

INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL**

PROYECTO DE MEJORAMIENTO

**PROPUESTA DE MEJORA A LA  
OPERATIVIDAD DE LOS  
INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL  
ÁREA FIBRA DE ARAUCO, PLANTA  
CONSTITUCIÓN**

AUTOR:  
FERNANDO SEBASTIÁN ROJAS GAJARDO

PROFESOR TUTOR:  
ALFREDO IRIARTE

CURICÓ - CHILE  
MARZO DE 2019

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Curicó, 2019

## **RESUMEN EJECUTIVO**

El presente proyecto de mejoramiento, surge de la necesidad de analizar una inquietud que existía en el área de fibra de planta Constitución de empresa Arauco, la cual es que presentan un gran número de detenciones del área, las cuales se les atribuyen a deficiencias en los equipos intercambiadores de calor.

El trabajo se inicia con la descripción de la organización, la importancia a nivel comercial de la industria de la celulosa, una descripción del proceso productivo, entre otros aspectos.

Luego se investiga en la literatura los conceptos que fundamentan, este problema, como lo son las ramas de la termodinámica y la transferencia de calor, la definición de un equipo intercambiador de calor y sus mecanismos de deterioro.

A continuación se realiza un diagnostico preliminar para confirmar la incidencia de las detenciones asociadas a los intercambiadores de calor, por medio de un análisis de los avisos de problemas en intercambiadores de calor, en donde se identificó a los peores actores.

Una vez identificados los equipos que presentan un mayor número de problemas, se procedió a identificar a qué tipo de problema corresponden. Ya identificados los problemas, se priorizo la importancia de cada problema y se descubrió la causa raíz de cada uno.

Se analizaron las alternativas disponibles para mitigar los problemas identificados, (Contaminación de condesado, filtración de licor al exterior y bajo rendimiento del intercambiador de calor) se evaluaron las opciones disponibles mediante un análisis multicriterio.

Finalmente se evaluó el costo de implementar las alternativas de mejora y se comparó con los costos que presenta la situación actual, encontrándose en ambas propuestas de mejora un ahorro, además de disminuir la incidencia de los problemas.

**Fernando Sebastián Rojas Gajardo (frojas11@alumnos.utralca.cl)**  
**Estudiante Ingeniería Civil Industrial - Universidad de Talca**  
**Marzo de 2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Gracias a cada uno de quienes me brindaron su incondicional apoyo no los nombro porque se me puede quedar uno el tintero, pero esencialmente a mi familia, profesores, profesor guía y personal de Arauco que me acogió de buena forma.*

*Dedicado a mi familia, especialmente a mi padre quien es el gran gestor de todo lo que soy hoy, y sé que desde el cielo me sigue apoyando en cada instante.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1. Introducción.....	2
<b>1.1. Lugar de aplicación</b> .....	2
<b>1.1.1 Fundación y origen</b> .....	2
<b>1.1.2 Ubicación</b> .....	2
<b>1.1.3 Antecedentes generales de la empresa</b> .....	3
<b>1.2. Importancia de la producción de celulosa en Chile</b> .....	5
<b>1.2.1 Producto Interno Bruto (PIB)</b> .....	5
<b>1.2.2 Exportaciones de Celulosa.</b> .....	5
<b>1.3. Proceso Productivo</b> .....	6
<b>1.2.3 Materia Prima y Preparación Madera.</b> .....	6
<b>1.2.4 Digestores</b> .....	8
<b>1.2.5 Lavado y clasificación.</b> .....	9
<b>1.2.6 Secado</b> .....	9
<b>1.2.7 Planta de Agua.</b> .....	9
<b>1.2.8 Caldera Recuperadora</b> .....	9
<b>1.2.9 Caldera de Poder</b> .....	9
<b>1.2.10 Turbo Generador</b> .....	10
<b>1.2.11 Horno y Caustificación.</b> .....	10
<b>1.4. Problemática</b> .....	10
<b>1.5. Objetivo general</b> .....	12
<b>1.6. Objetivos específicos</b> .....	12
<b>1.7. Resultados tangibles esperados.</b> .....	12
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA.....	13
2. Marco teórico y metodología.....	14
<b>2.1. Primera ley de la termodinámica</b> .....	14
<b>2.2. Segunda ley de la termodinámica</b> .....	14
<b>2.3. Transferencia de calor</b> .....	15
<b>2.3.1 Conducción</b> .....	15
<b>2.3.2 Convección</b> .....	16
<b>2.3.3 Radiación</b> .....	16

2.4.	<b>Definición del Intercambiador de Calor</b> .....	17
2.5.	<b>Clasificación de los intercambiadores de calor</b> .....	17
2.5.1	<b>Clasificación según la trayectoria de los fluidos</b> .....	17
2.5.2	<b>Clasificación según sus características de construcción</b> .....	19
2.6.	<b>Mecanismos de deterioro en intercambiadores de calor</b> .....	21
2.6.1	<b>Ensuciamiento</b> .....	21
2.7.	<b>Diagrama Causa-Efecto.</b> .....	25
2.8.	<b>Diagrama de Pareto</b> .....	26
2.9.	<b>RPN (<i>Risk Priority Number</i>) Número de prioridad de riesgo</b> .....	27
2.10.	<b>Metodología de solución</b> .....	28
2.10.1	<b>Revisión bibliográfica</b> .....	29
2.10.2	<b>Diagnóstico preliminar</b> .....	29
2.10.3	<b>Analizar la información</b> .....	29
2.10.4	<b>Generar propuesta de mejora</b> .....	29
2.10.5	<b>Evaluar el impacto de la propuesta de mejora</b> .....	29
2.11.	<b>Diagrama de Gantt del proyecto</b> .....	29
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA Y DIAGNÓSTICO</b> .....		31
3.	<b>Análisis de la problemática y diagnóstico</b> .....	32
3.1.	<b>Proceso de cocción de la madera</b> .....	32
3.1.1	<b>Carga de astillas a digestores</b> .....	32
3.1.2	<b>Carga de licor negro tibio (120°c)</b> .....	32
3.1.3	<b>Carga de licor caliente</b> .....	33
3.1.4	<b>Calentamiento</b> .....	33
3.1.5	<b>Desplazamiento</b> .....	33
3.1.6	<b>Descarga</b> .....	33
3.1.7	<b>Lavado y clasificación.</b> .....	34
3.2.	<b>Identificación de la problemática</b> .....	34
3.3.	<b>Resultados del diagnóstico</b> .....	36
3.4.	<b>Conclusiones del diagnóstico</b> .....	40
<b>CAPÍTULO 4: IDENTIFICACION DE PROBLEMAS EN INTERCAMBIADORES DE CALOR</b> .....		41
4.	<b>Análisis de Avisos de fallas</b> .....	42
4.1.	<b>Principales problemas que se informan en avisos</b> .....	42
4.2.	<b>Análisis cuantitativo de avisos</b> .....	45
4.3.	<b>Análisis intercambiadores patio de estanques</b> .....	47

4.3.1	<b>Análisis intercambiador 32-E59</b> .....	49
4.3.2	<b>Análisis intercambiador 32-E542</b> .....	50
4.3.3	<b>Análisis intercambiador 32-E64</b> .....	51
4.3.4	<b>Análisis intercambiador 32-E58</b> .....	52
4.3.5	<b>Análisis intercambiador 32-E543</b> .....	53
4.3.6	<b>Resumen intercambiadores de calor de patio de estanques</b> .....	54
4.4.	<b>Análisis intercambiadores de Digestores</b> .....	55
4.4.1	<b>Análisis intercambiador 32-E443</b> .....	56
4.3.1	<b>Análisis intercambiador 32-E233</b> .....	57
4.3.2	<b>Análisis intercambiador 32-E333</b> .....	58
4.3.3	<b>Análisis intercambiador 32-E143</b> .....	59
4.3.4	<b>Análisis intercambiador 32-E243</b> .....	60
4.3.5	<b>Análisis intercambiador 32-E313</b> .....	61
4.3.6	<b>Análisis intercambiador 32-E323</b> .....	62
4.3.7	<b>Resumen intercambiadores de calor de digestores</b> .....	63
4.3.7	<b>Priorización de problemas de intercambiadores de patio de estanques</b> .....	65
4.3.8	<b>Priorización de problemas de intercambiadores de digestores</b> .....	66
<b>CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE MEJORA</b> .....		68
5.	<b>Propuesta de mejora</b> .....	69
5.1.	<b>Principales Problemas identificados en los intercambiadores de calor</b> .....	69
5.1.1	<b>Contaminación de condensado</b> .....	69
5.1.2	<b>Filtración de licor</b> .....	71
5.1.3	<b>Problemas de bajo rendimiento del intercambiador de calor</b> .....	72
5.2.	<b>Propuesta a Problema de contaminación de condensado y filtración de licor al exterior</b> .....	76
5.3.	<b>Propuesta a Problema de bajo rendimiento del intercambiador de calor</b> .....	80
5.3.1	<b>Lavado químico</b> .....	80
5.3.2	<b>Limpieza alta presión 6000 psi</b> .....	81
5.3.3	<b>Limpieza alta presión 15000 psi</b> .....	82
5.3.4	<b>Resumen de características métodos de limpieza</b> .....	82
<b>CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL PROYECTO</b> .....		86
6.1	<b>Costos asociados proyecto cambio de empaquetaduras</b> .....	87
6.2	<b>Costos asociados a método de lavado químico mas limpieza a alta presión 15000psi</b> .....	88
<b>CONCLUSIONES</b> .....		91

Bibliografía.....	92
ANEXOS.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Mapa Arauco, Planta Constitución.....	3
Ilustración 2: Organigrama Arauco, planta Constitución.....	4
Ilustración 3: Transporte de troncos.....	7
Ilustración 4: Pila de astillas.....	8
Ilustración 5: Esquema Proceso Kraft Planta Constitución.....	10
Ilustración 6: Flujos en paralelo.....	18
Ilustración 7: Flujos en contracorriente.....	18
Ilustración 8: Flujo cruzado.....	19
Ilustración 9: Intercambiador de tubos y carcaza.....	20
Ilustración 10: Diagrama de causa y efecto.....	26
Ilustración 11: Diagrama de Pareto.....	27
Ilustración 12: Carta Gantt del proyecto.....	30
Ilustración 13: Representación de Intercambiador de calor de digestores.....	37
Ilustración 14: Diagrama de Ishikawa problemas de intercambio de calor.....	43
Ilustración 15: Esquema Intercambiador de calor.....	70
Ilustración 16: Filtraciones de licor.....	71
Ilustración 17: Intercambiador de calor con tubos obstruidos.....	72
Ilustración 18: Lavado a alta presión 6000psi.....	81
Ilustración 19: Boquillas utilizadas en limpieza a 15000psi.....	82
Ilustración 20: Simulación propuesta de mejora métodos de limpieza.....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Intercambiadores de calor de Digestores.....	36
Tabla 2: Intercambiadores de calor del patio de estanques.....	38
Tabla 3: Avisos por intercambiador desde 2013 a 2018.....	39
Tabla 4: Avisos por prioridad.....	45
Tabla 5: Avisos por prioridad y por intercambiador.....	46
Tabla 6: Avisos Intercambiadores de patio de estanques.....	48
Tabla 7: Avisos Intercambiador 32-E59.....	49
Tabla 8: Avisos Intercambiador 32-E542.....	50
Tabla 9 : Avisos intercambiador 32-E64.....	51
Tabla 10: Avisos Intercambiador 32-E58.....	52
Tabla 11: Avisos Intercambiador 32-E543.....	53
Tabla 12: Resumen de problemas en intercambiadores de patio de estanques.....	54
Tabla 13: Problemas Intercambiador 32-E443.....	56
Tabla 14: Problemas Intercambiador 32-E233.....	57

Tabla 15: Problemas Intercambiador 32-E333 .....	58
Tabla 16: Problemas Intercambiador 32-E143 .....	59
Tabla 17: Problemas Intercambiador 32-E243 .....	60
Tabla 18: Problemas Intercambiador 32-E313 .....	61
Tabla 19: Problemas Intercambiador 32-E323 .....	62
Tabla 20: Resumen de problemas en intercambiadores de Digestores .....	64
Tabla 21: Prioridad de los problemas en Intercambiadores del patio de estanques .....	66
Tabla 22: Prioridad de problemas en Intercambiadores de calor de digestores .....	67
Tabla 23: Contenidos de compuestos inorgánicos en el licor negro .....	73
Tabla 24: Características empaquetaduras intercambiadores de calor .....	77
Tabla 25: Ponderación de criterios empaquetaduras .....	79
Tabla 26: Calificación de alternativas .....	79
Tabla 27: Matriz de factores ponderados para empaquetaduras.....	79
Tabla 28: Métodos de limpieza .....	83
Tabla 29: Ponderación de criterios métodos de limpieza .....	84
Tabla 30: Calificación de alternativas métodos de limpieza .....	84
Tabla 31: Matriz de factores ponderados para métodos de limpieza .....	85
Tabla 32: Costos empaquetadura "Change Gasket" .....	87
Tabla 33: Costos empaquetadura espirometálica .....	87
Tabla 34: Tabla comparativa empaquetaduras .....	88
Tabla 35: Costos lavado químico .....	89
Tabla 36: Situación histórica .....	90

## **ÍNDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 1: Avisos por intercambiador de calor .....	39
Gráfico 2: Prioridad de Avisos .....	46
Gráfico 3: Avisos por intercambiador y por prioridad .....	47
Gráfico 4: Diagrama de Pareto Avisos patio de estanques.....	48
Gráfico 5: Avisos intercambiador 32-E59 .....	49
Gráfico 6: Problemas en intercambiador 32-E542 .....	50
Gráfico 7: Diagrama de Pareto Avisos Intercambiador 32E64 .....	51
Gráfico 8: Problemas en intercambiador 32-E58 .....	52
Gráfico 9: Problemas en intercambiador 32-E543 .....	53
Gráfico 10: Diagrama de Pareto de Intercambiadores de calor de patio de estanques.....	55
Gráfico 11: Diagrama de Pareto para Avisos de intercambiadores de Digestores .....	56
Gráfico 12: Problemas en intercambiador 32-443.....	57
Gráfico 13: Problemas en intercambiador de calor 32_E233.....	58
Gráfico 14: Problemas en Intercambiador de calor 32-E333 .....	59
Gráfico 15: Problemas en Intercambiador 32-E143 .....	60
Gráfico 16: Problemas en Intercambiador 32-E243 .....	61
Gráfico 17: Problemas en Intercambiador 32-E313 .....	62
Gráfico 18: Problemas en Intercambiador 32-E323 .....	63
Gráfico 19: Diagrama de Pareto de Digestores .....	65
Gráfico 20: Flujo intercambiador 32E-543 .....	75

Gráfico 21: Flujo Intercambiador 32E-542 ..... 76

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones técnicas intercambiador 32e-143 ..... 96  
Anexo 2 : Especificaciones técnicas intercambiador 32e-213 ..... 97  
Anexo 3: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-223..... 98  
Anexo 4: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-243..... 99  
Anexo 5: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-313..... 100  
Anexo 6: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-323..... 101  
Anexo 7: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-333..... 102  
Anexo 8: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-343..... 103  
Anexo 9: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-443..... 104  
Anexo 10: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-56..... 105  
Anexo 11: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-57..... 106  
Anexo 12: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-58..... 107  
Anexo 13: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-59..... 108  
Anexo 14: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-64..... 109  
Anexo 15: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-65..... 110  
Anexo 16: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-542..... 111  
Anexo 17: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-543..... 112

## GLOSARIO

**Licor Blanco:** Mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y Sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S) El hidróxido de sodio degrada la lignina y el sulfuro de sodio acelera las reacciones de cocción y decrece la degradación de la celulosa causada por el hidróxido de sodio.

**Licor Negro:** es un residuo generado en el proceso de cocción química de las astillas para la obtención de pulpa kraft. Básicamente está compuesto por Licor Blanco y la lignina y Hemicelulosa que se separan de la celulosa por la cocción y reacción química.

**Lignina:** Sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales, a las cuales da dureza y resistencia.

**Hemicelulosa:** Sustancia gomosa intermediaria en la composición química entre los azúcares y la celulosa, es abundante en las paredes de las plantas.

**Mojabilidad:** tendencia de un fluido a adherirse a una superficie sólida en presencia de otros fluidos inmiscibles, tratando de ocupar la mayor área de contacto posible con dicho sólido.

**Kraft:** Proceso Kraft, también conocido como pulpeo Kraft, es usado en la producción de pulpa de celulosa. Su nombre proviene del alemán y sueco Kraft, que significa "fuerza". Actualmente se usa para el 80 % del papel producido a nivel mundial.

**Digestor Batch:** Cilindro cónico, que funciona en forma presurizada con una solución de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, que sirve para realizar cocción o desintegración de las astillas. Se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que se efectuado la cocción.

**Deslignificación:** Eliminación total o parcial de la lignina de la madera u otra materia vegetal por tratamientos químicos o enzimáticos para la fabricación de pastas de celulosa químicas.

**Flasheo:** Termino utilizado para referirse a un choque térmico.

**ADt:** Air Dry Ton, que corresponde a tonelada 90% seco.

**SAP:** Software ERP de planificación de recursos empresariales desarrollado por la empresa alemana SAP SE

**Flange:** También conocido como Brida, es el elemento que une dos componentes de un sistema de tuberías, permitiendo ser desmontado sin operaciones destructivas, gracias a una circunferencia de agujeros a través de los cuales se montan pernos de unión.

**Unión Enflanchada:** Unión de dos cuerpos pudiendo ser cañerías, instrumentos a cañerías, bombas a cañerías mediante un flange.

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

*En este capítulo se describe la empresa en donde se efectúa el presente proyecto, se menciona el proceso productivo, la problemática que presentan y los objetivos del proyecto.*

# 1. Introducción

En el presente capítulo se presenta el contexto en el cual surge la problemática, una descripción de la empresa y del proceso productivo.

## 1.1. Lugar de aplicación

En este apartado se describe la empresa Celulosa Arauco y Constitución S.A, Planta Constitución.

### 1.1.1 Fundación y origen

En 1969 la corporación de fomento de la producción, CORFO, y la sociedad Francesa “*Creusot Loire Enterprises Ensa*”, funda la Sociedad Celulosa Constitución Ltda., CELCO, con el propósito de construir una planta de Celulosa Kraft de exportación, con una capacidad de producción de 175.000 ton/año.

