula bola (sistema)

### 6.1.1. Unidad Térmica

Los resultados de los test aplicados, sobre los datos de las válvulas utilizadas en la segunda etapa de purificación de la planta química, con un nivel de significancia del 95% se muestran en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación. Elaboración propia.

Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov	Válvula tipo diafragma (sistema [F1+F2+F3])	Válvula tipo bola
Hipótesis nula	Proviene de una distribución de Weibull	Proviene de una distribución de Weibull
Hipótesis alterna	No proviene de una distribución de Weibull	No proviene de una distribución de Weibull
P valor	0,05497	<0,05
Resultado	Se acepta hipótesis nula	Se rechaza hipótesis nula

Para el caso de las válvulas de diafragma en conjunto [F1+F2+F3] el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov se ajustan a una distribución de Weibull. Por otro lado, para el caso de la Válvula de bola en esta unidad no se acepta la hipótesis nula. Al aplicar el test de verosimilitud, este indica que en primera instancia los datos se ajustan a una distribución uniforme y en segunda instancia a una distribución de Weibull. Sin embargo, las pruebas de bondad de ajuste indican el rechazo de ajuste a las distribuciones nombradas con un P valor mayor solo para la distribución de Weibull. La estadística descriptiva y el test de Weibull aplicado se encuentran en el anexo 1 de este trabajo.

Los resultados del test de bondad de ajuste para los datos de fallo de los componentes de las válvulas se indican en la Tabla 10. Para el caso de todos los componentes

descritos es aceptada la hipótesis nula, es decir, en todos los casos los datos se ajustan a una distribución de Weibull.

Tabla 10. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación (componentes válvula diafragma). Elaboración propia.

Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov	F1	F2	F3
Hipótesis nula	Proviene de una distribución de Weibull	Proviene de una distribución de Weibull	Proviene de una distribución de Weibull
Hipótesis alterna	No proviene de una distribución de Weibull	No proviene de una distribución de Weibull	No proviene de una distribución de Weibull
P valor	0,0996	0,8725	0,1439
Resultado	Se acepta hipótesis nula	Se acepta hipótesis nula	Se acepta hipótesis nula

Los valores de los parámetros de escala  $\beta$  y forma  $\eta$  obtenidos para las distribuciones ajustadas se indican en la Tabla 11. Estos parámetros serán los utilizados más adelante para determinar los índices de confiabilidad correspondientes para los componentes y la unidad.

Tabla 11. Parámetros de escala y forma de los test de distribuciones Unidad Térmica.

Tipo de fallo	Parámetro $\beta$	Parámetro $\eta$
Válvulas diafragma “válvula completa” [F3]	1,13877	686,717
Válvulas diafragma “diafragma” [F2]	1,23744	454,641
Válvulas diafragma “bonete y diafragma” [F1]	1,24583	515,646
Válvulas diafragma Sistema [F1+F2+F3]	1,34154	196,88

Válvulas tipo bola <sup>1</sup>	1,4159	1165,88
---------------------------------	--------	---------

Se debe destacar que para el caso de la válvula de tipo bola solo se presentaron, durante el periodo de pruebas, solo 2 fallos, ambos por acumulación de material adherido al interior de la válvula que impedía el paso de la pulpa.

### 6.1.2. Segunda Etapa de Purificación

Para el caso de la unidad térmica los resultados de test de distribución aplicados, sobre los datos de las válvulas utilizadas, con un nivel de significancia del 95% se muestran en la siguiente Tabla 12.

Tabla 12. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación como sistema. Elaboración propia.

Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov	Válvula tipo diafragma (sistema [F1+F2+F3])	Válvula tipo bola
Hipótesis nula	Proviene de una distribución de Weibull	Proviene de una distribución de Weibull
Hipótesis alterna	No proviene de una distribución de Weibull	No proviene de una distribución de Weibull
P valor	0,0787	0,4355
Resultado	Se acepta hipótesis nula	Se acepta hipótesis nula

Para ambos casos el test de bondad de ajuste indica que se acepta la hipótesis de que las distribuciones provienen de una distribución de Weibull. Para el caso de las válvulas de diafragma del estudio por cada causa de fallo, respecto a sus distribuciones se indica en la Tabla 13.

---

<sup>1</sup> El test de bondad de ajuste rechaza la idea de que los datos provengan de una distribución de Weibull, sin embargo, según verosimilitud es la mejor distribución luego de la D. Uniforme. Para efectos de cálculos se procederá a estimar el MTBF con los parámetros de Weibull (media= 1.762,13; mediana= 1.632).

Tabla 13. Resultados prueba de bondad de ajuste Segunda Etapa de Purificación por tipo de falla. Elaboración propia.

Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov	F1	F2	F3
Hipótesis nula	Proviene de una distribución de Weibull	Proviene de una distribución de Weibull	Proviene de una distribución de Weibull
Hipótesis alterna	No proviene de una distribución de Weibull	No proviene de una distribución de Weibull	No proviene de una distribución de Weibull
P valor	0,6784	0,0778	0,7527
Resultado	Se acepta hipótesis nula	Se acepta hipótesis nula	Se acepta hipótesis nula

La prueba de bondad de ajuste realizada indica que todos los modos de fallo de las válvulas de diafragma de la segunda etapa de purificación se ajustan a una distribución de Weibull. Los valores de los parámetros obtenidos para las distribuciones ajustadas se indican en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de escala y forma de los test de distribuciones Segunda Etapa de Purificación.

Tipo de fallo	Parámetro $\beta$	Parámetro $\eta$
Válvulas diafragma “válvula completa” [F3]	1,2184	545,986
Válvulas diafragma “diafragma” [F2]	1,10384	806,065
Válvulas diafragma “bonete+diafragma” [F1]	1,2417	908,178
Válvulas diafragma Sistema [F1+F2+F3]	1,2115	285,045
Válvulas tipo bola	1,4519	2651,8

## 6.2. Fiabilidad Unidad térmica

Con los parámetros  $\eta$  y  $\beta$  de las distribuciones obtenidas; y el tiempo, se generan curvas del comportamiento de los componentes bajo análisis. La Figura 19 corresponde al comportamiento de las válvulas de diafragma respecto a la probabilidad de falla en la Unidad Térmica. Para este caso la válvula completa tiene una menor probabilidad de fallo en el tiempo al compararla con los componentes de la misma. Por otro lado, el diafragma es el componente que presenta una mayor probabilidad de fallo, lo anterior, debido a como ya se ha explicado, las altas temperaturas a las cuales este componente está expuesto de forma constante causan su deterioro de forma acelerada.

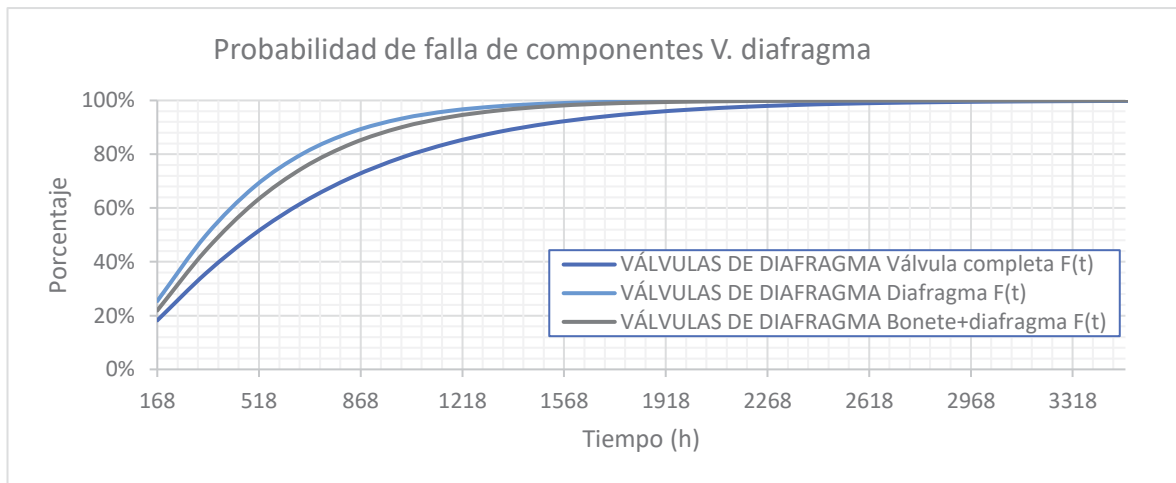


Figura 19. Gráfica probabilidad de falla válvula de diafragma en Unidad Térmica.