La construcción se inició en el año 1970, comenzando su operación definitiva en el mes de Septiembre de 1976. En el año 1979, la Corporación de Fomento de la Producción licitó Celulosa Constitución S.A al sector privado, adjudicándosela su actual propietario la Compañía de Petróleos de Chile COPEC. Esta empresa, que había adquirido anteriormente industrias de Celulosa Arauco, ubicada en la VIII región, fusionó ambas formando la sociedad Celulosa Arauco y Constitución S.A.

### 1.1.2 Ubicación

La industria Celulosa Arauco y Constitución S.A. Planta Constitución, se encuentra ubicada en la región del Maule, en la ciudad de Constitución. Su ubicación geográfica es en la ribera sur de la desembocadura del río Maule. La dirección de la empresa es en la Avenida Mac-Iver #505, tal como se puede apreciar en la Ilustración 1.

Ilustración 1: Mapa Arauco, Planta Constitución



Fuente: Google Maps

### 1.1.3 Antecedentes generales de la empresa

Esta organización se fundó bajo la auto denominación de empresa “Familiar”, dada la cercanía entre los trabajadores y sus dueños, ya que ellos forman parte activa de todas las funciones. Sin embargo, en la actualidad se ha buscado profesionalizar la organización y el trabajo, por lo que ha desarrollado una formalización de criterios y objetivos los cuales se indican a continuación.

#### ❖ Misión

Ser una empresa líder en la fabricación de productos forestales sustentables, especialmente en celulosa, productos forestales y derivados de la madera, aportando valor a las necesidades de los clientes, maximizando la rentabilidad a los accionistas y protegiendo el medio ambiente con el uso de avanzadas tecnologías.

#### ❖ Visión

Contribuir a mejorar la vida de las personas, desarrollando productos forestales para los desafíos de un mundo sostenible.

#### ❖ Valores

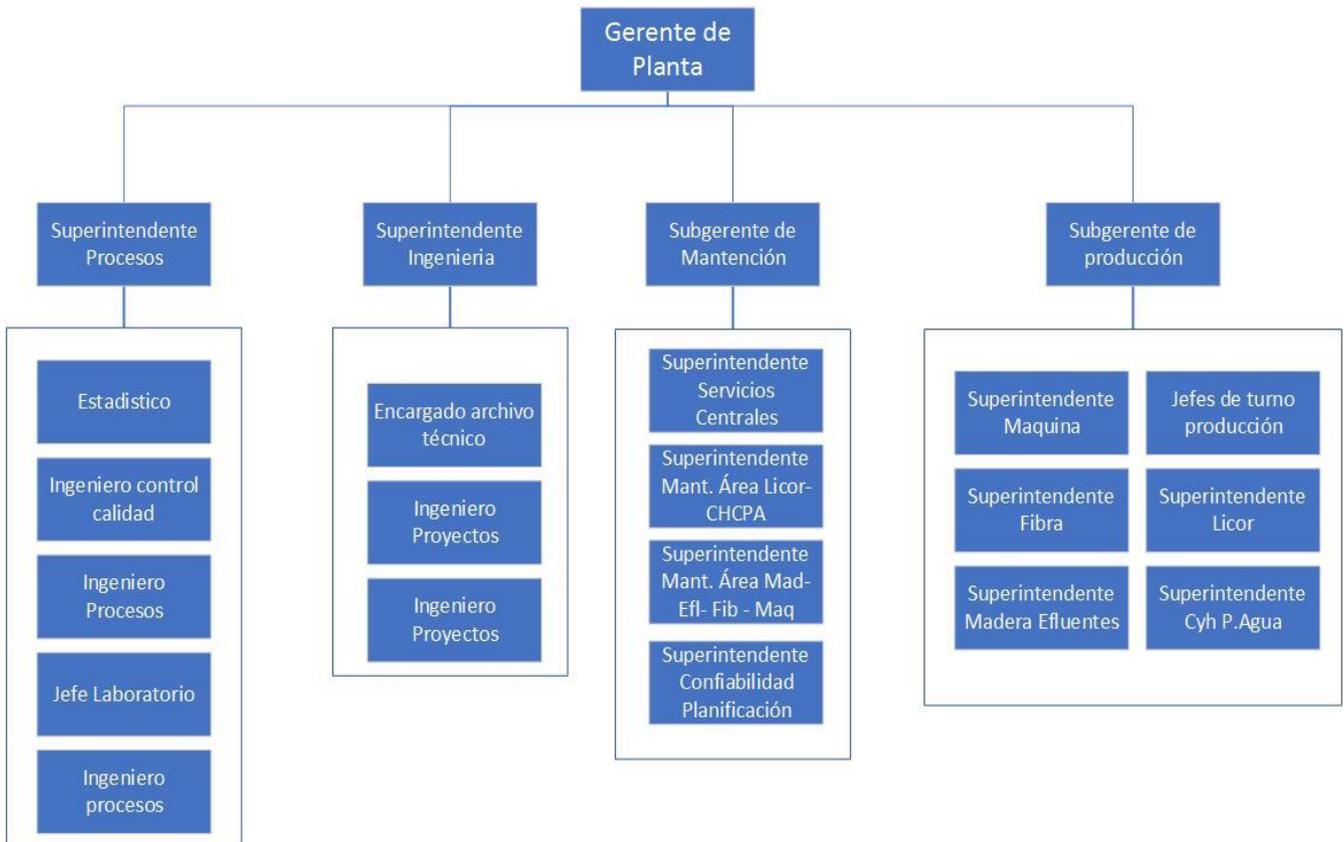
- **Seguridad:** Siempre, lo primero.

- **Compromiso:** Trabajamos con pasión.
- **Excelencia e innovación:** Queremos ser mejores.
- **Trabajo en equipo:** Juntos somos más.
- **Buen ciudadano:** Respetamos el entorno y creamos valor.

### ❖ Estructura organizacional

La estructura organizacional es un concepto enfocado a las relaciones que están presentes dentro de una organización, Celulosa Arauco y Constitución S.A. tiene una estructura organizativa formal de tipo vertical. En la Ilustración 2 se presenta el organigrama de Arauco, planta Constitución.

Ilustración 2: Organigrama Arauco, planta Constitución



Fuente: elaboración propia en base a información entregada por planta Constitución.

El área en donde se desarrollará el proyecto en cuestión corresponde a la Superintendencia de fibra, dependiente de la subgerencia de producción.

## **1.2. Importancia de la producción de celulosa en Chile**

Es importante entender la relevancia que tiene la industria de celulosa en Chile, su influencia en el desarrollo del país y el estado que se encuentra inserta en la actualidad para poder establecer la propuesta de este proyecto.

En Chile, después de la industria del cobre, el sector forestal es el más relevante y en este último destaca la producción de celulosa posicionándose como uno de los mayores sectores productivos del país. Existen ciertos factores relevantes que le dan la importancia actual que tiene la producción de celulosa en el país y que destacan su incidencia en su economía. Entro ellos están:

### **1.2.1 Producto Interno Bruto (PIB)**

La producción chilena de celulosa alcanza aproximadamente un 10,3% del PIB en la Industria Manufacturera, la cual compone un 11,3% del Producto Interno Bruto del país hasta el año 2014. De este modo se observa la incidencia que tiene la producción de celulosa respecto al PIB total.

### **1.2.2 Exportaciones de Celulosa.**

Según reportes de (Map, 2014) , Chile ocupó el cuarto lugar en valor de exportaciones de celulosa en 2013, representado el 6% de un estimado mundial de 45.505 millones de dólares. Respecto al volumen exportado, fuentes de la Federación Sueca de Industrias Forestales entregan una estimación de 48 millones de toneladas transadas en 2013, siendo Chile el cuarto mayor exportador, después de Brasil, Canadá y Estados Unidos.

Estas exportaciones corresponden principalmente a pulpa química y se distribuyen de la siguiente manera según tipo: 10% corresponde a pulpa química sin blanquear; 44% a pulpa blanqueada de pino y 46% corresponde a pulpa blanqueada de eucaliptus.

## 1.3. Proceso Productivo

La fabricación de la celulosa es en sí un proceso químico. Este proceso se denomina KRAFT y necesita variadas materias primas tales como madera, reactivos químicos y vapor. Las etapas principales son las siguientes:

- Transporte de troncos.
- Descortezado, astillado y clasificación de las astillas.
- Cocción.
- Lavado y clasificación.
- Formación de la hoja y secado.
- Embalaje.
- Concentración y combustión del licor negro.
- Regeneración de soda cáustica.
- Generación de energía.
- Producción de agua industrial.
- Producción de agua para calderas.
- Producción de aire comprimido.

Cada etapa del proceso involucra un área de la empresa en sí, las cuales se describen a continuación.

### 1.2.3 Materia Prima y Preparación Madera.

La madera está formada por fibras las cuales contienen cuatro componentes.

- ❖ **Celulosa:** es un polímero homogéneo de glucosa de alto peso molecular, de características cristalinas y muy poco reactivas, la cual se encuentra en la pared de las fibras.

- ❖ **Hemicelulosa:** es un polímero homogéneo de glucosa de alto peso molecular, de estructura no cristalina y más reactiva que la lignina, la cual se encuentra en la pared de las fibras.
- ❖ **Lignina:** es un polímero homogéneo de fenil propano muy poco reactivo, soluble sólo en algunos compuestos energéticos a elevadas temperaturas. Actúa como material cementante para unir las fibras.
- ❖ **Extraíbles:** son diferentes compuestos constituidos por ácidos grasos y resínicos.

El objetivo final del proceso productivo es la obtención de celulosa, proceso que parte en el área de preparación de maderas, donde se realiza las siguientes etapas:

- a) **Transporte de troncos:** se refiere al traslado de troncos desde las canchas de madera hacia las transportadoras que llevan los rollizos de pino insigne a la etapa de descortezado.

**Ilustración 3: Transporte de troncos**



*Fuente [www.jtsa.cl](http://www.jtsa.cl)*

- b) **Descortezado:** este se desarrolla en dos equipos descortezadores, cuyo principio de funcionamiento se basa en un constante giro de los rollizos en su interior, en cual todo el contacto que entre si realizan provoca el desprendimiento de la corteza, la cual es transportada hacia un silo, para su posterior traslado hacia la caldera recuperadora. La corteza es extraída de los trozos de madera puesto que no contiene fibras de celulosa.
- c) **Astillado:** se realiza en dos equipos astilladores los cuales pican los troncos hasta un tamaño estándar de astilla. El objetivo es lograr una mejor penetración de los reactivos de cocción.

- d) Clasificación de astillas:** tal como se dijo se requiere un tamaño estándar ideal para las astillas, y además eliminar los finos que se producen en esta etapa. Esto se desarrolla en dos harneros, los que mediante un constante vibrar van seleccionando las astillas del tamaño requerido y llevando los finos hacia el silo de corteza.
- e) Almacenamiento:** las astillas son llevadas a una pila de almacenamiento, desde la cual mediante un sistema de transporte se trasladan hacia la etapa de cocción. Para realizar el almacenamiento se transporta neumáticamente las astillas hasta la pila para

**Ilustración 4: Pila de astillas**



ser repartidas uniformemente en ellas. Tal como se puede ver en la Ilustración 4.

*Fuente [www.astex.cl](http://www.astex.cl)*

- f) Tratamiento de desechos, (corteza, aserrín o finos y rechazos):** estos son acumulados en el silo de corteza los cuales se acumulan para ser llevados posteriormente a la caldera recuperadora.

#### **1.2.4 Digestores**

Planta constitución en sus instalaciones posee diez (10) digestores *Batch* o discontinuos, en los cuales se produce la pulpa kraft en condiciones de calidad y cantidad especificadas, utilizando para la producción de pulpa pino radiata más reactivos de cocción.

Estos reactivos en el interior de los digestores realizan la reacción de cocción de las astillas de madera provenientes del proceso de preparación madera. Esta reacción de cocción

es, básicamente, la disolución de la lignina bajo la acción del licor Negro; compuesto formado por residuales de cocciones anteriores, hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, a temperaturas y presión de 168°C y 900kPa, respectivamente.

### **1.2.5 Lavado y clasificación.**

La pulpa proveniente de la etapa de cocción es descargada a estanques con una consistencia entre los 4 y 6 %. La principal función, de esta área, es obtener un producto limpio y, además, recuperar los reactivos químicos y compuestos de la madera.

### **1.2.6 Secado**

En una maquina llamada *fourdrinier* se toma una hoja continua de celulosa, que posteriormente es prensada y secada con aire caliente. La hoja seca es cortada en un formato determinado para fardos de 265kg listos para la exportación.

### **1.2.7 Planta de Agua.**

El agua que el proceso de producción utiliza, se extrae del rio Maule 15km. aguas arriba de la desembocadura para evitar contaminación con agua salada. Luego de un desarenado, se bombea hasta la planta industrial para el tratamiento de purificación y posterior distribución al proceso.

### **1.2.8 Caldera Recuperadora**

La fracción orgánica del licor negro se combustiona para generar vapor de agua de alta presión. Las cenizas inorgánicas son recuperadas en el fondo de la caldera y son usadas en Caustificación para la generación de soda caustica. El sulfuro de sodio se produce en la misma caldera por reacción del sulfato de sodio que se adiciona continuamente junto con el licor. La combustión del licor suministra el 80% de la energía eléctrica y vapor que el proceso requiere.

### **1.2.9 Caldera de Poder**

Esta caldera utiliza la corteza y otros desechos combustibles para generar el 20% de la energía restante; haciendo que de esta forma la Planta sea autosuficiente energéticamente.

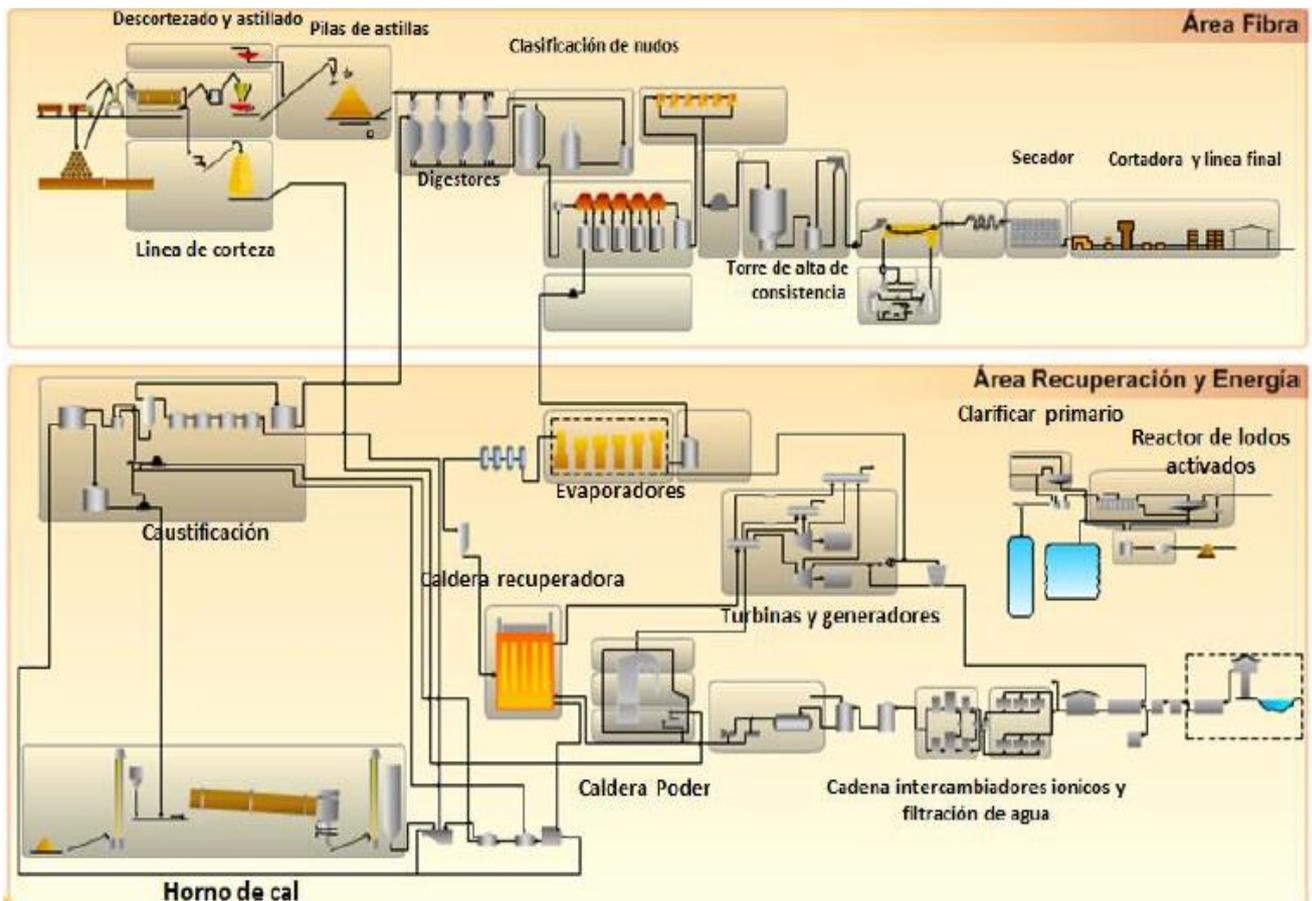
### 1.2.10 Turbo Generador

El vapor de agua de alta presión (60 bar, 450°C) generado en las calderas, alimenta al turbo generador para la producción de la toda la energía eléctrica y vapores de media y baja presión que le proceso requiere.

### 1.2.11 Horno y Caustificación

Esta es una planta anexa al proceso productivo. Las cenizas disueltas de la caldera recuperadora, llamadas licores verdes, son tratadas con oxido de calcio (cal viva), producida en el horno de cal, para generar la soda cáustica. El licor blanco producido es utilizado nuevamente en el proceso de cocción de la madera. Así, sucesivamente estos reactivos siguen un proceso cíclico cerrado, siendo sólo necesario reponer las eventuales pérdidas.

Ilustración 5: Esquema Proceso Kraft Planta Constitución



Fuente: Archivos de Inducción Arauco

En la Ilustración 5 se muestra un esquema del proceso productivo de la celulosa.

## 1.4. Problemática

Como fue mencionado en la descripción del proceso productivo, en la etapa de cocción de la madera, la cual consiste en cargar con astillas el digestor e ir cargando este con licor negro a una temperatura determinada, inicialmente a 70°C, posteriormente a 120°C, hasta finalmente alcanzar los 170°C. El licor negro es calentado indirectamente por vapor mediante el uso de intercambiadores de calor, los cuales son del tipo tubos y carcasa.

Según información entregada por el área de fibra de planta Constitución, se sospecha que la eficiencia de los intercambiadores de calor ha disminuido con el tiempo, además de aumentar el número de mantenciones de estos equipos. Se llega a esta apreciación dado que en el último tiempo han experimentado una serie de problemas, como lo son; un aumento en el tiempo de proceso de cocción, debido a una menor transferencia de calor, un aumento en el consumo de vapor (aumento del consumo energético), fugas por los tubos de intercambiadores, eventos de contaminación, donde se arriesga a infracciones, además de traer como consecuencia la detención de etapas del proceso, inclusive hasta el proceso completo para solucionar estas fallas y principalmente un tiempo considerable de equipos fuera de servicio.

Cabe mencionar que además de los intercambiadores de calor presentes en los digestores en el proceso de cocción, existen intercambiadores de calor presentes en el patio de estanques, los cuales atrapan o ceden calor al licor previo a ser almacenado o entrar a proceso respectivamente. Estos intercambiadores de calor también han presentado los mismos problemas.

En general se conoce que tanto el fluido frío como el fluido caliente aportan un ensuciamiento u obstrucción, generado por la incrustación o deposición de los sólidos que posee el licor en la superficie de los tubos, que se puede producir por cristalización, sedimentación, reacciones químicas, polimerización, crecimiento de materia orgánica como algas y por corrosión; las cuales pueden ocurrir en conjunto o de forma independiente, lo que está provocando que disminuya el funcionamiento de estos equipos de forma progresiva y dificultando en gran medida mantener de forma continua la eficiencia de los equipos, lo que conlleva consigo problemas operacionales asociados a limpieza periódica y tiempo de

suspensión de actividades que podrían terminar en una parada parcial o total del área de fibra , afectando así a las unidades que se relacionan con ésta, lo que implicarían gastos por mantenimiento correctivo y principalmente pérdidas de producción.

Por lo anteriormente descrito se realizará una análisis de la operación de cada intercambiador, con el objetivo de descubrir las causas que están provocando el comportamiento deficiente de estos y en base a dichas problemas se podrá proponer y sugerir una propuesta de mejora que ayude a disminuir las detenciones y tiempos fuera de servicio de estos equipos.

## **1.5. Objetivo general**

Elaborar una propuesta de mejora al sistema de intercambio de calor del área de fibra de Arauco, planta Constitución que permita disminuir el número de detenciones a causa de mantenimiento.

## **1.6. Objetivos específicos**

- Conocer el proceso productivo de la planta Constitución, Arauco S.A, para comprender el contexto en que se presenta la problemática.
- Diagnosticar la situación actual de la operación de los intercambiadores de calor del área de fibra de Arauco, planta Constitución para conocer el impacto de la problemática.
- Desarrollar una propuesta de mejora a la gestión del mantenimiento de los intercambiadores de calor, para disminuir las detenciones no planificadas.
- Evaluar técnica y económicamente la propuesta de mejora para determinar su posible implementación.

## **1.7. Resultados tangibles esperados**

- Un informe del estado actual de los equipos intercambiadores de calor junto a las propuestas de mejora.

# CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

*En el presente capítulo se presenta el modo en el cual se aborda la problemática planteada, mencionando los elementos teóricos y técnicos a utilizar, junto con la metodología de solución.*

## 2. Marco teórico y metodología

En el presente capítulo se presentan los fundamentos teóricos que permiten estudiar la operación y el mantenimiento de los intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa.

### 2.1. Primera ley de la termodinámica

La termodinámica se define como la ciencia de la energía que describe los primeros intentos por transformar el calor en potencia, hoy en día es común utilizar este concepto para abarcar todos los aspectos de la energía y sus transformaciones, incluidas la producción de potencia, la refrigeración y las propiedades de la materia. La primera ley de la termodinámica, también conocida como principio de conservación de la energía, expresa que, en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; sólo puede cambiar las formas. Por lo tanto, toda pequeña cantidad de energía debe tomarse en cuenta en el curso de un proceso. El principio de conservación de la energía (o balance de energía) para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como sigue: El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso. Es decir,

$$\begin{aligned} & (\text{Energía total que entra en el sistema}) - (\text{Energía total que sale del sistema}) \\ & = (\text{Cambio en la energía total del sistema}) \end{aligned}$$

### 2.2. Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica establece cuales procesos de la naturaleza pueden ocurrir o no. De todos los procesos permitidos por la primera ley, solo ciertos tipos de conversión de energía pueden ocurrir. Los siguientes son algunos procesos compatibles con la primera ley de la termodinámica, pero que se cumplen en un orden gobernado por la segunda ley.

- 1) Cuando dos objetos que están a diferente temperatura se ponen en contacto térmico entre sí, el calor fluye del objeto más cálido al más frío, pero nunca del más frío al más cálido.

- 2) La sal se disuelve espontáneamente en el agua, pero la extracción de la sal del agua requiere alguna influencia externa.
- 3) Cuando se deja caer una pelota de goma al piso, rebota hasta detenerse, pero el proceso inverso nunca ocurre.

Todos estos son ejemplos de procesos irreversibles, es decir procesos que ocurren naturalmente en una sola dirección. Ninguno de estos procesos ocurre en el orden temporal opuesto. Si lo hicieran, violarían la segunda ley de la termodinámica. La naturaleza unidireccional de los procesos termodinámicos establece una dirección del tiempo. (Inzunza, s.f.)

La segunda ley de la termodinámica, que se puede enunciar de diferentes formas equivalentes, tiene muchas aplicaciones prácticas. Desde el punto de vista de la ingeniería, tal vez la más importante es en relación con la eficiencia limitada de las máquinas térmicas. Expresada en forma simple, la segunda ley afirma que no es posible construir una máquina capaz de convertir por completo, de manera continua, la energía térmica en otras formas de energía. (Inzunza, s.f.)

## **2.3. Transferencia de calor**

Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía es la transferencia de calor. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación.

### **2.3.1 Conducción**

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas

partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. (Cengel, 2007)

### **2.3.2 Convección**

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia. (Cengel, 2007)

### **2.3.3 Radiación**

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos. (Cengel, 2007).

## 2.4. Definición del Intercambiador de Calor

Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí. En la práctica, los intercambiadores de calor son de uso común en una amplia variedad de aplicaciones, desde los sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento del aire hasta los procesos químicos y la producción de energía en las plantas grandes. Los intercambiadores de calor difieren de las cámaras de mezclado en el sentido de que no permiten que se combinen los dos fluidos que intervienen. (Cengel, 2007).

En un intercambiador la transferencia de calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. En el análisis de los intercambiadores de calor resulta conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total  $U$  que toma en cuenta la contribución de todos estos efectos sobre dicha transferencia. La razón de la transferencia de calor entre los dos fluidos en un lugar dado a un intercambiador depende de la magnitud de la diferencia de temperatura local, la cual varía a lo largo de dicho intercambiador. (Cengel, 2007).

## 2.5. Clasificación de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores se pueden clasificar de varias maneras, pero las más comunes son:

- Según la trayectoria de los fluidos
- Según su aplicación
- Según sus características de construcción.

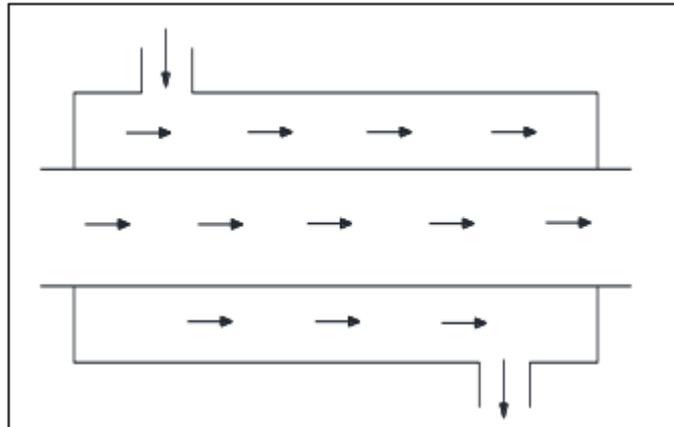
### 2.5.1 Clasificación según la trayectoria de los fluidos

#### a) Flujo paralelo

En este tipo de intercambiadores que se presenta en la Ilustración 6, el flujo caliente y el frío ingresan por el mismo extremo del equipo, fluyen en el mismo sentido a través de este y salen por el otro extremo. La diferencia de temperatura es grande al

principio, pero disminuye al aumentar la distancia. Es importante destacar que la temperatura de salida del fluido frío nunca excederá la del fluido caliente.

**Ilustración 6: Flujos en paralelo**

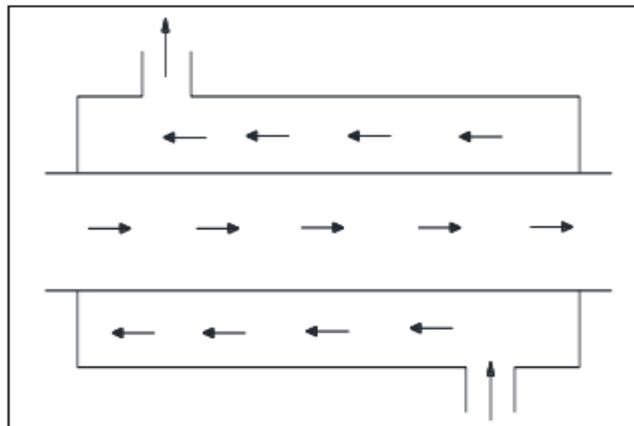


*Fuente: elaboración propia*

**b) Contraflujo**

En este sistema que se puede ver la Ilustración 7 los fluidos, frío y caliente, ingresan por extremos opuestos al intercambiador, fluyen a través de el en sentido contrario. La diferencia de temperatura se en mantiene tanto en las partes más calientes del fluido en un extremo como en las más frías en el otro. En este caso la temperatura de salida del fluido frío puede exceder la del fluido caliente.

**Ilustración 7: Flujos en contracorriente**

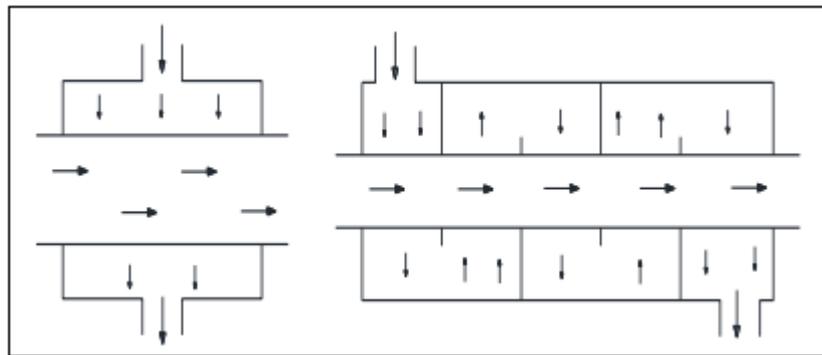


*Fuente: Elaboración propia*

**c) Flujo cruzado**

Existen dos tipos, de un paso que se refiere a que un fluido fluye en forma perpendicular a la trayectoria del otro, y de múltiples pasos en donde el fluido se desplaza transversalmente en forma alternativa con respecto a la otra corriente del fluido. En la Ilustración 8 a la izquierda se puede ver el flujo cruzado de un paso y a la derecha el flujo cruzado de múltiples pasos.

**Ilustración 8: Flujo cruzado**



*Fuente: Elaboración propia*

**2.5.2 Clasificación según sus características de construcción**

**a) Tubular u horquilla**

Están contruidos generalmente por tubos circulares, elípticos, rectangulares. Existe una flexibilidad en el diseño, modificando el diámetro, longitud y posición de los tubos. Este tipo es diseñado para altas temperaturas, es utilizado principalmente en servicios de líquido-líquido, líquidos con cambio de fase (evaporación-condensación).

**b) Placas**

Son máquinas construidas por una estructura y placas metálicas generalmente corrugadas y montadas a presión, con orificios orientados de acuerdo al flujo, formando un área necesaria para la transferencia de calor. Son utilizados en servicios de presiones y temperaturas relativamente bajas.

**c) Tubos espiral**

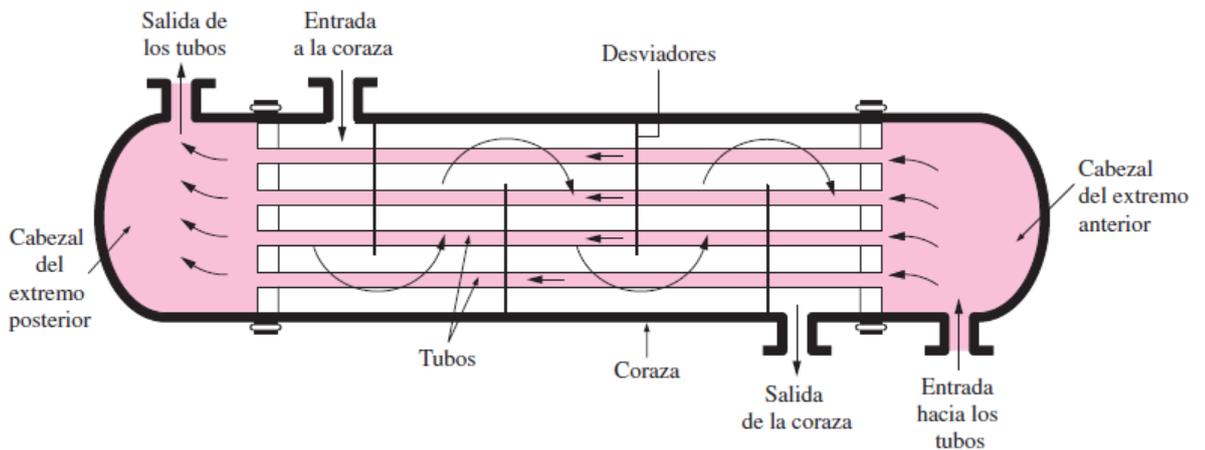
Este intercambiador consiste en varias bobinas o serpentines en forma de espirales colocadas dentro de un depósito, el serpentín debido a su forma de espiral mejora la transferencia de calor a diferencia de uno recto. La desventaja de este equipo es su limpieza de este.

**d) Carcasa-haz tubular**

En este tipo la transferencia de calor se produce a través de dos corrientes fluidas que no se mezclan, separadas por una pared de tubo u otra superficie que esté involucrada en el paso del fluido. Quizá este sea el tipo más común de intercambiador de calor en las aplicaciones industriales. Estos intercambiadores de calor contienen un gran número de tubos (a veces varios cientos) empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, en tanto que el otro se mueve por fuera de éstos, pasando por la coraza. Es común la colocación de desviadores en la coraza para forzar al fluido a moverse en dirección transversal a dicha coraza con el fin de mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espaciamiento uniforme entre los tubos. Este intercambiador facilita su limpieza pudiendo así controlar la corrosión. (Cengel, 2007)

En la Ilustración 9 se puede apreciar un intercambiador de haz tubular y carcasa.

**Ilustración 9: Intercambiador de tubos y carcasa**



Fuente: (Cengel, 2007)

## 2.6. Mecanismos de deterioro en intercambiadores de calor

La operación correcta y sin problemas de un intercambiador, se establece desde el primer momento cuando selecciona o se diseña un intercambiador de calor, para esto se debe anticipar las diferentes fallas que se pueda presentar durante el servicio. Los problemas más comunes en intercambiadores se pueden dividir en tres categorías:

- a) Ensuciamiento (“*Fouling*”)
- b) Corrosión
- c) Fugas

### 2.6.1 Ensuciamiento

El término *fouling* se refiere a la acumulación de residuos y sedimentos sobre la superficie de intercambio de calor durante el funcionamiento de un intercambiador de calor. Esta acumulación de material tiene como consecuencias una reducción de la transferencia de calor, la obstrucción del flujo y un incremento de la caída de presión en el intercambiador (Guomundsson, 2008)

El ensuciamiento es una acumulación de materiales indeseables (depósitos) en las superficies del intercambiador de calor, existen variados tipos de mecanismo de ensuciamiento que serán nombrados a continuación:

#### ❖ **Precipitación / Cristalización:**

Algunas sales comunes en aguas naturales (en su mayor parte sulfato de calcio) ven reducida su solubilidad al aumentar la temperatura del agua. Si el fluido entra en contacto con una pared que está a una temperatura superior a la temperatura de saturación de la sal disuelta, dicha sal cristalizará. La nucleación comenzará, tras un periodo de inducción, en lugares favorables como grietas y fisuras. El proceso de acumulación continuará siempre que la superficie en contacto con el fluido tenga una temperatura por encima de la de saturación. Las incrustaciones resultantes son fuertes y adherentes, por lo que serán necesarios fuertes tratamientos mecánicos o químicos para retirarlas (K.J. Bell, 2001).

### ❖ **Material Particulado o Sedimentación**

Muchos fluidos, entre ellos el agua de refrigeración, contienen partículas en suspensión que se pueden depositar en la superficie de transferencia de calor. Este tipo de depósito no es especialmente adherente, y es autolimitante: al aumentar su grosor, tiende a desprenderse (debido a la reducción del área de paso efectiva y el consiguiente aumento de presión de la corriente fluida). De este modo, el grosor del depósito, con el tiempo, tiende a un valor asintótico (K.J. Bell, 2001).

El ensuciamiento por sedimentación depende en gran medida de la velocidad del fluido y, en menor medida, de la temperatura de la pared. Sin embargo, las altas temperaturas pueden provocar un aumento de la adhesión del fluido a la pared, dificultando su eliminación (IBRAHIM, 2012)

La adhesión también depende de las propiedades superficiales del material de depósito y de la rugosidad y la mojabilidad de la superficie donde se va a dar el ensuciamiento. Aunque las superficies lisas pueden retrasar el ensuciamiento, su rugosidad aumenta al depositarse partículas en ellas, por lo que habrá que tener en cuenta esta rugosidad. Por otro lado, la deposición de partículas muy finas en superficies inicialmente rugosas puede tender a rellenar los huecos, suavizándolas (IBRAHIM, 2012).