De igual forma, la tasa de fallos para el diafragma es siempre superior en esta unidad con un comportamiento creciente. La tasa de fallos del Bonete y diafragma de forma simultánea queda en segunda posición, el cual también presenta un comportamiento creciente. Por último, la válvula completa es la que presenta la menor tasa de fallos, además esta presenta una tasa más bien constante (ver Figura 20).

El comportamiento creciente de las tasas de fallos indica que, en el periodo de estudio, los fallos, para los componentes cuya tasa es creciente, se presentaron cada vez con

mayor ocurrencia. Por otro lado, el comportamiento constante representa un comportamiento más bien estable y predecible.

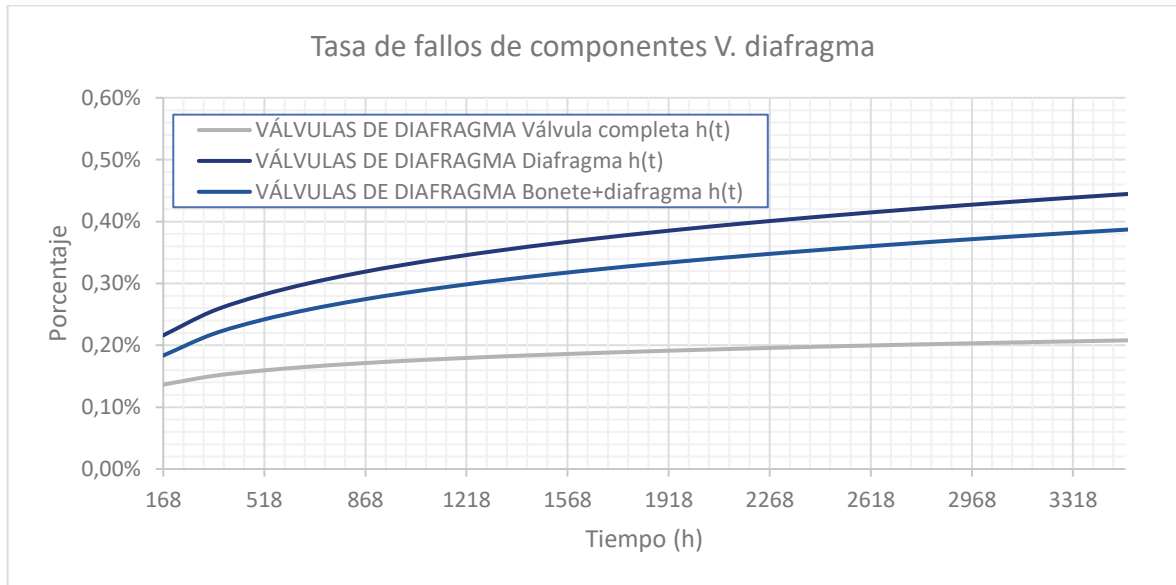


Figura 20. Gráfica probabilidad de falla válvula de diafragma en Segunda Etapa Purificación.

### 6.3. Fiabilidad Segunda etapa de purificación

Para el caso de la segunda etapa de purificación el comportamiento de la probabilidad de fallo es diferente a la Unidad Térmica respecto a los componentes de la válvula de diafragma. La tasa de fallos mayor la posee la válvula completa, seguida por el diafragma y por último por los fallos del bonete y diafragma de forma simultánea (Figura 21). Lo anterior señala la recurrencia de falla de la válvula en su totalidad, indicando claramente lo inapropiado del componente para las características del sistema.

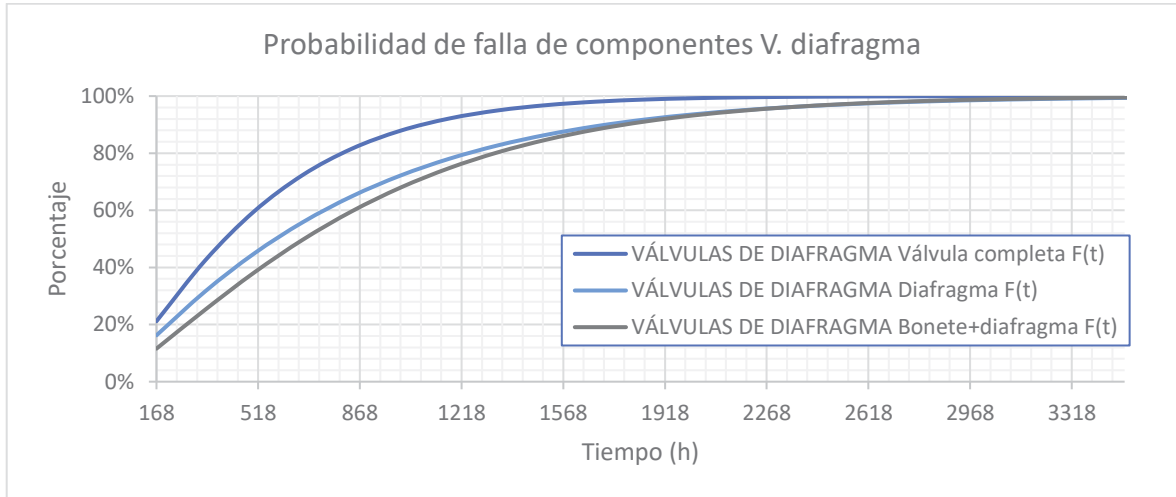


Figura 21. Grafica de probabilidad de falla de válvulas tipo diafragma en la segunda etapa de purificación.

El comportamiento de la tasa de fallo (Figura 22) señala que a diferencia de la Unidad Térmica, en la Segunda Etapa de Purificación el diafragma es aquel que presenta una tasa de fallo creciente en el tiempo, mientras tanto las dos causas de fallo restantes presentan una tasa de fallo constante.

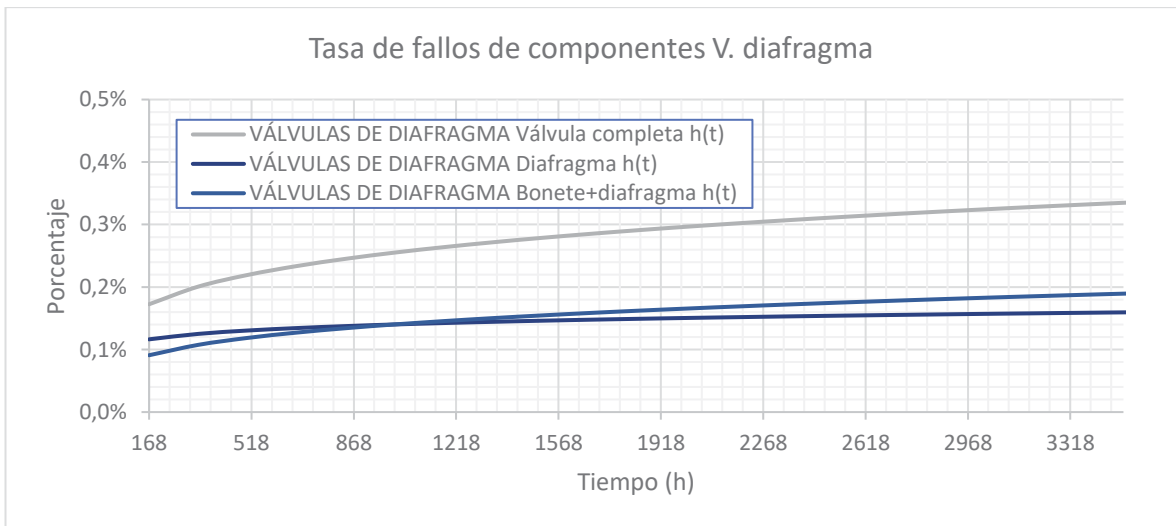


Figura 22: Gráfico tasa de fallos por componentes válvula de diafragma. Elaboración propia.