### ❖ **Reacción Química**

Otra fuente común de *fouling* en el lado del fluido de proceso son las reacciones químicas, que pueden dar lugar a una fase sólida en la superficie de transmisión de calor, o cerca de ella. Algunos ejemplos son la formación de depósitos de carbono (denominados *coque*) debido a la degradación térmica de algún componente de la corriente de proceso, o la formación de una capa dura de plástico de bajo grado o goma sintética debido a un proceso de polimerización. En general, estos depósitos son muy tenaces, y pueden requerir medidas tan extremas como el quemado del *fouling* para devolver el intercambiador a un estado de operación satisfactorio (K.J. Bell, 2001)

### ❖ **Biológico**

Algunas corrientes de proceso y aguas de refrigeración contienen organismos, que van desde algas y limos microbianos hasta crustáceos y moluscos. La resistencia térmica asociada a estos organismos puede ser considerable, incluso para capas de depósito muy finas. Cuando los organismos presentes tienen forma macroscópica, el principal problema ya no es la reducción de la transferencia de calor, sino la obstrucción de los conductos. Las soluciones más comunes para este tipo de *fouling* son: eliminar los organismos por cloración, ya sea continua o cloraciones intermitentes, o impedir el asentamiento de los organismos en la superficie de transferencia de calor seleccionando aleaciones con alto contenido en cobre para los tubos (por ejemplo, C70600) (K.J. Bell, 2001).

### ❖ **Corrosión**

Las impurezas presentes en el fluido, como el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y el cloruro de hidrógeno, pueden contribuir en gran medida al proceso de corrosión (IBRAHIM, 2012).

La corrosión puede destruir zonas de la superficie de los intercambiadores de calor. Sin embargo, los productos de corrosión pueden ser esenciales para proteger el metal restante de más corrosión. En este caso, cualquier intento de limpiar la superficie sólo provocará una corrosión acelerada y el fallo del intercambiador (K.J. Bell, 2001).

### ❖ **Congelación**

El *fouling* por congelación se produce como resultado de un subenfriamiento en la superficie de transferencia de calor, dando lugar a la solidificación de algunos componentes del fluido (Guomundsson, 2008).

El ensuciamiento es una acumulación de materiales indeseables (depósitos) en las superficies del intercambiador de calor. El material indeseable puede ser de tipo cristales, sedimentos, polímeros, sales inorgánicas, productos de coque, de tipo biológico, productos de corrosión, etc.

Las condiciones que influyen el ensuciamiento son principalmente:

**a) Parámetros de operación**

- Velocidad.
- Temperatura de superficie.
- Temperatura del fluido

**b) Parámetros del Intercambiador de calor**

- Configuración del intercambiador.
- Material de la superficie.
- Estructura de la superficie.

**c) Propiedades del Fluido**

- Sólidos Suspendidos
- Sólidos Disueltos
- Gases Disueltos
- Trazos de otros elementos

El ensuciamiento acarrea los siguientes problemas:

- Incremento de los costos de mantenimiento
- Equipo sobre dimensionado y/o redundante
- Materiales especiales y/o consideraciones de diseño
- Costo adicional de los químicos de limpieza de equipos
- Disposición de soluciones de limpieza peligrosas
- Reducción de la vida útil e incremento de los costos de energía
- Incremento de los costos de regulación ambiental
- Pérdida de capacidad de planta y/o de eficiencia de las opciones de recuperación de desperdicio de calor

## 2.7. Diagrama Causa-Efecto.

El Diagrama Causa-Efecto es una forma de organizar y representar las diferentes teorías propuestas sobre las causas de un problema. Se conoce también como diagrama de Ishikawa (por su creador, el Dr. Kaoru Ishikawa, 1943) o diagrama de Espina de Pescado y se utiliza en las fases de Diagnóstico y Solución de la causa.

Cuando se realiza el análisis de un problema de cualquier índole, estos siempre tienen diversas causas de distinta importancia, trascendencia o proporción. Algunas causas pueden tener relación con la presentación u origen del problema y otras, con los efectos que este produce.

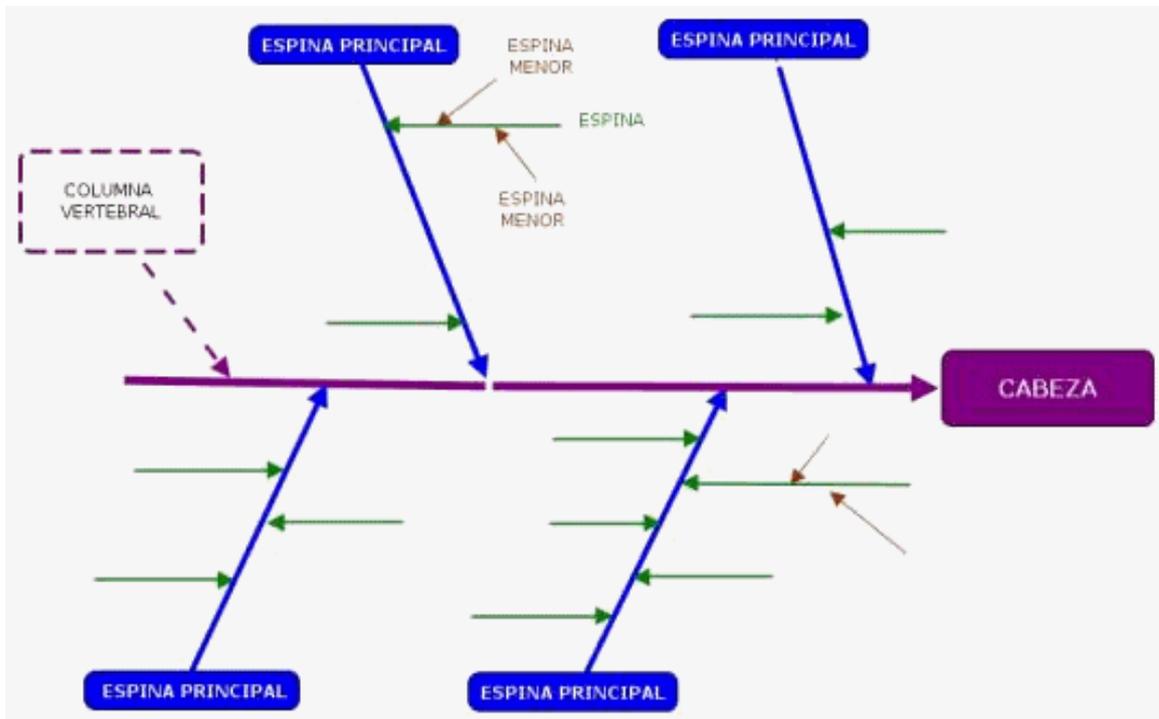
Además, son idóneos para motivar el análisis y la discusión grupal, de manera que cada equipo de trabajo pueda ampliar su comprensión del problema, visualizar las razones, motivos o factores principales y secundarios, identificar posibles soluciones, tomar decisiones y, organizar planes de acción. (Cortez, 2014)

El Diagrama Causa-Efecto es llamado usualmente Diagrama de "Ishikawa" porque fue creado por Kaoru Ishikawa, experto en dirección de empresas interesado en mejorar el control de la calidad; también es llamado "Diagrama Espina de Pescado" porque su forma es similar al esqueleto de un pez. (Cortez, 2014)

Está compuesto por un recuadro (cabeza), una línea principal (columna vertebral), y 4 o más líneas que apuntan a la línea principal formando un ángulo aproximado de 70° (espinas principales). Estas últimas poseen a su vez dos o tres líneas inclinadas (espinas), y así sucesivamente (espinas menores), según sea necesario. (Cortez, 2014)

En la Ilustración 10 se puede apreciar un ejemplo de un diagrama causa efecto.

Ilustración 10: Diagrama de causa y efecto



Fuente: (Cortez, 2014)

## 2.8. Diagrama de Pareto

El diagrama Pareto es una gráfica tipo barra, y cada barra representa una categoría. Las barras son alineadas en orden descendente de izquierda a derecha. La barra a la izquierda representa la categoría con el valor mayor y la barra en la derecha representa la categoría con el valor menor. La barra más alta siempre se encuentra en la izquierda y la más pequeña a la derecha, tal como se puede apreciar en la Ilustración 11. (Hartman, 2001).

Diagramas Pareto están basados en el principio de separar los pocos vitales de los muchos triviales. Este principio Pareto fue creado por Joseph Juran basado en el trabajo del economista Italiano Vilfredo Pareto (1848-1923). Pareto determinó que el 85% de la riqueza en Milán pertenecía al 15% de los ciudadanos. Similarmente, Juran observó que la mayoría de los efectos organizacionales resultan de solo unas pocas causas (Hartman, 2001).

Hoy en día, el principio Pareto implica que el 80% de los problemas de proceso pueden ser responsables por el 20% de los factores de proceso. La premisa detrás del diagrama Pareto indica que los esfuerzos de mejorar el proceso serán más eficientes si las categorías en la izquierda (los pocos vitales) son resueltos primero. El orden alineado de las categorías simplifica la detección de los pocos vitales (Hartman, 2001).

Ilustración 11: Diagrama de Pareto



Fuente: (Tapia, 2016)

## 2.9. RPN (*Risk Priority Number*) Número de prioridad de riesgo

La evaluación de criticidad es un intento para priorizar las fallas encontradas en un análisis del sistema basado en sus efectos y la verosimilitud de ocurrencia. Existen varios métodos para realizar una Evaluación de Criticidad, siendo el método RPN uno de los más comunes (Bowles & Bonnell, 1998)

El número de prioridad del riesgo (RPN) es un producto matemático de la seriedad de los efectos (severidad), de la probabilidad de que una causa creará el incidente asociado a esos efectos (ocurrencia), y de una capacidad de detectar el incidente antes de que llegue al cliente (detección) (HENAO, 2005, 108)

El método RPN es usado frecuentemente por la industria automotriz, utiliza términos gramaticales para el ranking de las probabilidades de ocurrencia de falla, la intensidad de los efectos de falla y la evaluación de detección de fallas. (Bowles & Bonnell, 1998)

Éste número es utilizado para indicar las partes en el sistema que necesitan mejoras. “Dependiendo de las políticas de ejecución o de resultados esperados se pueden utilizar diferentes criterios para determinar acciones para reducir el valor del RPN”. El modelo FMECA tradicional utiliza el RPN para determinar el riesgo asociado a cada modo de falla. (Amavi, 2010).

Para cada modo de falla, la severidad (S), la probabilidad de ocurrencia (O) y la dificultad de detección (D) se valorizan en una escala de 1 a 10, el producto de estos números es llamado “Numero de Prioridad de Riesgo (RPN)”. (Amavi, 2010)

El valor del RPN se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$RPN = S \times O \times D$$

Dónde:

*S* = Severidad (que tan severo se califica el problema en una escala de 1 a 10, donde 1 es sin importancia y 10 muy severo)

*O* = Ocurrencia (que tan frecuente ocurre el problema en una escala de 1 a 10, donde 1 es muy poca ocurrencia y 10 el más recurrente)

*D* = Detección (con que dificultad se detecta el problema, donde 1 corresponde a que se detecta fácilmente y 10 que es muy difícil de detectarlo)

## **2.10. Metodología de solución**

Para una adecuada ejecución del proyecto, resulta fundamental establecer una metodología de solución, es decir determinar las actividades a seguir, dependiendo de los objetivos propuestos y en base al marco teórico anteriormente expuesto.

A continuación, se plantea la secuencia de etapas y actividades que rigen el desarrollo del presente trabajo.

### **2.10.1 Revisión bibliográfica**

Revisión bibliográfica de las posibles causas y problemas que presentan los equipos intercambiadores de calor. Se realizará una búsqueda de problemas similares con tal de identificar aspectos comunes y extraer información relevante de las variables claves, a través de *papers*, tesis, memorias, publicaciones, libros, esta búsqueda será llevada a cabo en paralelo al diagnóstico.

### **2.10.2 Diagnóstico preliminar**

Interiorizarse en la problemática, mediante reuniones con los encargados del área, ya sean Superintendente de fibra, Ingeniero de operaciones, operador, y equipo de mantenimiento y definir los objetivos del proyecto.

### **2.10.3 Analizar la información**

Levantar información histórica y analizarla en busca de identificar los equipos que presentan mayor número de fallas, identificar a qué tipo de problema pertenecen, priorizar las fallas según método NPR y descifrar el origen de estos problemas asociados a los intercambiadores de calor.

### **2.10.4 Generar propuesta de mejora**

Una vez que se ha identificado los problemas que afectan a la empresa se pasa a la siguiente fase, que corresponde a identificar y plantear propuestas de mejoras mediante la búsqueda de nuevas alternativas de mantenimiento o una modificación al programa existente permitiendo reducir los tiempos fuera de servicio.

### **2.10.5 Evaluar el impacto de la propuesta de mejora**

Evaluar los costos y beneficios en que se incurre en la implementación de las propuestas de mejora.

## **2.11. Diagrama de Gantt del proyecto**

En la Ilustración 12 se presenta la planificación de las actividades descritas en la metodología.

**Ilustración 12: Carta Gantt del proyecto**

Num	Tarea	Inicio	Final	septiembre-18	octubre-18	noviembre-18	diciembre-18
1	Diagnóstico preliminar	24-9-18	17-10-18	■			
2	Revisión Bibliográfica	24-9-18	17-10-18	■			
3	Levantamiento de información técnica	8-10-18	17-10-18		■		
4	Levantamiento de información histórica	18-10-18	24-10-18		■		
5	Análisis de información	25-10-18	23-11-18			■	
6	Generación de propuestas de mejora	24-11-18	11-12-18				■
7	Evaluación de impacto de las propuestas	12-12-18	26-12-18				■

*Fuente elaboración propia*

# **CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA Y DIAGNÓSTICO**

*En el presente capítulo se describe en detalle la problemática y se realiza un diagnóstico preliminar de la situación que motiva este proyecto*

## 3. Análisis de la problemática y diagnóstico

Dadas las características de este proyecto, el cual el objetivo principal es realizar un análisis de la operación de los equipos intercambiadores de calor y generar una propuesta de mejora, el presente capítulo se centra en presentar un diagnóstico de la situación que justifica este proyecto.

La problemática por estudiar se presenta en el área de fibra, área que se encarga del proceso de cocción de la madera. Para una buena comprensión del problema es necesario conocer el proceso en el cual se desarrolla, por lo cual a continuación se describe con detalle el proceso de cocción de la madera.

### 3.1. Proceso de cocción de la madera

El proceso de cocción de madera se desarrolla a partir del sistema RDH (“*Rapid Displacement Heat*”) que se realiza en el equipo denominado digestor que corresponde a un estanque presurizado. La operación de proceso RDH considera las siguientes etapas:

#### 3.1.1 Carga de astillas a digestores

Esta operación se realiza mediante el transporte de astilla desde la pila de acumulación hasta los digestores. Durante la carga de astillas una cierta cantidad de licor negro frío (70°C), se introduce por el fondo del digestor, el aumento de temperatura del licor negro es gradual para evitar el *flasheo* del digestor durante la carga de licor negro tibio.

#### 3.1.2 Carga de licor negro tibio (120°C)

Licor negro tibio es bombeando en la base del digestor, el licor negro frío es desplazado y el licor rebalsado es enviado al estanque de licor negro frío. El calor y el sulfuro del licor son transferidos a la madera, aumentando este último la selectividad de la deslignificación posterior. Cuando una cierta cantidad de licor ha sido alimentada, se cierra la válvula de descarga y el digestor es presurizado hidráulicamente hasta una presión 6,5bar. Esto permite mejorar la difusión del licor en la astilla y evitar el *flasheo* durante la carga del licor negro caliente.

### 3.1.3 Carga de licor caliente

Se alimenta licor negro caliente a 145°C en la base del digestor, desplazando el licor tibio a su respectivo estanque. Cuando una cierta cantidad de licor ha sido desplazado, se alimenta el licor negro y blanco caliente (170 y 165°C respectivamente) requerido por la cocción. El licor desplazado se alimenta al estanque de licor tibio y luego al de licor negro caliente, de acuerdo con su nivel de temperatura. Al final de esta etapa el digestor se encuentra cargado con los licores de cocción a una temperatura aproximada de 160°C.

Cabe mencionar que en cada etapa de carga de licor este es previamente calentado a la temperatura deseada mediante un intercambiador de calor de haz tubular y carcasa, por el cual circula vapor por la carcasa y licor negro por los tubos.

### 3.1.4 Calentamiento

El licor es puesto a recircular por los intercambiadores de calor existentes por medio de una bomba de recirculación y, es calentado hasta la temperatura de cocción deseada de 170°C. Luego se deja reposar en el digestor.

### 3.1.5 Desplazamiento

Una vez terminada la cocción el digestor es desplazado con licor filtrado desde lavado, con el objetivo de disminuir su temperatura, el licor desplazado es alimentados a los estanques de licor negro caliente y tibio, este licor previo a ser depositado en el estanque pasa por un intercambiador de calor esto con el objetivo de evitar *flasheo* en el estanque, además de recuperar calor del licor negro caliente.

### 3.1.6 Descarga

El digestor desplazado es descargado por el fondo con una bomba, agregándose dilución (licor de desplazamiento) en el cono inferior de este y en la línea de descarga, hasta alcanzar una consistencia de un 5 %.

La pulpa es alimentada a los estanques de soplado existentes, los cuales con la cocción RDH pasan a cumplir solamente la función de estanque acumuladores de pasta. Luego, la pulpa es bombeada a baja consistencia al área de lavado.

### 3.1.7 Lavado y clasificación.

La mezcla de fibras, productos químicos residuales, material orgánico disuelto y algunas impurezas, es lavada clasificada y almacenada. El proceso de lavado se realiza en los llamados filtros lavadores. El líquido residual, llamado licor negro, es almacenado para posteriormente ser concentrado y usado como combustible.

## 3.2. Identificación de la problemática

De la descripción del proceso se puede desprender, la gran importancia de la temperatura del licor en cada etapa del proceso, para obtener la temperatura deseada del licor, este es calentado mediante calentamiento indirecto a través del uso de intercambiadores de calor, los cuales son del tipo tubo y carcasa.

Los intercambiadores de calor se pueden diferenciar en dos grupos, los intercambiadores de calor del patio de estanques y los intercambiadores de calor de los digestores, esto en función del trabajo que realizan en el proceso. En el patio de estanques existen intercambiadores que tienen la función de calentar el licor proveniente de un estanque antes de entrar al proceso de cocción, así como también existen intercambiadores de calor que una vez terminado el proceso de cocción enfrían el licor antes de ser depositado en los estanques, esto con el objetivo de recuperar calor y evitar *flasheo* en los estanques.

En el área de digestores se encuentra un intercambiador de calor adosado a cada digestor, los cuales tienen la función de calentar el licor proveniente del patio de estanques previo a ser depositado en el digestor, una vez que el digestor está cargado este es puesto a recircular por el intercambiador de calor para ir aumentando gradualmente su temperatura.