## 6.4. Contraste fiabilidad

Como se indicó en la sección 6.1.1 los datos provenientes de los fallos de la válvula de bola<sup>2</sup> utilizada para las pruebas de este trabajo no se ajustaron de forma adecuada a ninguna distribución. En este capítulo solo se realizará el contraste gráfico para la Segunda Etapa de Purificación de la Planta Química.

Respecto a la probabilidad de falla, la válvula de bola presenta un comportamiento superior a la válvula de diafragma en el rango de estudio (Figura 23). Por lo tanto, la válvula de bola entrega mayor seguridad de continuidad a la operación.

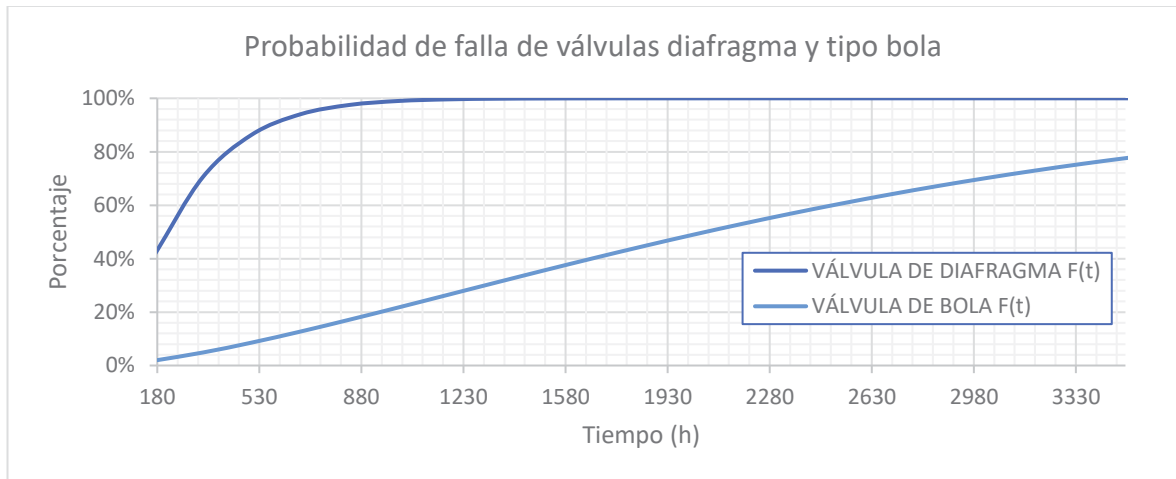


Figura 23. Gráfico tasa de fallos válvula de diafragma y válvula de bola. Elaboración propia.

Al comparar gráficamente el comportamiento de la tasa de fallo de ambas válvulas en esta unidad (Figura 24), se corrobora que la válvula de bola presenta una tasa de fallo menor con un comportamiento constante, por otro lado, la tasa de fallo de la válvula de diafragma presenta un comportamiento creciente. Lo anterior indica la estabilidad en el uso de la válvula de bola.

---

<sup>2</sup> La unidad solo presentó solo un fallo durante el periodo de prueba.

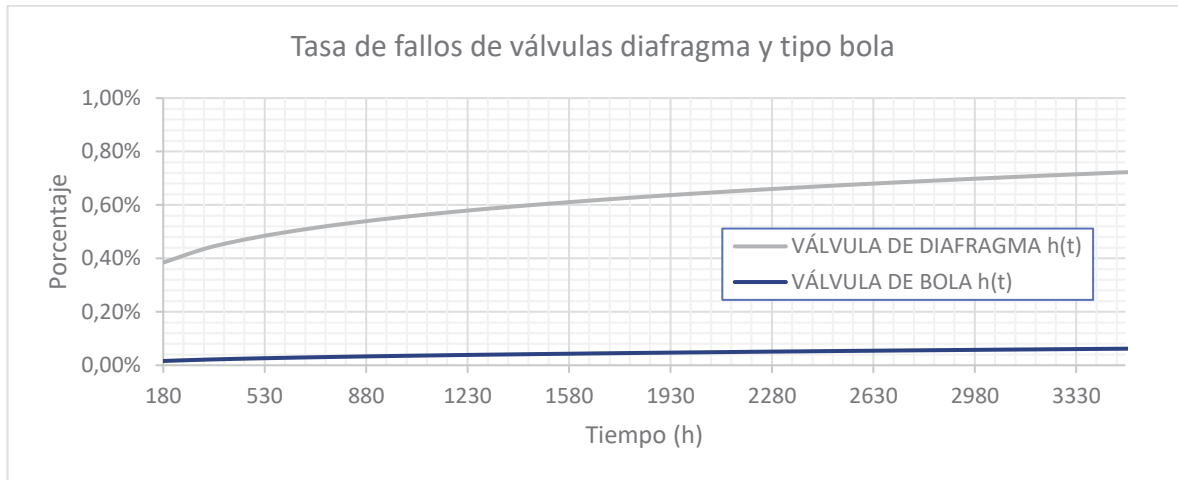


Figura 24. Gráfico tasa de fallos válvula de diafragma y válvula bola. Elaboración propia.

## 7. CONTRASTE INDICADORES DE CONFIABILIDAD

Una vez realizado el ajuste de los datos a las distribuciones correspondientes, se procede al cálculo de los indicadores de confiabilidad correspondientes a cada uno de los componentes según las distribuciones a las cuales se ajustan los datos de fallo.

### 7.1. Tiempo medio entre fallos

Los resultados del contraste del TMBF de ambas unidades se indican en la Tabla 15. Para el caso de la “Unidad térmica” el tiempo medio entre fallas de las válvulas de bola es superior en 3239,03 horas a las válvulas de diafragma.

Por otro lado, para el caso de la “segunda etapa de purificación” el tiempo medio entre fallas calculado para las válvulas tipo diafragma (sistema) es de 267,48 horas, mientras que las válvulas tipo bola presentan un MTBF igual a 2.404,01 horas, 9 veces más que en la primera. Esto indica que las válvulas tipo bola presentan un tiempo operativo mayor entre una ocurrencia de falla del sistema.

Tabla 15. Tiempo medio entre fallos áreas bajo estudio.

Tiempo medio entre fallos por tipo de válvula en área específica	Válvula de diafragma	Válvula de Bola
Unidad Térmica	180,74	4.248
Filtro de la Segunda Etapa de Purificación bajo evaluación	267,48	2.404,01

EL MTBF puede considerarse como el índice de mayor peso en confiabilidad. Se puede concluir por el momento que las válvulas de tipo bola son para el caso de las dos áreas bajo estudio la mejor opción.

## 7.2. Tiempo medio de reparación

Desde el punto de vista del tiempo de reparación que toma cada componente, se espera que este no sea muy diferente entre una válvula y otra debido a que las tareas que se deben realizar son similares para ambos casos en cada etapa. Sin embargo, este valor se hace relevante al considerar la cantidad de reparaciones que se deben hacer en cada caso.

La Unidad Térmica de la planta química presenta una diferencia nula entre el tiempo medio de reparación al considerar válvulas de diafragma y válvulas de tipo bola.

Tabla 16. Tiempo medio de reparación áreas bajo estudio.

Tiempo medio de reparación por tipo de válvula en área específica	Válvula de diafragma	Válvula de Bola
Unidad Térmica	3,15	2,2 <sup>3</sup>
Filtro de la Segunda Etapa de Purificación bajo evaluación	3,33	3,67 <sup>4</sup>

Para el caso de la “Segunda etapa de purificación” el tiempo medio de reparación de las válvulas tipo diafragma obtuvo un valor de 3,33 horas, mientras que el valor resultante de MTTR para las válvulas tipo bola es de 3,74 horas. Sin embargo la tasa de fallos para los casos de válvula de diafragma es mucho mayor en el tiempo que el caso de las válvulas de bola (Sección 6.2).

## 7.3. Tiempo medio de falla

El tiempo medio entre fallas para ambos componentes presenta claras diferencias. Sin embargo, se debe considerar que para el caso de las válvulas de diafragma no es

---

<sup>3</sup> Promedio de solo dos fallos presentados durante el periodo de prueba.