En el último tiempo se han evidenciado una serie de deficiencias asociadas a los intercambiadores de calor, las cuales se resumen a:

- Mayor tiempo de proceso de cocción, puesto que el intercambiador de calor no es eficiente se debe hacer recircular por este el licor un mayor número de veces hasta alcanzar la temperatura deseada.
- Gran número de detenciones por mantenimiento a los intercambiadores de calor.

- Intercambiadores de calor gran tiempo fuera de servicio. (producto que, al momento de realizar una mantención, se descubren nuevos problemas en el equipo).
- Emergencias de contaminación.

En el patio de estanques los intercambiadores de calor están puestos en una configuración en paralelo, es decir se tiene dos intercambiadores de calor por estanque, sin embargo es uno el que se encuentra en servicio, mientras que el otro se encuentra fuera de servicio hasta que sea necesario realizar una mantención al que se encuentra operativo y es allí donde se realiza el cambio. Esta disposición en paralelo es con el objetivo de aumentar la confiabilidad del proceso de precalentamiento, puesto que una detención en esta etapa significa detener todo el proceso posterior.

Mientras que en el área de digestores, a cada digestor se encuentra adosado un intercambiador de calor, lo que significa que cada vez que se deba intervenir el intercambiador de calor queda fuera de servicio un digestor, lo cual tiene un alto impacto para la empresa en lo que respecta a producción.

Para medir el impacto que genera dejar fuera de servicio un digestor se tiene la siguiente información. Un digestor produce en promedio 15ADt por cocción y una cocción dura aproximadamente 3,5 horas, lo que se traduce en:

$$15 \frac{ADt}{Cocción} * \frac{1}{3,5} \frac{cocción}{horas} = 4,29 \frac{ADt}{hora}$$

Es decir por cada hora que se encuentra fuera de servicio un digestor se deja de producir aproximadamente 4,29ADt.

Según información entregada por el equipo de mantenimiento lo mínimo que dura una detención a un intercambiador de calor son 8 horas, puesto que se aprovecha de realizar más de una mantención, las cuales no es posible realizar mientras esta en operación. Además según (LIGNUM, 2018) el precio promedio de celulosa es de US\$600 por ADt. Lo que significa que por cada detención de un digestor asociada a una intervención a un intercambiador de calor lo mínimo que la empresa deja de percibir es:

$$4,29 \frac{ADt}{hora} * 600 \frac{US\$}{ADt} * 8 horas = US\$ 20.592$$

Dada la suma que se deja de percibir en una detención, es de alta importancia el disminuir el número de detenciones, ya que este es el problema que genera un mayor impacto.

Por lo anterior es que Arauco desea averiguar el origen de las detenciones en los intercambiadores de calor y conocer las medidas de solución disponibles.

### 3.3. Resultados del diagnóstico

El primer paso para poder analizar el funcionamiento de los intercambiadores de calor es identificarlos, para ello se realizó un levantamiento de información y se determinó cuáles son los intercambiadores de calor que están presentes en el proceso, además de detallar sus especificaciones.

En la Tabla 1 se muestra un listado de los equipos intercambiadores de calor presentes en el área de digestores, en los anexos se muestra información con más detalle acerca de cada intercambiador de calor. El levantamiento de información de los equipos es de gran ayuda para la empresa, puesto que la información con que se cuenta en planta es difusa y dispersa, además de encontrarse en los idiomas del fabricante del equipo.

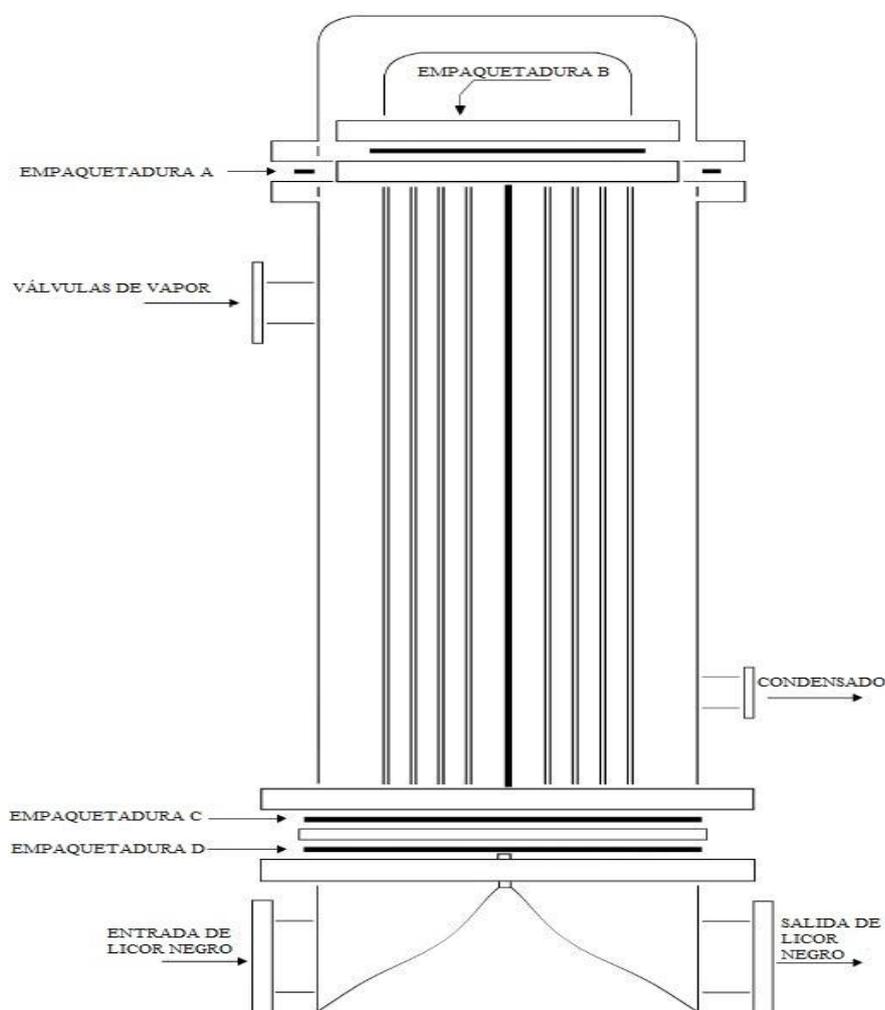
**Tabla 1: Intercambiadores de calor de Digestores**

Intercambiador (TAG)	Año de fabricación	Largo haz tubular (mts)	Número de tubos	Diámetro tubos (cm)	Número de pasos por los tubos	Fluido por la carcasa	Fluido por los tubos
E143	1989	6,96	202	3,08	2	Vapor	Licor Negro
E213	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E223	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E233	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E243	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E313	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E323	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E333	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E343	1971	6,96	324	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E443	1981	7,92	438	2,54	1	Vapor	Licor Negro

Fuente: Elaboración propia

Uno de los aspectos más relevantes que se pueden extraer de la Tabla 1, es el año de fabricación de cada equipo. Según (Aguirre & Martinez, 1983) la vida útil estimada de equipos de este tipo es de alrededor de 25 a 30 años, y contrastando con la edad de los equipos en estudio, se puede apreciar que todos los intercambiadores presentes en digestores tienen una edad superior a su vida útil, no obstante se debe considerar que gran parte de estos equipos han sufrido modificaciones, tales como por ejemplo el cambio del haz tubular, lo que les permite operar muy por sobre su vida útil.

**Ilustración 13: Representación de Intercambiador de calor de digestores**



*Fuente: Proporcionado por planta Constitución*

En la Ilustración 13 se puede ver una representación de un intercambiador de calor que se encuentra en el área de digestores, cabe destacar su posición vertical.

En la Tabla 2 se muestran los intercambiadores presentes en el patio de estanques, como se puede ver son de distintas especificaciones respecto de los que están presentes en los digestores y otro punto destacable es que tienen una edad mucho menor comparada a los intercambiadores de calor de digestores y se encuentran dentro de su vida útil de diseño.

**Tabla 2: Intercambiadores de calor del patio de estanques**

Intercambiador (TAG)	Año de fabricación	Largo haz tubular (mts)	Número de tubos	Diámetro tubos (cm)	Número de pasos por los tubos	Fluido por la carcasa	Fluido por los tubos
E56	1995	7,93	300	2,54	4	Licor Blanco	Licor Negro
E57	1995	7,93	300	2,54	4	Licor Blanco	Licor Negro
E58	1995	9,14	336	2,54	4	Vapor	Licor Blanco
E59	1995	9,14	336	2,54	4	Vapor	Licor Blanco
E64	1995	9,40	1528	2,54	8	Agua	Licor Negro
E542	1995	9,14	294	2,54	2	Vapor	Licor Negro
E543	2014	9,14	294	2,54	2	Vapor	Licor Negro

*Fuente: elaboración propia*

Según lo descrito respecto a la importancia que genera una detención de un intercambiador de calor, en especial de los asociados a digestores, se hace necesario cuantificar cuantas detenciones se han experimentado.

En la Tabla 3 se muestran las detenciones que ha tenido cada intercambiador de calor desde el año 2013 a 2018, se toma como fecha de inicio de la toma de información por recomendación del área de operaciones, puesto que información más antigua no resulta confiable.

**Tabla 3: Avisos por intercambiador desde 2013 a 2018**

Intercambiador	Avisos
E-143	16
E-213	8
E-223	12
E-233	28
E-243	16
E-313	16
E-323	15
E-333	17
E-343	14
E-443	31
E-542	21
E-543	13
E-56	5
E-57	10
E-58	14
E-59	26
E-64	20
<b>Total</b>	<b>282</b>

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 1 es posible apreciar visualmente las diferencias en la cantidad de detenciones entre un intercambiador y otro, lo cual evidencia un problema específico en los equipos con mayor número de detención, por lo cual en capítulos posteriores se analiza la causa de estas detenciones.

**Gráfico 1: Avisos por intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia

### **3.4. Conclusiones del diagnóstico**

En base a la información expuesta anteriormente se puede concluir que la problemática es real y tiene gran incidencia, del total de intercambiadores de calor en estudio se han presentado 282 detenciones, existiendo gran diferencia en el número de detenciones entre un intercambiador y otro, por lo cual se hace necesario estudiar las causas anómalas que originan esta diferencia. Además de recalcar el gran impacto económico que genera una detención de un digestor, lo que lleva a desear aumentar los tiempos operativos de los intercambiadores de calor.

# **CAPÍTULO 4: IDENTIFICACION DE PROBLEMAS EN INTERCAMBIADORES DE CALOR**

*En el presente capítulo se presenta un análisis de los avisos de fallas que se han registrado respecto a los intercambiadores de calor y se identifican a qué tipo de problema corresponde.*

## **4. Análisis de Avisos de fallas**

Arauco para gestionar sus recursos utiliza el mundialmente conocido ERP o sistema de información SAP, por lo tanto la gestión del mantenimiento también es gestionada por medio de SAP.

Un aviso es un documento creado en SAP que describe técnicamente situaciones especiales. Permite a su vez reportar las necesidades detectadas, lo que desencadena una acción, que generalmente es cumplida a través de órdenes de mantenimiento.

Por lo cual en el presente capítulo se analizan los avisos de problemas relacionados con los intercambiadores de calor, los cuales se extraen desde el sistema SAP.

### **4.1. Principales problemas que se informan en avisos**

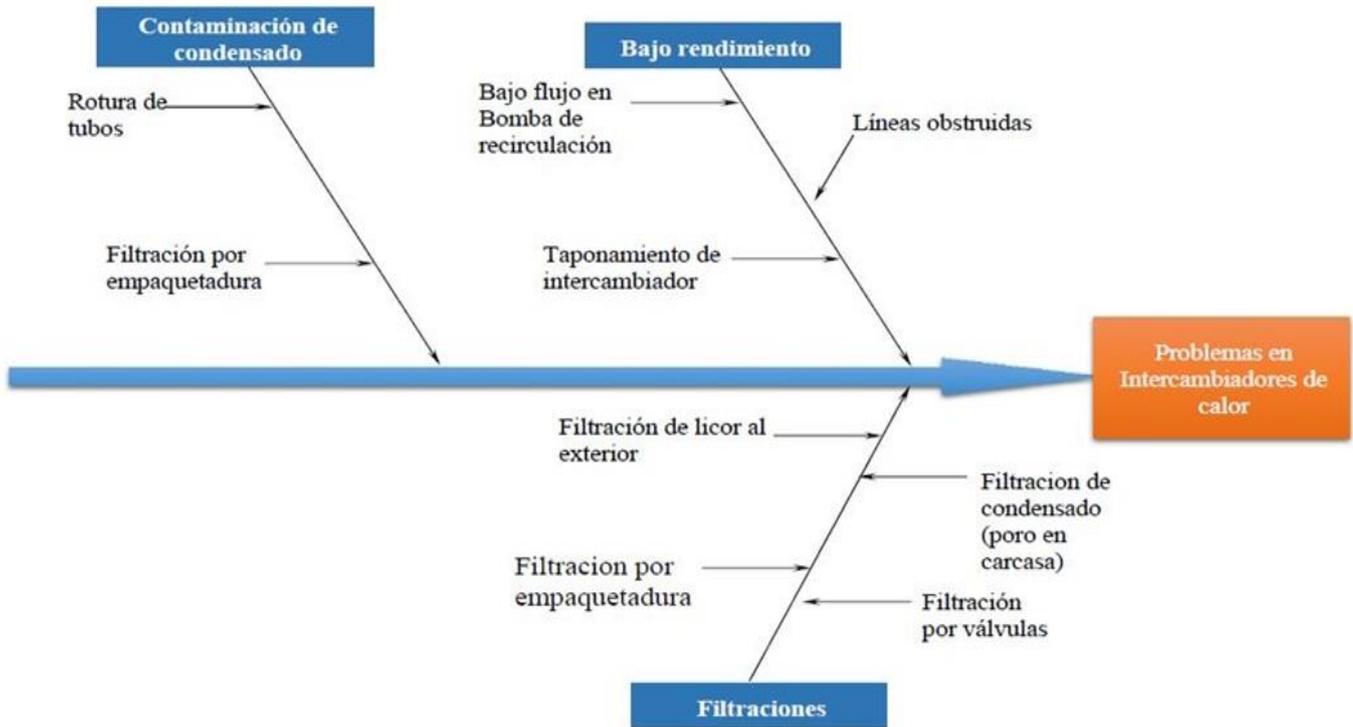
Se presenta un análisis cualitativo de la operación de los intercambiadores de calor, para conocer acerca de los problemas o deficiencias en el trabajo de los intercambiadores de calor que originan detenciones o paradas.

Para lo cual se entrevista al ingeniero de operaciones y el operador del área de fibra, para construir un diagrama causa efecto en base a las respuestas entregadas. Las preguntas por responder son:

- ¿Cuáles han sido los problemas que han experimentado los intercambiadores de calor?
- ¿Cuáles son más comunes?
- ¿Por qué se producen?

En base a las respuestas entregadas se construyó el diagrama causa efecto que se puede apreciar en la Ilustración 14

Ilustración 14: Diagrama de Ishikawa problemas de intercambio de calor



Fuente: Elaboración propia

En base al diagrama causa efecto presente en la Ilustración 14 se puede concluir que los principales problemas asociados a los intercambiadores de calor se reducen a tres subproblemas los cuales son:

**1. Bajo rendimiento:** el intercambiador de calor no realiza eficientemente el intercambio de calor, por lo que es necesario hacer recircular un mayor número de veces el licor para obtener la temperatura deseada, lo que trae como consecuencia un mayor tiempo de proceso y un mayor consumo de vapor.

Las causas atribuibles al bajo rendimiento de un intercambiador de calor son:

- **Bajo flujo en la bomba de recirculación:** Puede deberse a una obstrucción en esta o una falla en su funcionamiento
- **Bajo flujo en el intercambiador:** Puede deberse al taponamiento del intercambiador, un aumento de la densidad del licor, o deficiencias en la bomba.

- **Taponamiento del intercambiador:** Los tubos del intercambiador se taponan impidiendo el paso del licor, disminuyendo el área de intercambio de calor.
  - **Líneas con corrosión:** los tubos son afectados por la corrosión formando una capa que actúa como aislante o en caso contrario generando orificios por donde se escapa el licor y contamina el vapor.
  - **Fisuras en las uniones:** es común que en las uniones presentes en el intercambiador se generen fisuras o grietas en los puntos de soldadura.
- 2. Contaminación:** Este corresponde a uno de los problemas más críticos que presentan los intercambiadores de calor, generalmente es catalogado como una emergencia, se presenta cuando el vapor es contaminado con el licor (es una filtración de licor hacia el interior del intercambiador de calor), la contaminación se hace presente en el condensado del vapor o en su defecto en el vapor que es expulsado por una chimenea, siendo este último de gran peligro, ya que el licor corresponde a un químico peligroso altamente corrosivo.

Las causas atribuibles a la contaminación son:

- **Rotura de uno o más de los tubos:** al existir una rotura en alguno de los tubos el licor se filtra hacia la carcasa, por donde circula vapor, para posteriormente ser expulsado al ambiente por la línea de condensado o expulsado por la chimenea.
  - **Rotura de empaquetadura:** en el intercambiador de calor existe una empaquetadura que su función es evitar el contacto de los fluidos, dado que el intercambiador se encuentra a alta temperatura y presión, la empaquetadura va sufriendo desgaste, hasta que se generan grietas y permite el contacto de los fluidos, generando contaminación.
- 3. Filtración:** Esta ocurre cuando un intercambiador de calor presenta filtración, de licor al exterior, este es uno de los problemas más recurrentes, sin embargo sus consecuencias no resultan perjudiciales para el proceso, por ello su mantenimiento correctivo es generalmente programado en el mediano o largo plazo.

**Las causas que originan la filtración son:**

- **Filtración por empaquetadura:** La empaquetadura es una arandela que se encuentra entre el haz tubular y la carcasa, la cual tiene por función impedir filtraciones en un

intercambiador de calor existen cuatro empaquetaduras, cuando una de estas se daña pueden existir filtraciones al exterior del intercambiador de calor por el borde de esta, no califica como contaminación puesto que no existe contacto entre los fluidos.