<sup>4</sup> Único fallo registrado durante el periodo de prueba.

posible afirmar que su medición parte en las mismas condiciones que el caso de las válvulas de tipo bola. Esto debido a que, para el caso de las primeras, la medición se realiza desde un tiempo arbitrario en el cual se podría producir el fallo de cualquier válvula del filtro analizado sin importar el tiempo de vida de la misma. Para el caso de las válvulas de bola, todas las válvulas comienzan su funcionamiento al mismo tiempo en el filtro de prueba.

Tabla 17. Tiempo medio primera falla áreas bajo estudio.

Tiempo medio de falla (primera falla) por tipo de válvula en área específica	Válvula de diafragma	Válvula de Bola
Unidad Térmica	192	1750,4 <sup>5</sup>
Segunda Etapa de Purificación	384	5760

Los resultados de la Tabla 17 indican que existe un tiempo mayor de operatividad antes del primer fallo (para los análisis realizados) de las válvulas tipo bola en ambas unidades críticas.

#### **7.4. Disponibilidad del sistema**

La disponibilidad del sistema, solo considerando las válvulas como único componente del mismo y por tanto sin más detenciones, se indican en la Tabla 188. El incremento en la disponibilidad del sistema con el uso de las válvulas de bola corresponde a 1.43% y 0,83% para la “unidad térmica” y la “Segunda etapa de purificación” respectivamente. La Tabla 18 muestra los resultados de cada etapa con cada válvula.

---

<sup>5</sup> Calculado asumiendo distribución de Weibull (promedio 1762,13 y mediana 1632)

Tabla 18. Disponibilidad del sistema.

Disponibilidad del sistema según tipo de válvula en área específica	Válvula de diafragma	Válvula de Bola
Unidad Térmica	98,58%	99,92%
Filtro prensa de la Segunda Etapa de Purificación en evaluación	98,73%	99,96%

La diferencia de disponibilidad solo al considerar las válvulas como único componente del sistema no es grande, sin embargo, si se analiza este indicador en conjunto con el MTBF se concluye que debido al elevado número de fallas que se presenta en el sistema al trabajar con válvulas de tipo diafragma, es sin duda, una mejor opción a estas la utilización de las válvulas de tipo bola.

### **7.5. Evaluación económica**

Para el análisis económico y posterior contraste de las válvulas usadas en la planta química, se determina en primera instancia los ítems relevantes de ingresos y egresos asociados a las válvulas. Debido a que los ingresos del proyecto no son alterados por las fallas de las válvulas y solo producen una baja en un componente del sistema que funciona en paralelo a otras (caso de la Segunda Etapa de Purificación), O que solo se produce una baja momentánea de la productividad que ya está asumida por el sistema (caso de la Unidad Térmica), queda entonces esta variable fuera del análisis.

Respecto a los egresos, según lo visto en la sección 4.2, el costo del mantenimiento está asociado a: costos de intervenciones de mantenimiento, costos por pérdidas de producción, costos de almacenamiento y costos por amortización de inversiones. De los anteriores el único costo relevante a considerar es el costo de intervención del mantenimiento. Lo anterior debido a que los restantes costos asociados a la mantención permanecerán presentes en la empresa pese al cambio de componente. El análisis económico se realiza primero en un horizonte de evaluación de un año

(considerando los datos previos para la determinación del cambio de un año y las pruebas posteriores de la misma extensión).

Para la evaluación económica se consideraron los MTBF de cada componente tanto para la Unidad Térmica como para la Segunda Etapa de Purificación. Los MTBF fueron cálculos a partir de las distribuciones a las cuales se ajustaban mejor los datos según lo explicado en la sección 7.1. El detalle de los análisis económicos realizados se encuentra en el anexo 3.

La evaluación económica en ambos periodos de evaluación y por cada componente se indican en la Tabla 19. Para el caso del horizonte de evaluación de un año, se consideran solo 4 y 5 válvulas de diafragma para el caso de la unidad térmica y Segunda etapa de Purificación respectivamente. Para el caso del horizonte de evaluación de 5 años, se consideran 20 válvulas de diafragma para la Unidad térmica (5 ITC) y 35 válvulas de diafragma para el caso de la Segunda Etapa de Purificación (7 Filtros prensa)

Tabla 19. Resultados evaluación económica.

Horizonte de evaluación	1 año de evaluación		5 años de evaluación	
	Válvulas de diafragma VAC	Válvulas de bola VAC	Válvulas de diafragma VAC	Válvulas de bola VAC
Unidad Térmica	-\$ 51.011	-\$ 17.443	-\$ 255.055	-\$ 343.208
Segunda Etapa de Purificación	-\$ 49.029	-\$ 5.073	-\$ 87.217	-\$ 50.152

Para el caso de la Unidad Térmica la evaluación económica con válvulas de tipo diafragma y considerando solo un (1) filtro tipo prensa durante el periodo de prueba (un año) el VAC final estimado es -\$51.011 dólares anuales, para el caso de las pruebas con válvulas de bola en esta unidad el VAC es -\$17.443 dólares, este último considera además el costo de adaptación del sistema de tuberías a la nueva válvula. Por lo tanto,

se demuestra un ahorro económico al cambiar las válvulas desde el tipo diafragma al tipo bola de \$33.568 dólares.

Por otro lado, la evaluación económica de un año para la segunda etapa de purificación indica un VAC para el caso de la evaluación con válvulas de diafragma de -\$87.217 dólares mientras que para el caso de las válvulas de bola un VAC de -\$50.152 dólares. Por lo tanto, en esta etapa se genera un ahorro al cambiar el componente de trabajo de \$37.065 dólares.

Finalmente se realiza la evaluación económica para un horizonte de 5 años, pero esta vez considerando el cambio de todas las válvulas de diafragma a válvula de bola para todos los filtros de prensa existentes en la Segunda Etapa de Purificación y todos los Intercambiadores de Calor presentes en la Unidad Térmica. Los resultados indican que para el caso de las válvulas de diafragma en un periodo de 5 años el VAC final la Unidad Térmica es de -\$ 255.055 dólares, mientras que para la Segunda Etapa de Purificación es de -\$ 87.217 dólares, Por otro lado, para el caso de las válvulas de bola el VAC de la Unidad térmica es de -\$ 343.208 dólares y la el caso de la Segunda Etapa de Purificación de -\$ 50.152 dólares. Por lo tanto, el ahorro total en este horizonte de evaluación es de \$293.056 dólares.



## 8. CONCLUSIONES

Como conclusión general del análisis, se demuestra la factibilidad técnica del cambio del componente, mediante la comparación del comportamiento estadístico de la confiabilidad de los elementos que componen las diferentes válvulas consideradas para el cambio, y la influencia de los principales agentes presentes propios del proceso de la planta química de litio. También se demuestra la factibilidad económica del cambio de componente, demostrando un ahorro de \$293.056,55 dólares en un horizonte de evaluación de 5 años.

La utilización de componentes con una tolerancia a la corrosión baja se debe posiblemente a que en el momento de proyección y construcción de la planta se consideraron válvulas fabricadas con materiales en ese entonces de bajo precio. En la actualidad es común encontrar en el mercado válvulas fabricadas con componentes de mayor resistencia y con bajo costo, sin embargo, se debe analizar la factibilidad técnica de su uso y los cambios o adaptaciones necesarias.

El análisis técnico económico realizado refleja la factibilidad de implementación del cambio de componentes en la planta química. Aun considerando la modificación del sistema de tuberías para hacer factible la utilización de las nuevas válvulas considerados del tipo bola.

El análisis técnico y económico realizado evidencia la necesidad de realizar estudios acabados en todo el sistema de procesamiento de la planta piloto. Además, se puede considerar a futuro la evaluación económica generada del incremento de la productividad que pueda tener la planta química al presentar tasas de disponibilidad física mayores a las actuales.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Amendola, L. (2003). *Indicadores de confiabilidad propulsores en la gestión del mantenimiento*. Retrieved from [www.klaron.net](http://www.klaron.net)
- Andrea, E., & Sierra, C. (2017). *Técnicas de mantenimiento en instalaciones mineras*. Retrieved from <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=233&section=1>
- Arroyo, J. (2009). *Tipos de valvulas y actuadores*.
- Barreda, S. (2015). *Plan De Mantenimiento Centrado En La Confiabilidad ( R . C . M . ) En La Edar De Nules-Vilavella*. Universitat Jaume.
- Bestratén Belloví, M. (1991). *NTP 328: Análisis de riesgos mediante el árbol de sucesos*. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Retrieved from <http://goo.gl/klie8Y>
- Cerra, M., & Pacheco, L. (2012). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad BasadoeEn Técnicas Predictivas: Vibración, Termografía y Medición de Parametros Eléctricos; para las Máquinas e Instalaciones Eléctricas Presentes en los Activos y Servicios de COTECMAR*. Universidad Tecnológica de Bolivar.
- Clará, O., Domínguez, R., & Pérez, E. (2013). *Sistema De Gestión De Mantenimiento Productivo Total Para Talleres Automotrices Del Sector Público*. Universidad de El Salvador.
- Comisión Chilena del Cobre. (2017). *Mercado Internacional del litio* (No. 286265).
- Díaz, J. (2010). *Técnicas de Mantenimiento Industrial*, 235.
- e-industria.com. (2008). *EL funcionamiento del filtro prensa*. Retrieved from <http://www.eindustria.com/articulos/el-funcionamiento-del-filtro-prensa-23843.htm>
- Flowgasket. (2018). *Importancia de los empaques en un intercambiador de calor a placas*. Retrieved from <http://flowgasket.com/productos/importancia-de-los-empaques-en-un-intercambiador-de-calor-a-placas/>

- García, G. (2006). *Introducción a la teoría de la confiabilidad y su aplicación en el diseño y mantenimiento de equipos industriales de un proceso de renovación.*
- García, J., González, J., & Noriega, S. (2012). Administrative factors related to the success of total productive maintenance. *Contaduría y Administración*, 57(4), 173–196.
- Luna, A. (2005). *Teoría de la confiabilidad.*
- Martinez, I. (2009). *Diseño de un Modelo para aplicar el Mantenimiento Productivo Total a los sectores de bienes y servicios.* Instituto Politécnico Nacional.
- Meruane, V. (n.d.). *Gestión de Activos Físicos.*
- Mesa, D., Ortiz, Y., & Pinzon, M. (2006). La confiabilidad la disponibilidad y la confiabilidad disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et Technica*, (30), 155–160. <https://doi.org/10.22517/23447214.6513>
- Metso. (2013). *Válvula de bola.* Retrieved from <http://www.valvias.com/tipo-valvula-de-bola.php>
- Moubray, J. (1997). *Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).*
- Piqué, T., & Cejalvo, A. (1992). *NTP 333: Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del Árbol de fallos y errores.* Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Retrieved from <http://goo.gl/A0rLbo>
- Saidi. (n.d.). *Válvula de Diafragma.* Retrieved from <http://www.vsec.cl/valvulasdiafragma.htm>
- Sanmartin, J., & Quezada, M. (2014). *Propuesta de un sistema de gestión para el mantenimiento de la empresa cerámica Andina C.A.* Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8944/1/UPS-CT005205.pdf>
- Sapag, N. (2011). *Proyectos de Inversión, Formulación y Evaluación* (Segunda Ed). Pearson Educación.

- SQM de Chile al Mundo. (2017). *Lithium extraction process*. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=\\_aj-JyW98Dw](https://www.youtube.com/watch?v=_aj-JyW98Dw)
- Thermo Fisher Scientific. (2016). Chemical Compatibility Guide. Available in URL: <Http://Sevierlab.Vet.Cornell.Edu/Resources/Chemical-Resistance-Chart-Detail.Pdf>, 1–7. <https://doi.org/10.1042/CS20110259>
- Vacoisa. (2018). Válvulas de Bola Montadas sobre Muñón. Retrieved from <http://www.vacoisa.com/valvulas-macho-2/>
- Vásquez, D. (2008). *Aplicación Del Mantenimiento Centrado En La Confiabilidad Rcm En Motores Detroit 16V-149Ti En Codelgo División Andina*. Universidad Austral de Chile. Retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfciv335a/doc/bmfciv335a.pdf>

# ANEXOS

## 1. PRUEBAS ESTADÍSTICAS

La prueba estadística para los datos se realizó a través del software estadístico Statgraphics centurión XVIII, en su versión de prueba.

### Prueba de bondad de ajuste de Kolmorov-Smirnov

Esta prueba es utilizada para probar la hipótesis de la distribución de una población, de la cual se ha extraído una variable aleatoria. La hipótesis nula para la prueba de bondad de ajuste es que la distribución de la población es una distribución determinada, frente a la alternativa de que los datos no se ajustan a la distribución determinada.

Para esta prueba se considera lo siguiente:

Si se tiene una muestra de variables aleatorias  $X: x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  se define la función de distribución empírica de la muestra:

$$Fe(X_i) = \begin{cases} 0 & , X < x_1 \\ \frac{i-1}{n} & , x_{i-1} \leq x < x_i \\ 1 & , X \geq x_n \end{cases} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

Donde  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  constituyen la muestra ordenada de menor a mayor. El estadístico de prueba para este test de Bondad de Ajuste se basa en la mayor distancia entre la distribución empírica de los datos  $Fe(X)$  y la distribución teórica que suponemos para la población  $F(X)$ , entonces:

$$D = \text{Max } |Fe(x) - F(x)|$$

Pero  $D = \text{Max}(D^+, D^-)$

El valor p es el nivel de significación alcanzado de una prueba. Esta cantidad es un estadístico que representa el mínimo valor de  $\alpha$  para el cual se rechaza la hipótesis nula.

## 2. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

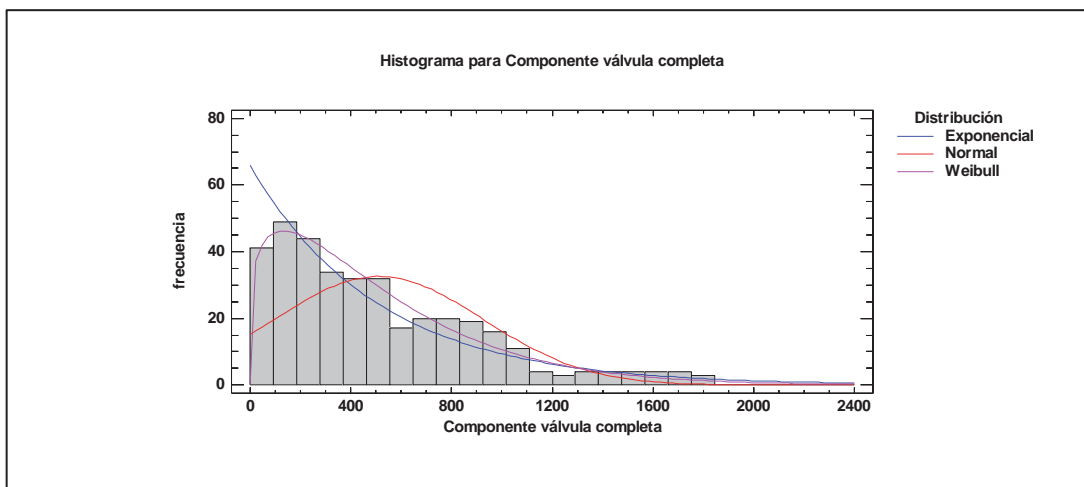
Los resultados se obtuvieron a partir de la determinación de los parámetros característicos asociados a una determinada distribución. Para esto, se realizó un ajuste de distribución sobre una base de datos no censurados de cada válvula dentro del programa estadístico Statgraphics evaluándose la distribución exponencial, normal y Weibull por medio de una prueba de bondad a cada tipo de válvula y sus respectivos componentes, los datos obtenidos son:

### SEGUNDA ETAPA DE PURIFICACIÓN

- Válvulas diafragma
  - Componente "Válvula completa"