- **Cede el apriete de los pernos:** la empaquetadura se encuentra fija al intercambiador mediante pernos, los cuales debido a la alta temperatura, presión y vibraciones que está expuesta termina cediendo el apriete de los pernos, inclusive llegando a cortarse en ocasiones.
- **Filtración por válvula de corte:** a la salida y entrada de cada intercambiador de calor existen válvulas, las cuales permiten controlar el flujo de licor o vapor según sea el caso, estas en ocasiones son obstruidas y no cierran por completo, generando filtración en el área donde se encuentran.

## 4.2. Análisis cuantitativo de avisos

Para cuantificar la gravedad de cada problema Arauco utiliza una escala de prioridad que se le asigna a cada aviso, en función del tiempo de respuesta que se debe dar al problema detectado.

La escala utilizada se define de la siguiente forma:

- **Emergencia:** tiempo de respuesta durante el día
- **Urgencia:** tiempo de respuesta durante la semana
- **Programable:** Actividad que puede ser programada en el mediano plazo.

En la Tabla 4 se puede ver las detenciones que han presentado los intercambiadores de calor desde 2013 a la fecha, según la escala de prioridad definida.

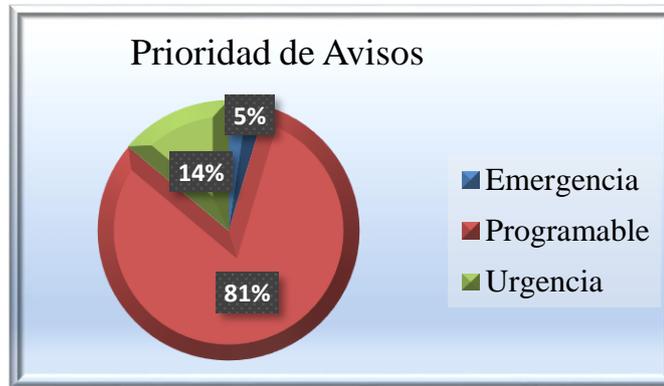
Tabla 4: Avisos por prioridad

Prioridad de detenciones	Número de Avisos
Emergencia	13
Programable	230
Urgencia	39
<b>Total</b>	<b>282</b>

Fuente: elaboración propia

El Gráfico 2 muestra los porcentajes que corresponden a cada tipo de detención

Gráfico 2: Prioridad de Avisos



Fuente: elaboración propia

Como es posible apreciar las emergencias son la minoría de problemas, mientras que la mayoría corresponde a detenciones programables.

Tabla 5: Avisos por prioridad y por intercambiador

Intercambiador	Prioridad De Avisos			Total avisos
	Emergencias	Programables	Urgencias	
E-143	0	12	4	16
E-213	0	7	1	8
E-223	0	11	1	12
E-233	4	23	1	28
E-243	0	13	3	16
E-313	0	15	1	16
E-323	0	13	2	15
E-333	0	17	0	17
E-343	0	13	1	14
E-443	4	20	7	31
E-542	0	16	5	21
E-543	0	10	3	13
E-56	0	4	1	5
E-57	0	10	0	10
E-58	1	10	3	14
E-59	1	23	2	26
E-64	3	13	4	20
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>230</b>	<b>39</b>	<b>282</b>

Fuente: elaboración propia

La Tabla 5 resume la prioridad de detención que ha experimentado cada intercambiador de calor, esta tabla permite la creación del gráfico Gráfico 3, con el cual es posible compararlos

entre sí, para determinar que intercambiador ha presentado un mayor número de detenciones y de que prioridad son las detenciones.

Gráfico 3: Avisos por intercambiador y por prioridad



Fuente: elaboración propia

A simple vista existe gran variabilidad entre las detenciones de uno y otro intercambiador de calor, es posible apreciar el intercambiador E-443 es el que ha presentado un mayor número de detenciones, inclusive con gran número de urgencias y emergencias.

Del grupo de intercambiadores de calor en estudio, se pueden diferenciar en dos grupos por su ubicación (patio de estanques y digestores). Los cuales están expuestos a diferentes condiciones de operación, por lo cual no resulta adecuado realizar un análisis comparándolos como un solo conjunto, por lo tanto se realiza un análisis para cada sector (patio de estanques y digestores).

### 4.3. Análisis intercambiadores patio de estanques

En la Tabla 6 se muestran los avisos que se han informado acerca de los intercambiadores de calor del patio de estanques.

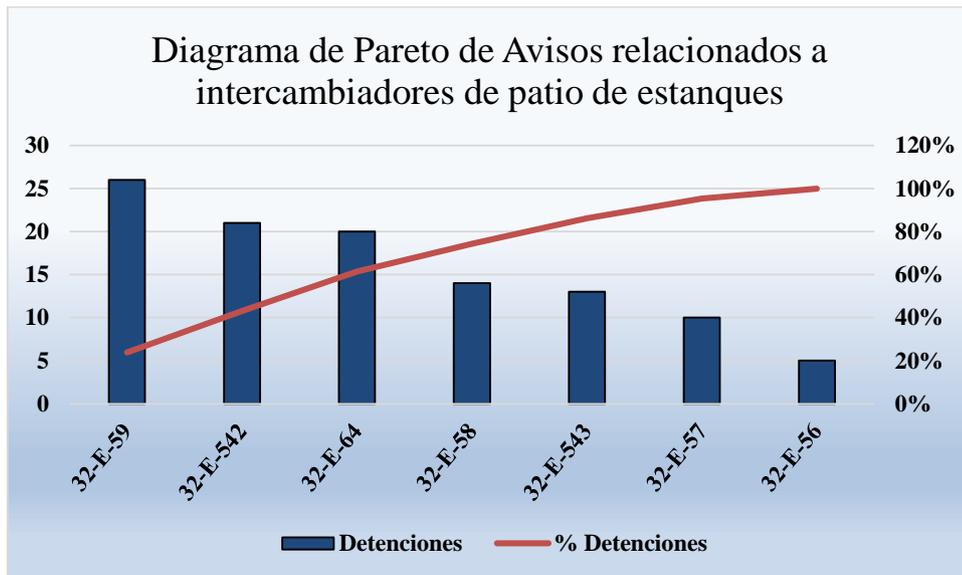
**Tabla 6: Avisos Intercambiadores de patio de estanques**

Intercambiador	Avisos
32-E-542	21
32-E-543	13
32-E-56	5
32-E-57	10
32-E-58	14
32-E-59	26
32-E-64	20
<b>Total</b>	<b>109</b>

Fuente: Elaboración propia

Realizando un diagrama de Pareto, el cual se presenta en el Gráfico 4, es posible apreciar la contribución de cada intercambiador del patio de estanques al total de avisos presentados por estos equipos

**Gráfico 4: Diagrama de Pareto Avisos patio de estanques**



Fuente: Elaboración propia

En estos casos se puede aplicar el principio de los pocos vitales y los muchos triviales que se conoce como principio de Pareto, la que quiere decir que en el 80% de los problemas de los intercambiadores de calor son provocados por un 20% de las causas. Por lo tanto basta con analizar el 80% de los avisos para identificar las causas que los provocan. Lo cual corresponde a analizar los intercambiadores de calor 32-E59, 32-E542, 32-E64 y 32-E58.

Dentro del análisis por intercambiador se descubre que existen avisos duplicados o distintos avisos que reportan un mismo problema, por lo tanto se analiza cada aviso y se va agrupando a qué tipo de problema pertenece.

### 4.3.1 Análisis intercambiador 32-E59

En la Tabla 7 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E59, agrupados por el tipo de problema.

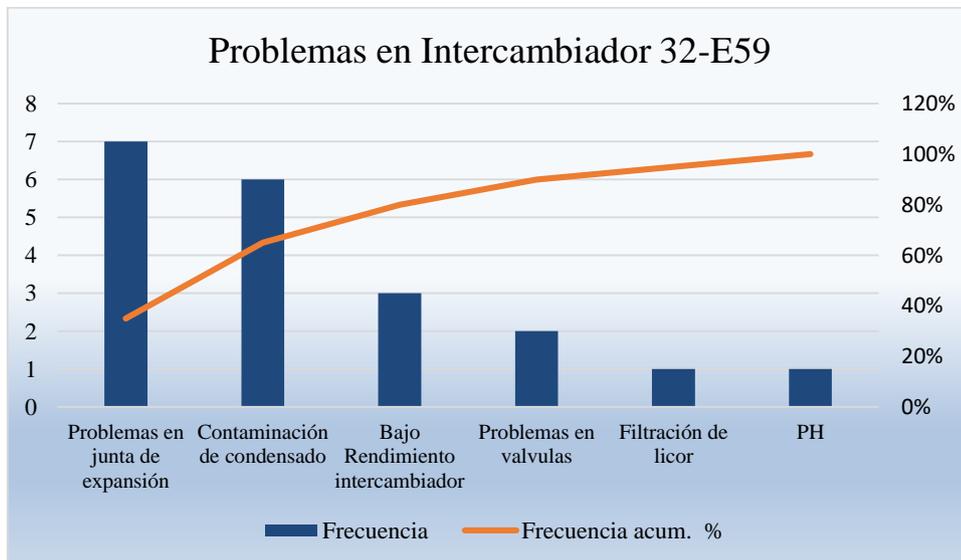
Tabla 7: Avisos Intercambiador 32-E59

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia Acum. %
Problemas en junta de expansión	7	35%	35%
Contaminación de condensado	6	30%	65%
Bajo Rendimiento intercambiador	3	15%	80%
Problemas en válvulas	2	10%	90%
Filtración de licor	1	5%	95%
PH	1	5%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 5 se muestra la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E59.

Gráfico 5: Avisos intercambiador 32-E59



Fuente: Elaboración propia

Según lo que se aprecia en el Gráfico 5 el 80% de los problemas del intercambiador 32-E59 corresponden a Problemas en la junta de expansión, contaminación de condensado y bajo rendimiento del intercambiador, siendo los problemas en la junta de expansión los más recurrentes.

### 4.3.2 Análisis intercambiador 32-E542

En la Tabla 8 se agrupan los problemas que se presentan en el intercambiador 32-E542.

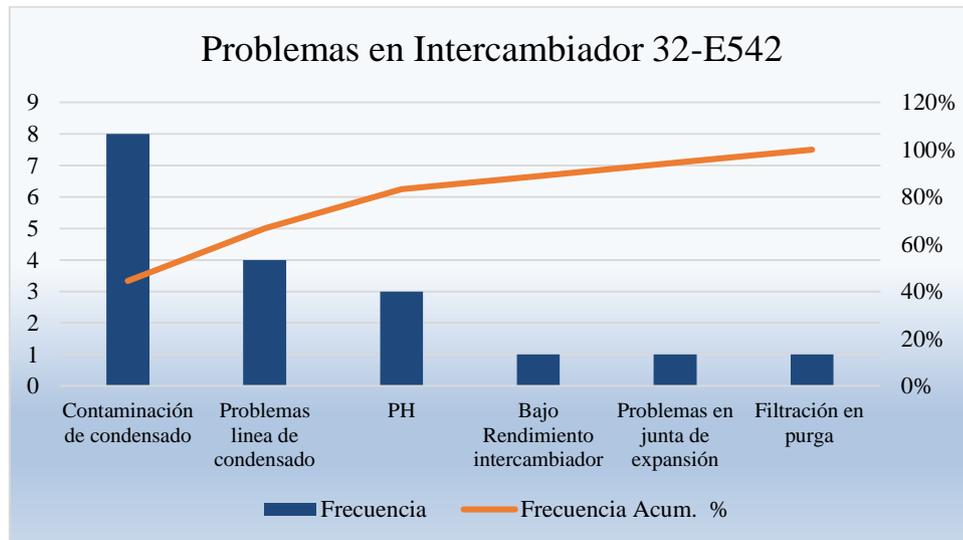
Tabla 8: Avisos Intercambiador 32-E542

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia Acum. %
Contaminación de condensado	8	44%	44%
Problemas línea de condensado	4	22%	67%
PH	3	17%	83%
Bajo Rendimiento intercambiador	1	6%	89%
Problemas en junta de expansión	1	6%	94%
Filtración en purga	1	6%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 6 se ilustra la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E542.

Gráfico 6: Problemas en intercambiador 32-E542



Fuente: elaboración propia

Se puede apreciar que el 83% de los problemas presentes en el intercambiador 32-E542 corresponden a Contaminación de condensado, Problemas en las líneas de condensado y PH (Prueba Hidráulica usada para detectar rotura de tubos).

### 4.3.3 Análisis intercambiador 32-E64

En la Tabla 9 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E59, agrupados por el tipo de problema.

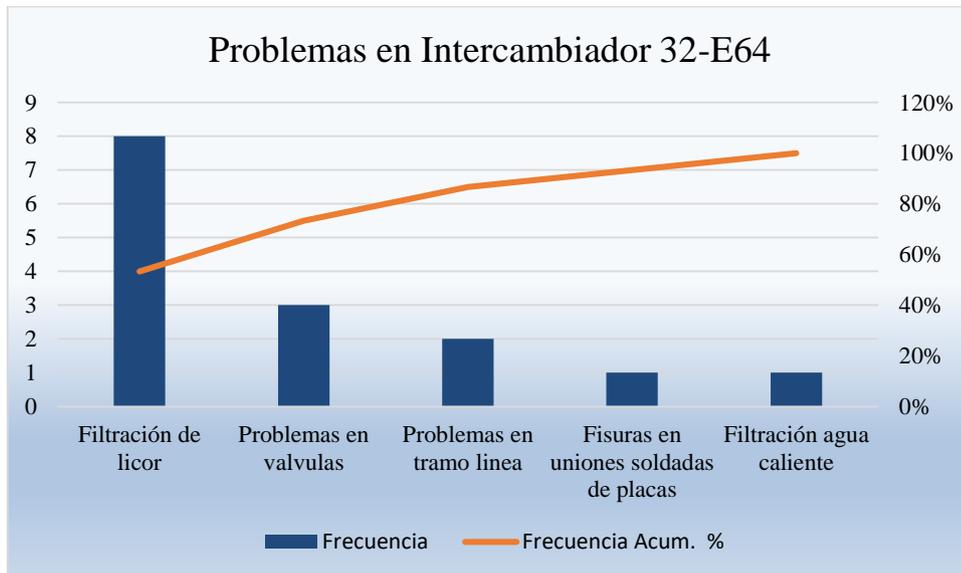
Tabla 9 : Avisos intercambiador 32-E64

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia Acum. %
Filtración de licor	8	53%	53%
Problemas en válvulas	3	20%	73%
Tramo línea con fisura	2	13%	87%
Fisuras en uniones soldadas de placas	1	7%	93%
Filtración agua caliente	1	7%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 7 se ilustra la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E64.

Gráfico 7: Diagrama de Pareto Avisos Intercambiador 32E64



Fuente: elaboración propia

Se concluye que el 87% de los problemas presentes en el intercambiador 32-E64 corresponden a filtración de licor, Problemas en válvulas y problemas en algún tramo de la línea.

#### 4.3.4 Análisis intercambiador 32-E58

En la Tabla 10 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E58, agrupados por el tipo de problema.

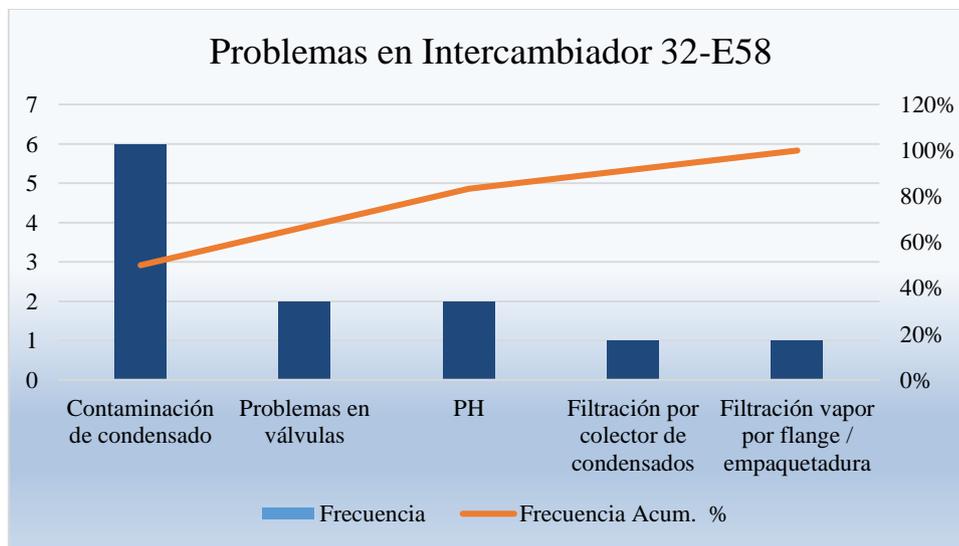
Tabla 10: Avisos Intercambiador 32-E58

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia Acum. %
Contaminación de condensado	6	50%	50%
Problemas en válvulas	2	17%	67%
PH	2	17%	83%
Filtración por colector de condensados	1	8%	92%
Filtración vapor por flange	1	8%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 8 se ilustra la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E58.

Gráfico 8: Problemas en intercambiador 32-E58



Fuente: elaboración propia

Se concluye que los principales problemas presentes en el intercambiador 32-E58 corresponden a contaminación de condensado, problemas en válvulas y PH (prueba hidráulica), los cuales corresponden a un 83% de los problemas presentes en este intercambiador de calor.

### 4.3.5 Análisis intercambiador 32-E543

En la Tabla 11 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E543, agrupados por el tipo de problema.

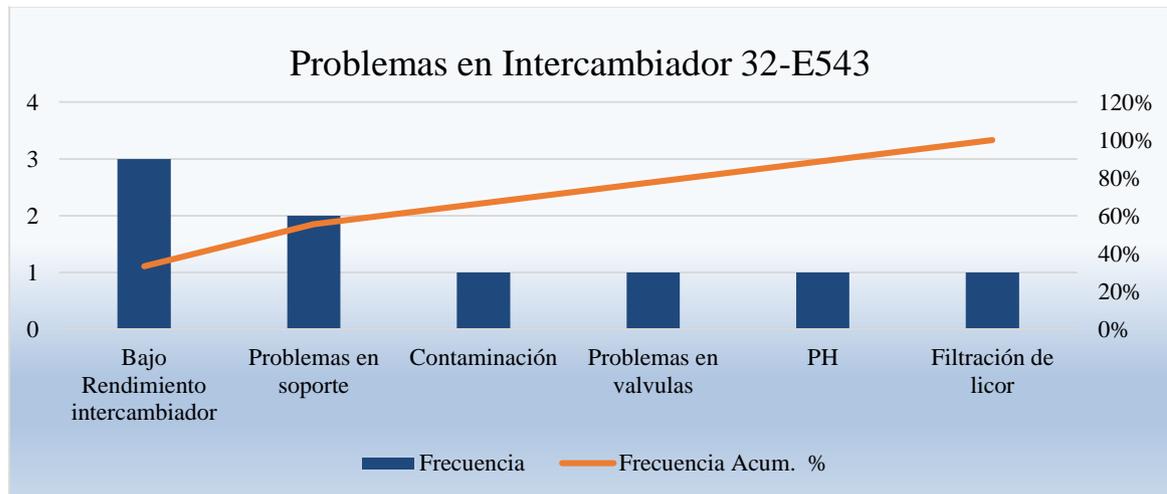
Tabla 11: Avisos Intercambiador 32-E543

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia Acum. %
Bajo Rendimiento intercambiador	3	33%	33%
Problemas en soporte	2	22%	56%
Contaminación	1	11%	67%
Problemas en válvulas	1	11%	78%
PH	1	11%	89%
Filtración de licor	1	11%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 9 se ilustra la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E58.