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Componente Válvula completa

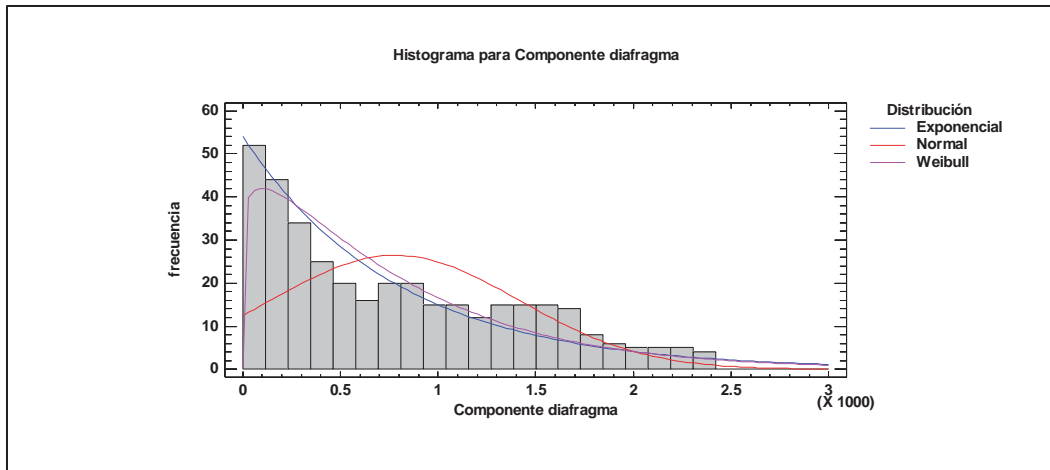
	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0335549	0.103969	0.0353171
DMENOS	0.0674808	0.118298	0.0303255
DN	0.0674808	0.118298	0.0353171
Valor-P	0.0720062	0.000073167	0.752782



- Componente “Diafragma”

**Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Componente diafragma**

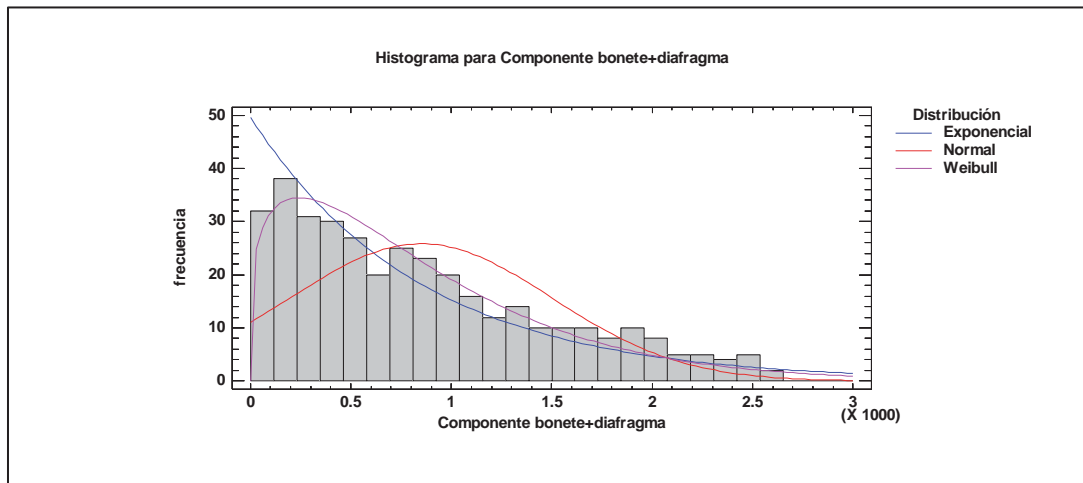
	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0458321	0.122943	0.056875
DMENOS	0.0713292	0.117395	0.0666852
DN	0.0713292	0.122943	0.0666852
Valor-P	<b>0.0487533</b>	<b>0.0000322876</b>	0.0778421



- Componente “Bonete+diafragma”

**Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Componente bonete+diafragma**

	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0485949	0.0956068	0.0376657
DMENOS	0.0738527	0.102489	0.031529
DN	0.0738527	0.102489	0.0376657
Valor-P	<b>0.0373122</b>	<b>0.000935142</b>	0.678404

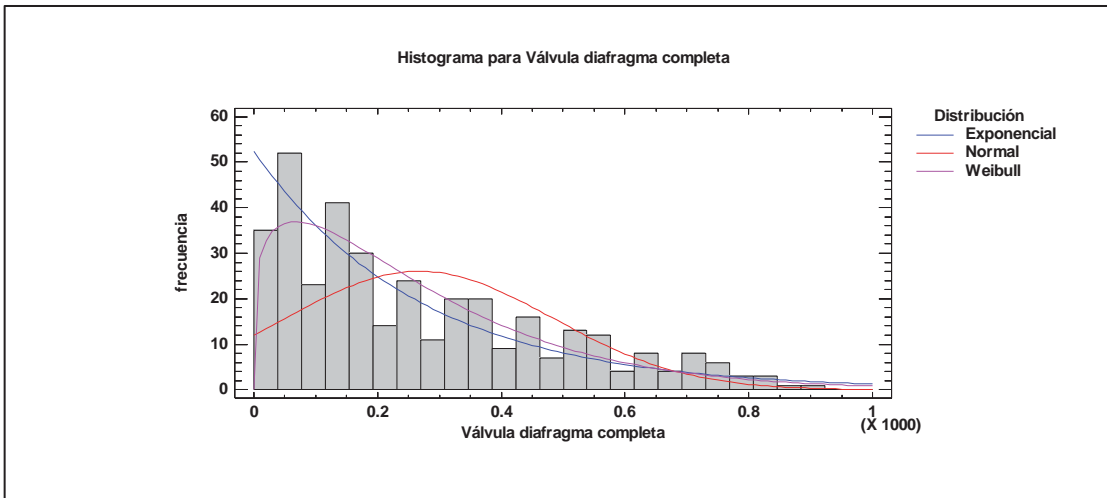




- Válvula diafragma completa

**Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Válvula diafragma completa**

	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.039074	0.132823	0.0665713
DMENOS	0.0858373	0.129132	0.0497457
DN	0.0858373	0.132823	0.0665713
Valor-P	0.00922787	0.00000510436	0.0787093

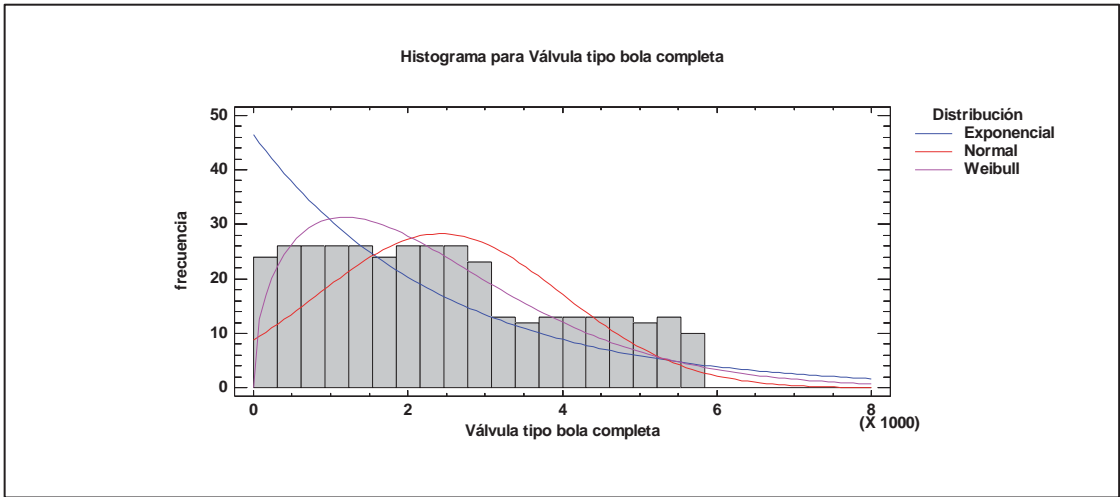


• **Válvula tipo bola**

- Válvula tipo bola completa

**Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Válvula tipo bola completa**

	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0924804	0.0632364	0.0457725
DMENOS	0.125254	0.0652896	0.0414361
DN	0.125254	0.0652896	0.0457725
Valor-P	0.0000212413	0.0890461	0.435517

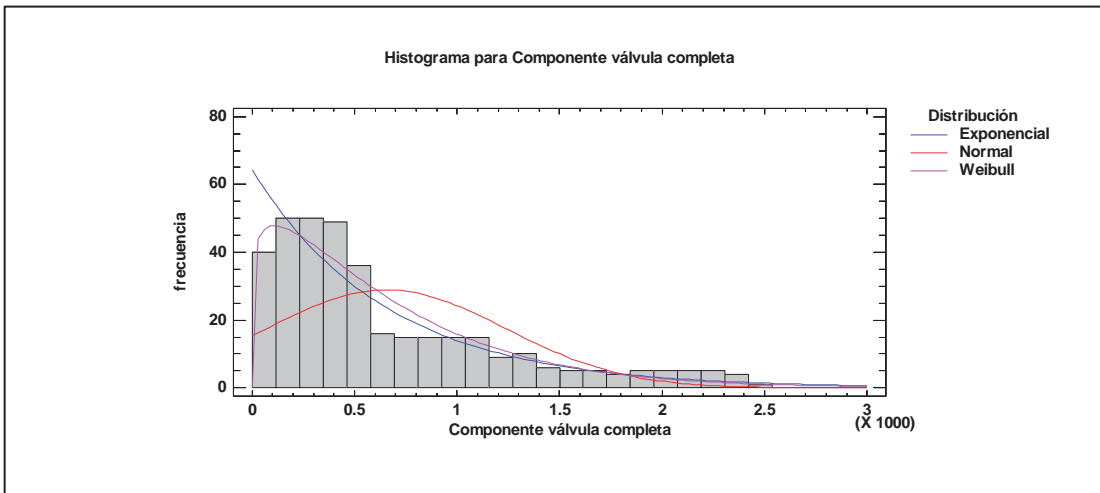


## UNIDAD TÉRMICA

- Válvulas diafragma
- Componente “Válvula completa”

### Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Componente válvula completa

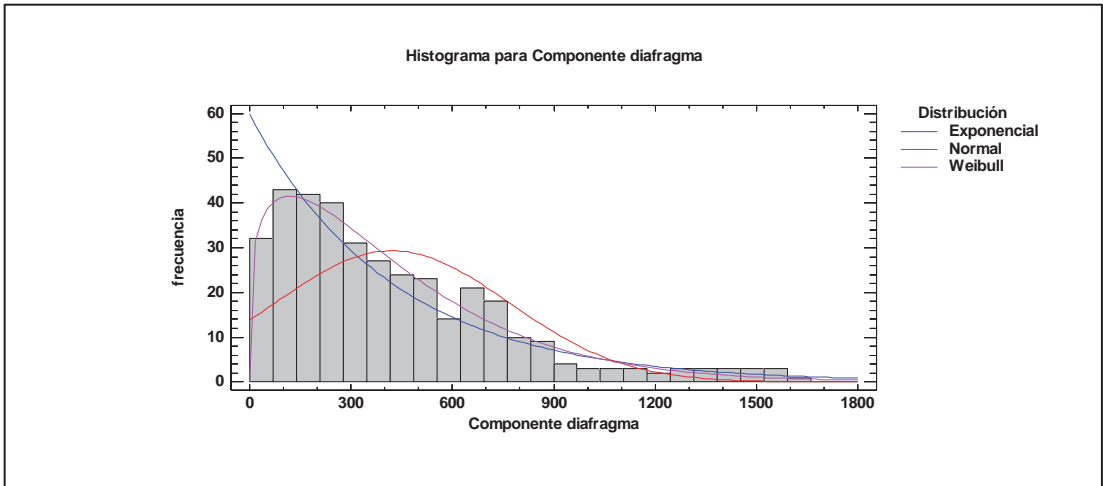
	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0312013	0.170146	0.0600375
DMENOS	0.0624577	0.13909	0.0250206
DN	0.0624577	0.170146	0.0600375
Valor-P	0.115966	0.0	0.143998



- Componente “Diafragma”

### Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Componente diafragma

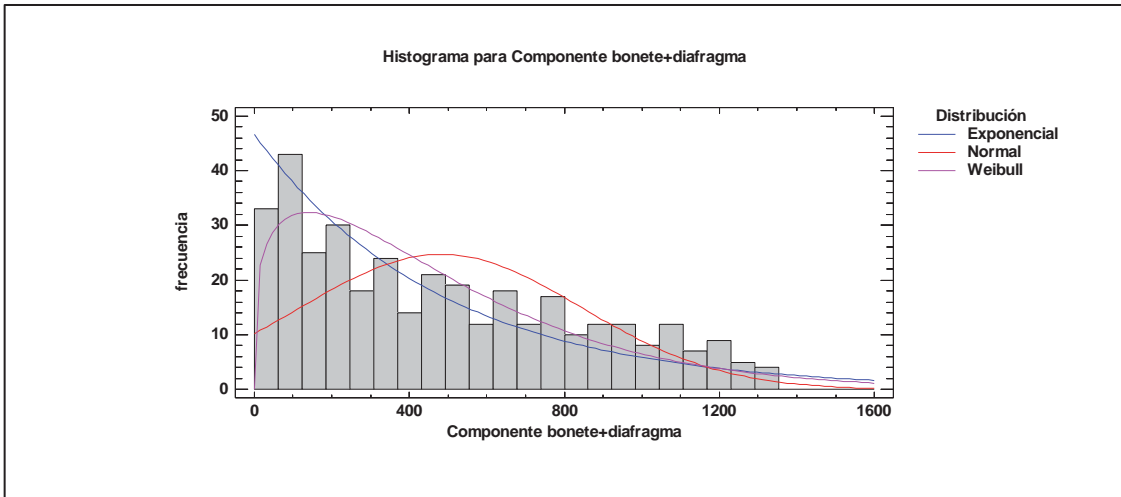
	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.037127	0.116174	0.0310726
DMENOS	0.084444	0.123306	0.0261037
DN	0.084444	0.123306	0.0310726
Valor-P	0.0109729	0.0000302507	0.872588



- Componente “Bonete+diafragma”

**Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Componente bonete+diafragma**

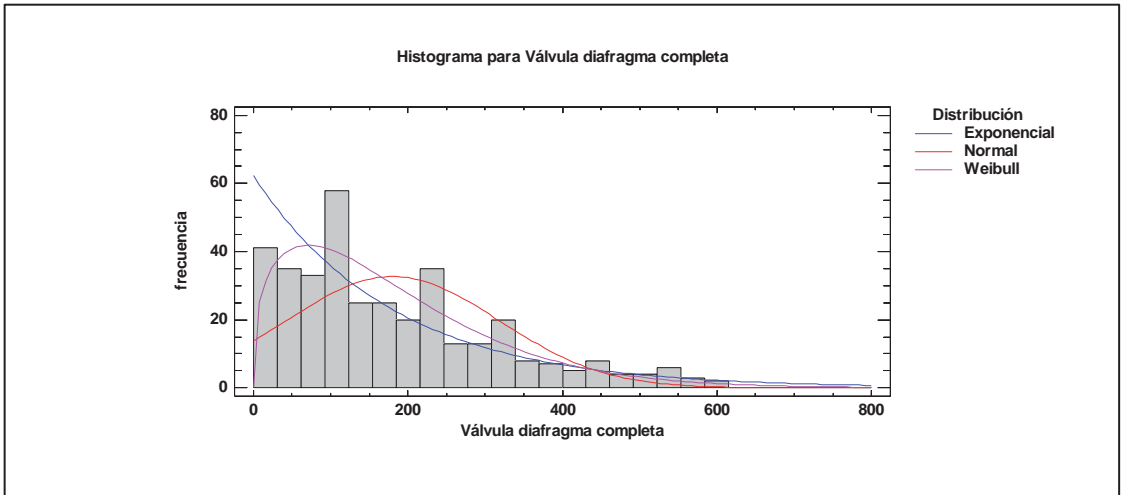
	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0624479	0.111685	0.0592239
DMENOS	0.0802956	0.103483	0.0640985
DN	0.0802956	0.111685	0.0640985
Valor-P	0.018071	0.00022067	0.099651



- Válvula diafragma completa

**Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Válvula diafragma completa**

	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0358697	0.130438	0.0701668
DMENOS	0.124635	0.127109	0.0576776
DN	0.124635	0.130438	0.0701668
Valor-P	0.0000237812	0.00000807191	0.0549731