Gráfico 9: Problemas en intercambiador 32-E543



Fuente: elaboración propia

A diferencia del resto de intercambiadores de calor, en este se aprecia mayor variabilidad en los problemas que presenta, siendo el más frecuente el bajo rendimiento del intercambiador, seguido por problemas en el soporte del intercambiador lo cual no necesariamente es un problema del intercambiador en sí.

### 4.3.6 Resumen intercambiadores de calor de patio de estanques

En la Tabla 12 se resumen los problemas detectados en los intercambiadores en estudio pertenecientes al patio de estanques.

**Tabla 12: Resumen de problemas en intercambiadores de patio de estanques**

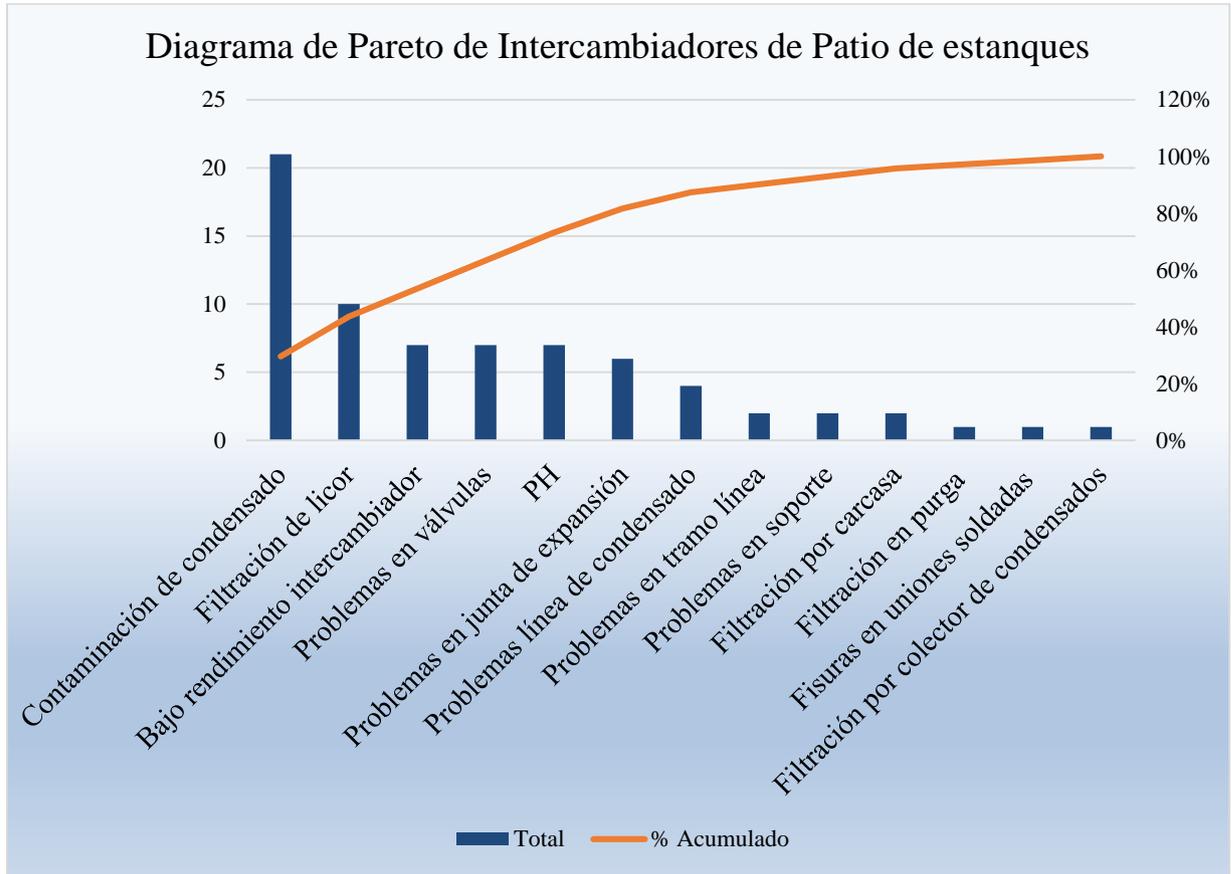
<b>Clasificación de Avisos</b>	<b>32-E59</b>	<b>32-E542</b>	<b>32-E64</b>	<b>32-E58</b>	<b>32-E543</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>	<b>% Acumulado</b>
Contaminación de condensado	6	8		6	1	<b>21</b>	30%	30%
Filtración de licor	1		8		1	<b>10</b>	14%	44%
Bajo rendimiento intercambiador	3	1			3	<b>7</b>	10%	54%
Problemas en válvulas	2		2	2	1	<b>7</b>	10%	63%
PH	1	3		2	1	<b>7</b>	10%	73%
Problemas en junta de expansión	5	1				<b>6</b>	8%	82%
Problemas línea de condensado		4				<b>4</b>	6%	87%
Problemas en tramo línea			2			<b>2</b>	3%	90%
Problemas en soporte					2	<b>2</b>	3%	93%
Filtración por carcasa			1	1		<b>2</b>	3%	96%
Fisuras en uniones soldadas			1			<b>1</b>	1%	97%
Filtración en purga		1				<b>1</b>	1%	99%
Filtración por colector de condensados				1		<b>1</b>	1%	100%

Fuente: elaboración propia

Tras filtrar la información de los avisos, eliminar avisos repetidos, o que informan un problema que no es propio de un intercambiador de calor se concluye que en el área de Patio de estanques se presentaron 71 problemas durante el periodo en estudio.

Los problemas más frecuentes en estos intercambiadores en orden descendente corresponden a contaminación de condensado, filtración de licor, bajo rendimiento del intercambiador, problemas en las válvulas, Prueba Hidrostática y problemas en la junta de expansión, tal como se puede apreciar en el Gráfico 10. Cabe destacar que las Pruebas Hidrostáticas no se deben considerar como un problema, más bien como un método para evidenciar un problema.

**Gráfico 10: Diagrama de Pareto de Intercambiadores de calor de patio de estanques**

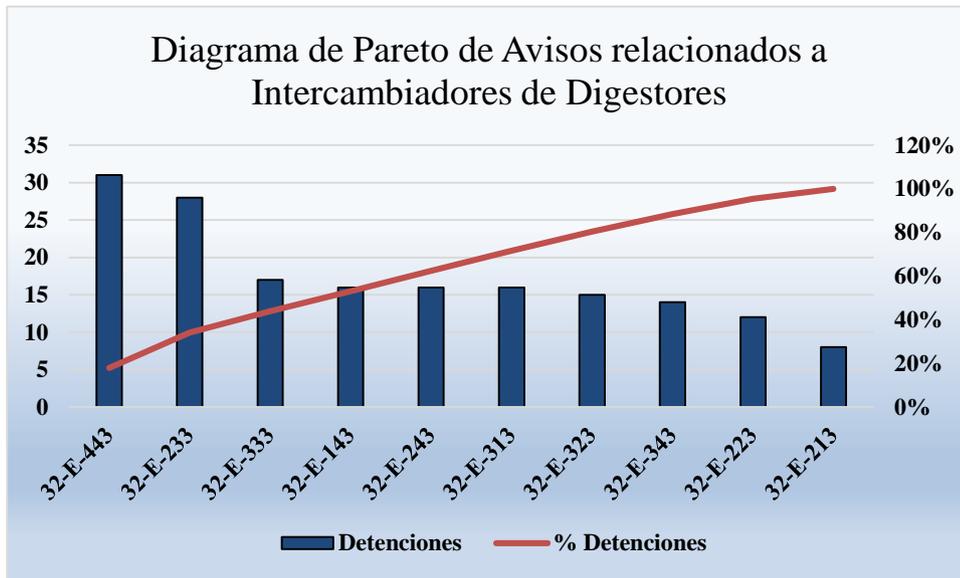


Fuente: elaboración propia

#### 4.4. Análisis intercambiadores de Digestores

Para los intercambiadores de calor del área de digestores se aplica la misma metodología construyéndose el diagrama de Pareto presente en el Gráfico 11.

Gráfico 11: Diagrama de Pareto para Avisos de intercambiadores de Digestores



Fuente: elaboración propia

Aplicando el principio de Pareto de los pocos vitales y los muchos triviales se seleccionan para analizar las causas de detenciones los intercambiadores de calor 32-E-443, 32-E-233, 32-E-333, 32-E-143, 32-E-243, 32-E-313 y 32-E-323 los cuales en conjunto representan un 80% de los avisos de problemas de intercambiadores de calor del área de digestores.

#### 4.4.1 Análisis intercambiador 32-E443

En la Tabla 13 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E443, agrupados por el tipo de problema.

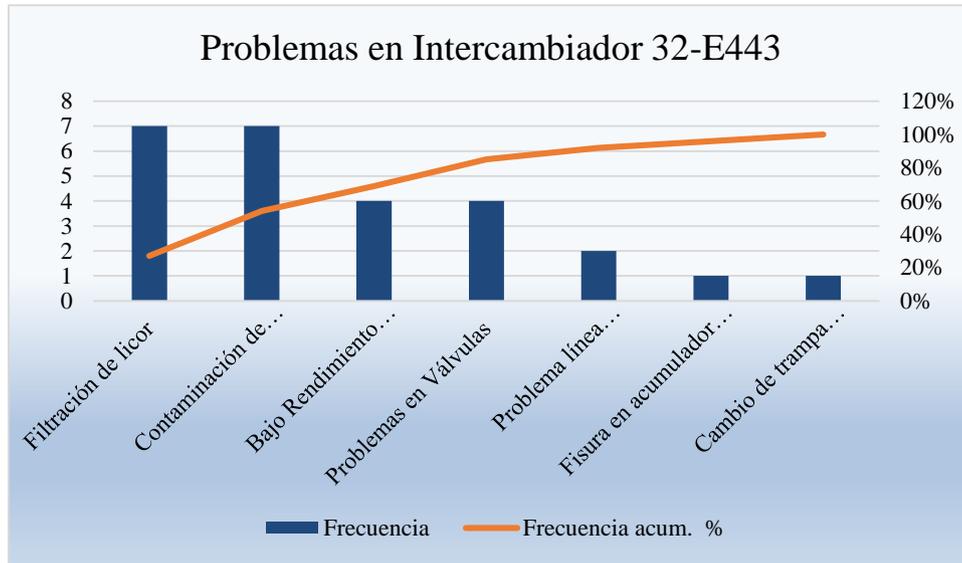
Tabla 13: Problemas Intercambiador 32-E443

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia acum. %
Filtración de licor	7	27%	27%
Contaminación de condensado	7	27%	54%
Bajo Rendimiento intercambiador	4	15%	69%
Problemas en Válvulas	4	15%	85%
Problema línea recirculación	2	8%	92%
Fisura en acumulador de condensado	1	4%	96%
Cambio de trampa circuito de vapor	1	4%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 12 se ilustra la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E443.

**Gráfico 12: Problemas en intercambiador 32-443**



Fuente: elaboración propia

Se puede apreciar que los problemas más frecuentes en el intercambiador 32-e443 corresponden a Filtración de licor, contaminación de condensado, bajo rendimiento del intercambiador y problemas en las válvulas del intercambiador, los cuales en conjunto representan un 85% de los problemas que afectan a este intercambiador de calor.

### 4.3.1 Análisis intercambiador 32-E233

En la Tabla 14 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E233, agrupados por el tipo de problema.

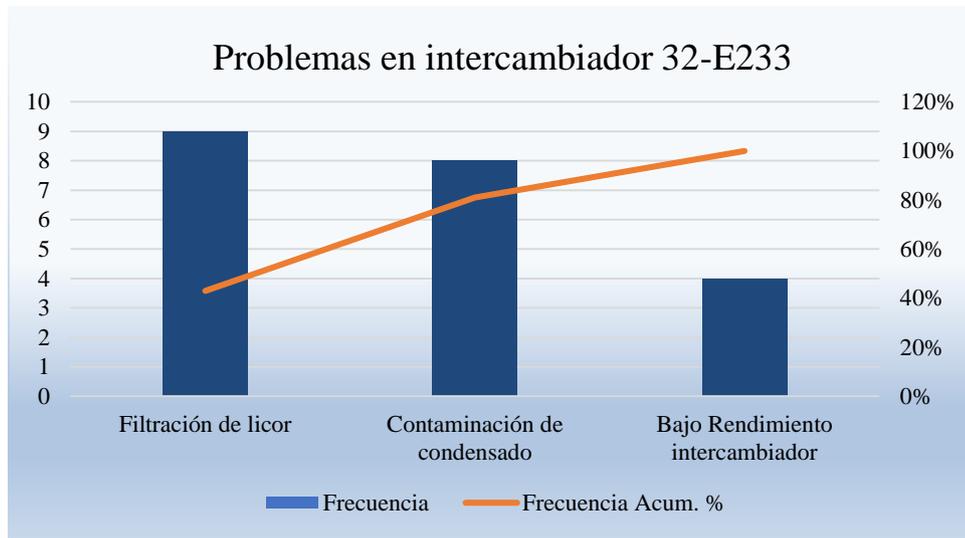
**Tabla 14: Problemas Intercambiador 32-E233**

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia Acum. %
Filtración de licor	9	43%	43%
Contaminación de condensado	8	38%	81%
Bajo Rendimiento intercambiador	4	19%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 13 se ilustra la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E233.

Gráfico 13: Problemas en intercambiador de calor 32\_E233



Fuente: elaboración propia

Se aprecia un menor número de problemas en este intercambiador de calor, respecto al resto de intercambiadores, no obstante los problemas que presenta son de los más graves.

### 4.3.2 Análisis intercambiador 32-E333

En la Tabla 15 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E333, agrupados por el tipo de problema.

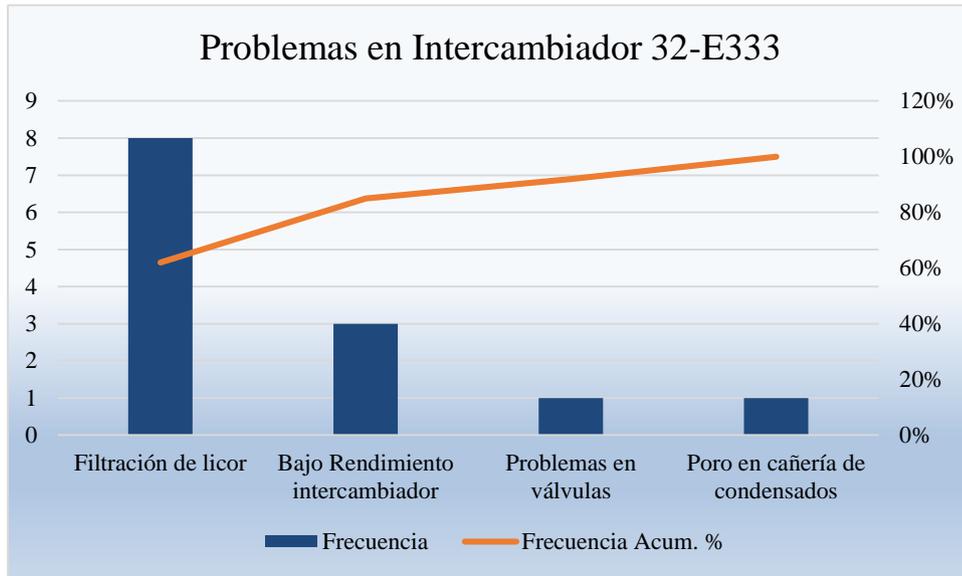
Tabla 15: Problemas Intercambiador 32-E333

Aviso	Frecuencia	Frecuencia %	Frecuencia Acum. %
Filtración de licor	8	62%	62%
Bajo Rendimiento intercambiador	3	23%	85%
Problemas en válvulas	1	8%	92%
Poros en cañería de condensados	1	8%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 14 se aprecia visualmente la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E333.

**Gráfico 14: Problemas en Intercambiador de calor 32-E333**



Fuente: elaboración propia

Se puede apreciar un elevado número de problemas relacionados con filtración de licor al exterior, seguido de un bajo rendimiento del intercambiador.

### 4.3.3 Análisis intercambiador 32-E143

En la Tabla 16 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E143, agrupados por el tipo de problema.

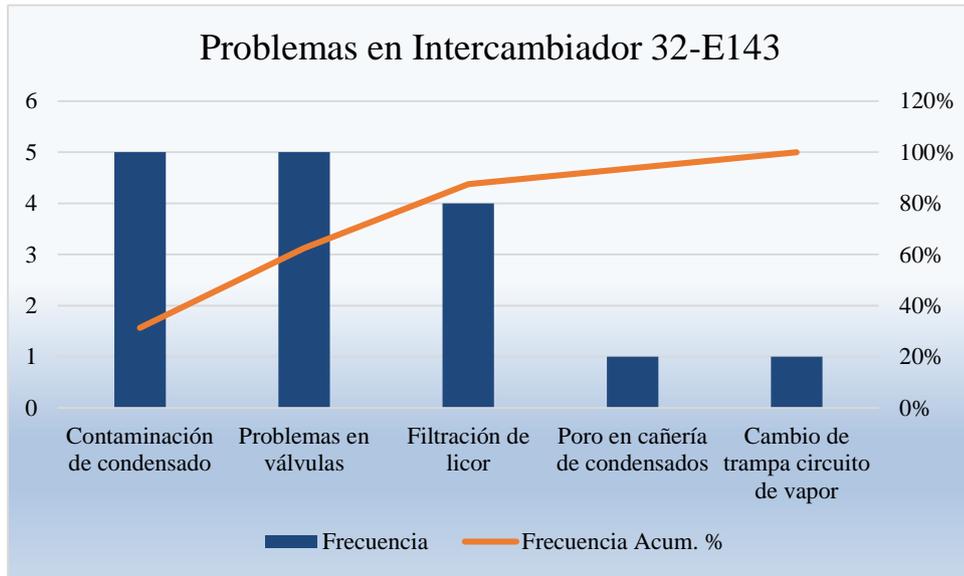
**Tabla 16: Problemas Intercambiador 32-E143**

Aviso	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Acum. %
Contaminación de condensado	5	31%	31%
Problemas en válvulas	5	31%	63%
Filtración de licor	4	25%	88%
Poro en cañería de condensados	1	6%	94%
Cambio de trampa circuito de vapor	1	6%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 15 se aprecia visualmente la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E143.