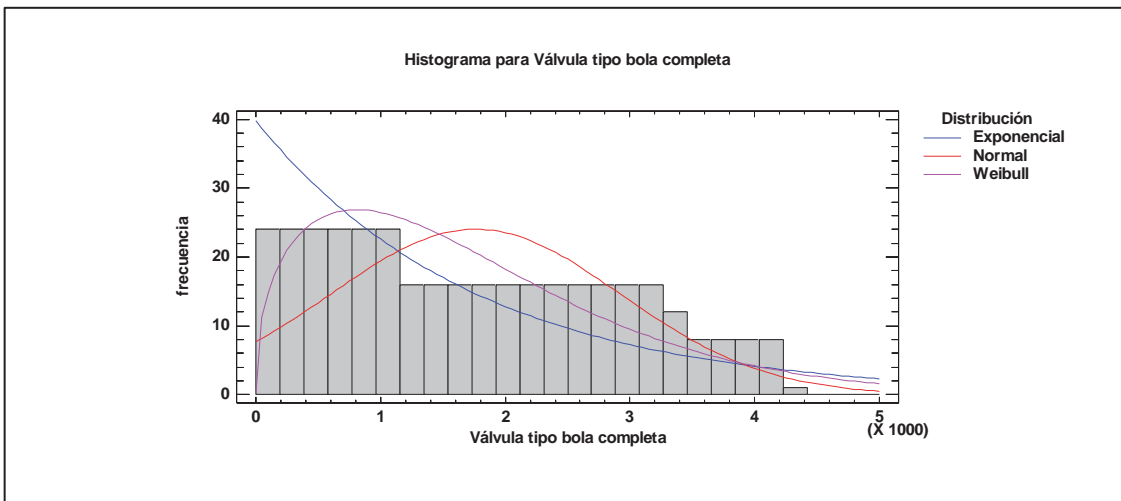


- **Válvula tipo bola**

- Válvula tipo bola completa

**Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Válvula tipo bola completa**

	<i>Exponencial</i>	<i>Normal</i>	<i>Weibull</i>
DMAS	0.0897503	0.0941458	0.0464432
DMENOS	0.105344	0.0680029	0.0732772
DN	0.105344	0.0941458	0.0732772
Valor-P	0.000606445	0.00309751	0.0396917



### 3. ANEXO EVALUACIÓN ECONÓMICA

Evaluación económica horizonte de evaluación de un año para la Unidad Térmica

Unidad Térmica		
Ítem	Unidad	Valor
Tasa de Interés	%	10%
Costo Válvula Diafragma	US\$	931
Costo Diafragma	US\$	122
Costo Bonete + Diafragma	US\$	341
Costo Válvula de Bola	US\$	270
Adaptación Piping	US\$	2.300
Número total de ITC Unidad Térmica		1

Válvulas de Diafragma	0	1	2	3	4	5
Inversión						
Costo Anual Válvula Completa		\$ -6.516	\$ -6.516	\$ -6.516	\$ -6.516	\$ -6.516
Costo Anual Diafragma		\$ -1.826	\$ -1.826	\$ -1.826	\$ -1.826	\$ -1.826
Costo Anual Bonete + Diafragma		\$ -5.115	\$ -5.115	\$ -5.115	\$ -5.115	\$ -5.115
Flujo		\$ -13.457	\$ -13.457	\$ -13.457	\$ -13.457	\$ -13.457
VAC		-\$ 51.011,14				

Válvulas de bola	0	1	2	3	4	5
Adaptación pipan		\$ -2.300				
Costo Anual		\$ -4.050	\$ -4.050	\$ -4.050	\$ -4.050	\$ -4.050
Flujo		\$ -6.350	\$ -4.050	\$ -4.050	\$ -4.050	\$ -4.050
VAC		-\$ 17.443,60				

Dinero Ahorrado	\$33.567,54
-----------------	-------------

## Evaluación económica horizonte de evaluación de un año para la Segunda Etapa de Purificación

<b>Segunda Etapa de Purificación</b>						
<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>				
Tasa de Interés	%	10%				
Costo Válvula Diafragma	US\$	648				
Costo Diafragma	US\$	98				
Costo Bonete + Diafragma	US\$	247				
Costo Válvula de Bola	US\$	270				
Adaptación Piping	US\$	2.300				
<b>Número Total Filtros segunda Etapa Purificación</b>		<b>1</b>				
<b>Válvulas de Diafragma</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Inversión						
Costo Anual Válvula Completa		\$ -9.726	\$ -9.726	\$ -9.726	\$ -9.726	\$ -9.726
Costo Anual Diafragma		\$ -982	\$ -982	\$ -982	\$ -982	\$ -982
Costo Anual Bonete + Diafragma		\$ -2.226	\$ -2.226	\$ -2.226	\$ -2.226	\$ -2.226
Flujo		-12933,94	-12933,94	-12933,94	-12933,94	-12933,94
<b>VAC</b>		<b>-\$ 49.029,81</b>				
<b>Válvulas de bola</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Inversión		\$ 2.300				
Costo Anual		\$ -1.890	\$ -1.890	\$ -1.890	\$ -1.890	\$ -1.890
Flujo		\$ 410	\$ -1.890	\$ -1.890	\$ -1.890	\$ -1.890
<b>VAC</b>		<b>-\$ 5.073,68</b>				
<b>Dinero Ahorrado</b>	<b>\$43.956,13</b>					

## Evaluación económica horizonte de evaluación de cinco años para la Unidad Térmica

Unidad Térmica		
Ítem	Unidad	Valor
Tasa de Interés	%	10%
Costo Válvula Diafragma	US\$	931
Costo Diafragma	US\$	122
Costo Bonete + Diafragma	US\$	341
Costo Válvula de Bola	US\$	270
Adaptación Piping	US\$	2.300
Número total de ITC Unidad Térmica		5

Válvulas de Diafragma	0	1	2	3	4	5
Inversión						
Costo Anual Válvula Completa		\$ -32.579	\$ -32.579	\$ -32.579	\$ -32.579	\$ -32.579
Costo Anual Diafragma		\$ -9.129	\$ -9.129	\$ -9.129	\$ -9.129	\$ -9.129
Costo Anual Bonete+ Diafragma		\$ -25.575	\$ -25.575	\$ -25.575	\$ -25.575	\$ -25.575
Flujo		\$ -67.283	\$ -67.283	\$ -67.283	\$ -67.283	\$ -67.283
VAC		-\$ 255.055,70				

Válvulas de bola	0	1	2	3	4	5
Adaptación pipan		\$ -11.500				
Costo Anual		\$ -20.250	\$ -20.250	\$ -20.250	\$ -20.250	\$ -20.250
Flujo		\$ -31.750	\$ -20.250	\$ -20.250	\$ -20.250	\$ -20.250
VAC		-\$ 87.217,98				

Dinero Ahorrado	\$167.837,72
-----------------	--------------



## Evaluación económica horizonte de evaluación de cinco años para la Segunda Etapa de Purificación

Segunda Etapa de Purificación		
Ítem	Unidad	Valor
Tasa de Interés	%	10%
Costo Válvula Diafragma	US\$	648
Costo Diafragma	US\$	98
Costo Bonete + Diafragma	US\$	247
Costo Válvula de Bola	US\$	270
Adaptación Piping	US\$	0

Número Total Filtros segunda Eta,. Por.	7
---	---

Válvulas de Diafragma	0	1	2	3	4	5
Inversión						
Costo Anual Válvula Completa		\$ -68.082	\$ -68.082	\$ -68.082	\$ -68.082	\$ -68.082
Costo Anual Diafragma		\$ -6.872	\$ -6.872	\$ -6.872	\$ -6.872	\$ -6.872
Costo Anual Bonete+ Diafragma		\$ -15.584	\$ -15.584	\$ -15.584	\$ -15.584	\$ -15.584
Flujo		-90537,58	-90537,58	-90537,58	-90537,58	-90537,58
VAC		-\$ 343.208,66				

Válvulas de bola	0	1	2	3	4	5
Inversión		\$ -				
Costo Anual		\$ -13.230	\$ -13.230	\$ -13.230	\$ -13.230	\$ -13.230
Flujo		\$ -13.230	\$ -13.230	\$ -13.230	\$ -13.230	\$ -13.230
VAC		-\$ 50.152,11				

Dinero Ahorrado	\$293.056,55
-----------------	--------------