**Gráfico 15: Problemas en Intercambiador 32-E143**



Fuente: elaboración propia

Vuelven a ser los más frecuentes la contaminación de condensado y filtración de licor, añadiéndose un nuevo problema, el cual corresponde a problemas en las válvulas.

#### 4.3.4 Análisis intercambiador 32-E243

En la Tabla 17 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E243, agrupados por el tipo de problema.

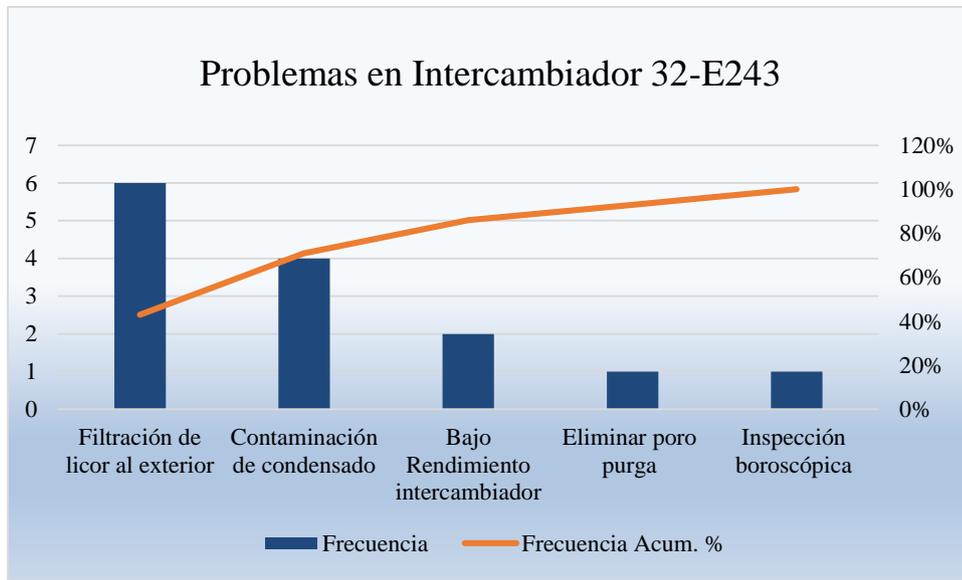
**Tabla 17: Problemas Intercambiador 32-E243**

Aviso	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Acum. %
Filtración de licor	6	43%	43%
Contaminación de condensado	4	29%	71%
Bajo Rendimiento intercambiador	2	14%	86%
Eliminar poro purga	1	7%	93%
Inspección boroscópica (trozos de alabes de bomba 32-J244)	1	7%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 16 se aprecia visualmente la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E243.

**Gráfico 16: Problemas en Intercambiador 32-E243**



Fuente: elaboración propia

Al igual que en el resto de los intercambiadores los problemas más recurrentes son la filtración de licor, contaminación de condensado y bajo rendimiento del intercambiador de calor.

#### 4.3.5 Análisis intercambiador 32-E313

En la Tabla 18 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E313, agrupados por el tipo de problema.

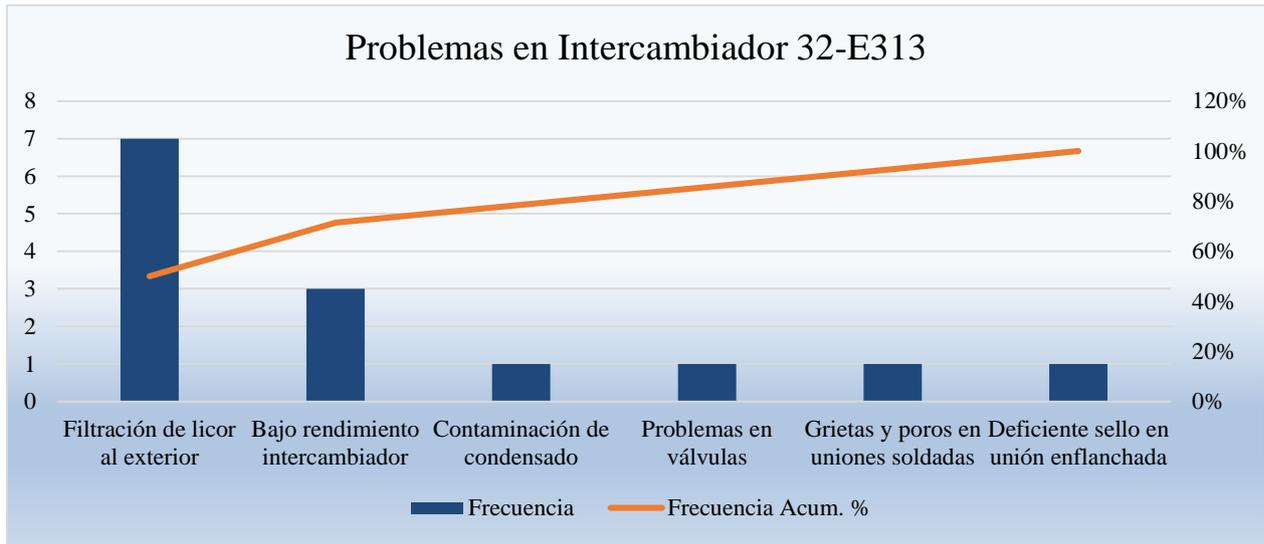
**Tabla 18: Problemas Intercambiador 32-E313**

Aviso	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Acum. %
Filtración de licor	7	50%	50%
Bajo rendimiento intercambiador	3	21%	71%
Contaminación de condensado	1	7%	79%
Problemas en válvulas	1	7%	86%
Grietas y poros en uniones soldadas	1	7%	93%
Deficiente sello en unión enflanchada	1	7%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 17 se aprecia visualmente la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E313.

Gráfico 17: Problemas en Intercambiador 32-E313



Fuente: elaboración propia

Vuelven a liderar los mismos problemas que en el resto de los intercambiadores, no obstante el problema de filtración de licor es el más recurrente, representando un 50% de los problemas asociados a este intercambiador de calor.

#### 4.3.6 Análisis intercambiador 32-E323

En la Tabla 19 se muestran los avisos que ha presentado el intercambiador de calor 32-E323, agrupados por el tipo de problema.

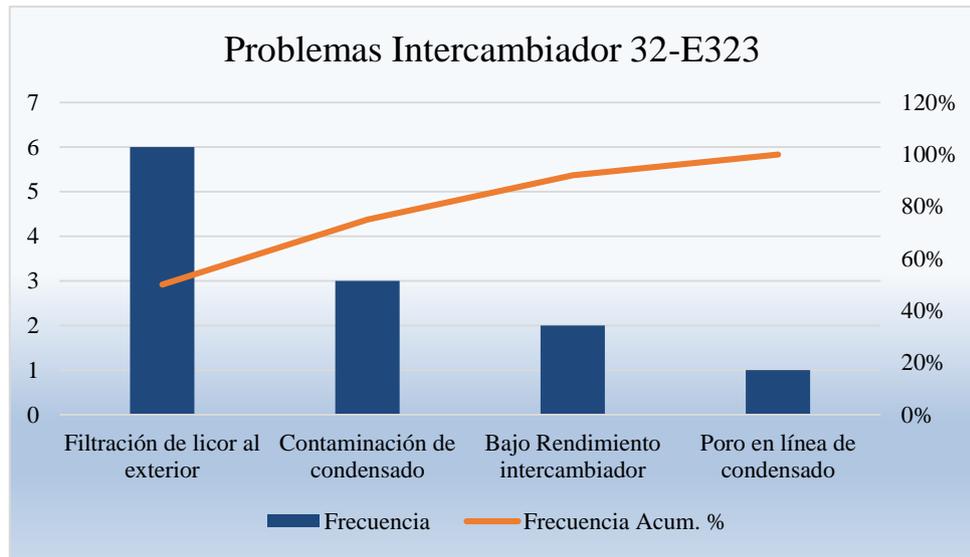
Tabla 19: Problemas Intercambiador 32-E323

Aviso	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Acum. %
Filtración de licor al exterior	6	50%	50%
Contaminación de condensado	3	25%	75%
Bajo Rendimiento intercambiador	2	17%	92%
Poros en línea de condensado	1	8%	100%

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 18 se aprecia visualmente la contribución de cada problema al total de avisos presentados por el intercambiador de calor 32-E323.

Gráfico 18: Problemas en Intercambiador 32-E323



Fuente: elaboración propia

El problema más recurrente en este intercambiador de calor es la filtración de licor hacia el exterior, representando un 50% de los problemas presentes en este Intercambiador de calor.

#### 4.3.7 Resumen intercambiadores de calor de digestores

En la Tabla 20 se resumen el total de avisos presentados por cada intercambiador, agrupándose los avisos por el tipo de falla.

Tabla 20: Resumen de problemas en intercambiadores de Digestores

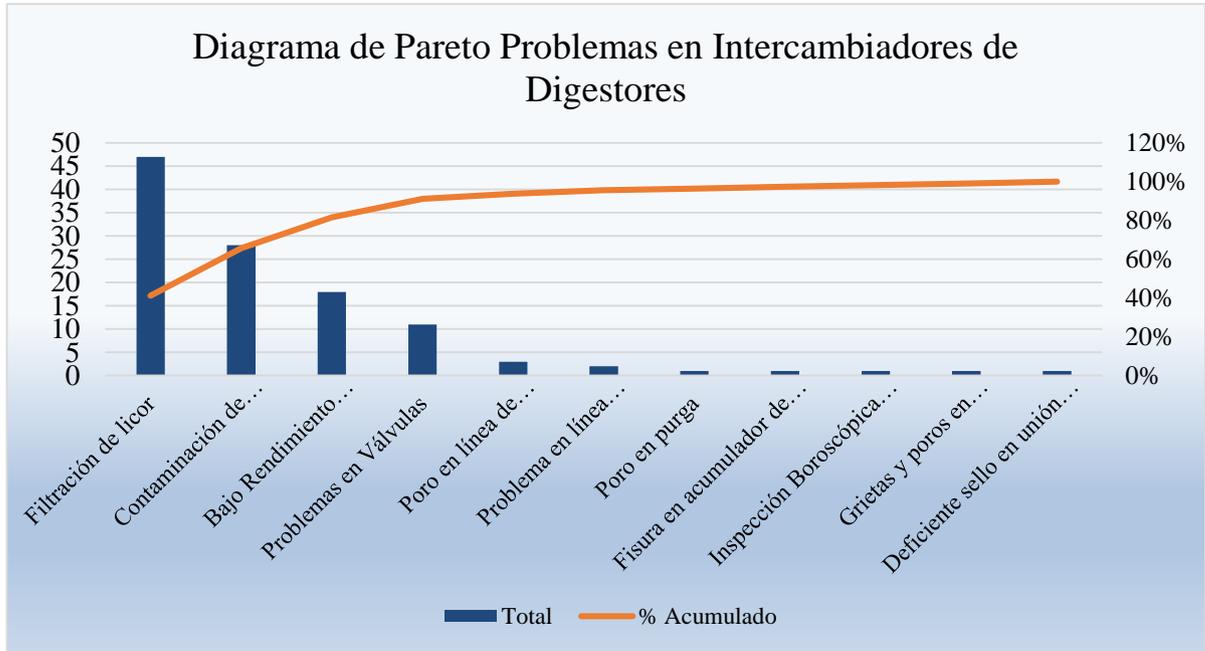
Clasificación de Avisos	32-E443	32-E233	32-E333	32-E143	32-E243	32-E313	32-E323	Total	%	% Acumulado
Filtración de licor	7	9	8	4	6	7	6	<b>47</b>	41%	41%
Contaminación de condensado	7	8		5	4	1	3	<b>28</b>	25%	66%
Bajo Rendimiento intercambiador	4	4	3		2	3	2	<b>18</b>	16%	82%
Problemas en Válvulas	4		1	5		1		<b>11</b>	10%	91%
Poros en línea de condensados			1	1			1	<b>3</b>	3%	94%
Problema en línea recirculación	2							<b>2</b>	2%	96%
Fisura en acumulador de condensado	1							<b>1</b>	1%	96%
Poros en purga					1			<b>1</b>	1%	97%
Inspección Boroscópica					1			<b>1</b>	1%	98%
Grietas y poros en uniones soldadas						1		<b>1</b>	1%	99%
Deficiente sello en unión enflanchada						1		<b>1</b>	1%	100%

Fuente: elaboración propia

Tras filtrar la información de los avisos, eliminar avisos repetidos, o que informan un problema que no es propio de un intercambiador de calor se concluye que en el área de Digestores se presentaron 114 problemas durante el periodo en estudio, los principales problemas que se presentan en los intercambiadores de calor de digestores corresponden a Filtración de licor, contaminación de condensado y bajo rendimiento del intercambiador, estos 3 problemas representan un 80% de los avisos, además coinciden con los problemas de los intercambiadores del patio de estanques. Por lo cual al buscar opciones que solucionen o eviten estos 3 problemas se genera un mayor impacto en la confiabilidad de los equipos

Se comprueba el principio de Pareto puesto que 3 de 12 problemas son los que afectan en un 82% a los intercambiadores de digestores, lo cual se puede apreciar en el Gráfico 19.

Gráfico 19: Diagrama de Pareto de Digestores



Fuente: elaboración propia

#### 4.3.7 Priorización de problemas de intercambiadores de patio de estanques

No resulta adecuado jerarquizar los problemas solo por su frecuencia, por lo que además se realiza una priorización de estos problemas mediante la utilización del NPR (Numero de prioridad del riesgo). Esta jerarquización se realiza en conjunto con el área de producción y mantenimiento los resultados indicados en la Tabla 21 corresponden al promedio de NPR respondidos, los cuales se pueden ver en anexos.

**Tabla 21: Prioridad de los problemas en Intercambiadores del patio de estanques**

<b>Problemas patio de estanques</b>	<b>Severidad (S)</b>	<b>Ocurrencia (O)</b>	<b>Detección (D)</b>	<b>NPR</b>
<b>Bajo rendimiento intercambiador</b>	4,0	7,0	3,7	<b>102,7</b>
<b>Filtración de licor al exterior</b>	6,3	5,0	3,0	<b>95,0</b>
<b>Contaminación de condensado</b>	4,7	10,0	1,7	<b>77,8</b>
Problemas en válvulas	4,7	3,0	5,3	74,7
Problemas en junta de expansión	4,0	3,0	5,3	64,0
Problemas línea de condensado	3,3	2,0	4,7	31,1
Filtración por colector de condensados	5,0	1,0	4,7	23,3
Problemas en tramo línea (bajo espesor)	4,3	1,0	5,0	21,7
Filtración por carcasa	6,0	1,0	3,3	20,0
Fisuras en uniones soldadas	5,0	1,0	3,0	15,0
Problemas en soporte	4,7	1,0	2,7	12,4
Filtración en purga	4,7	1,0	2,0	9,3

*Fuente: elaboración propia*

Se puede ver que los problemas en patio de estanques que presentan un mayor NPR en orden descendente corresponden a Bajo rendimiento del intercambiador de calor, Filtración de licor al exterior y contaminación de condensado.

#### **4.3.8 Priorización de problemas de intercambiadores de digestores**

En la Tabla 22 se presenta el cálculo del indicador NPR para los problemas identificados en los intercambiadores de calor de digestores, el cual es construido de forma que cada persona del área respondió los ítems de severidad y facilidad de detección en un a escala de 1 a 10, mientras que el indicador ocurrencia es extraído desde el análisis de avisos y posteriormente se promedió los resultados de cada integrante.

Tabla 22: Prioridad de problemas en Intercambiadores de calor de digestores

<b>Problema Digestores</b>	<b>Severidad (S)</b>	<b>Ocurrencia (O)</b>	<b>Detección (D)</b>	<b>NPR</b>
<b>Bajo Rendimiento intercambiador</b>	6,7	10,0	1,3	<b>88,9</b>
<b>Contaminación de condensado</b>	5,3	4,0	4,0	<b>85,3</b>
<b>Filtración de licor al exterior</b>	6,0	6,0	2,3	<b>84,0</b>
Problemas en Válvulas	4,7	3,0	4,3	60,7
Problema en línea recirculación	5,3	1,0	4,7	24,9
Inspección Boroscópica (Cuerpo extraño)	5,7	1,0	3,3	18,9
Fisura en acumulador de condensado	5,3	1,0	3,0	16,0
Poros en línea de condensados	3,3	1,0	3,7	12,2
Deficiente sello en unión enflanchada	3,7	1,0	3,0	11,0
Grietas y poros en uniones Soldadas	4,3	1,0	2,0	8,7
Poros en purga	3,3	1,0	1,7	5,6

Fuente: elaboración propia

Se ve que los problemas que presentan un mayor NPR en los intercambiadores de digestores son en orden descendente Bajo rendimiento del intercambiador, contaminación de condensado y filtración de licor hacia el exterior, los cuales coinciden con los problemas identificados en el patio de estanques, no obstante no el mismo orden de “NPR”, por lo tanto se debe centrar los esfuerzos en solucionar estos problemas para generar un mayor impacto

# **CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE MEJORA**

*En el presente capítulo se presentan las alternativas de solución a los problemas que representan una mayor prioridad de riesgo y se desarrolla una propuesta de mejora para enfrentarlos.*

## 5. Propuesta de mejora

En el presente capítulo se describen los principales problemas identificados en la operación de los intercambiadores de calor, se presentan las alternativas de solución a estos y se elabora una propuesta de mejora en base a las alternativas de mantenimiento existentes.

### 5.1. Principales Problemas identificados en los intercambiadores de calor

En base al análisis realizado en el capítulo 4, se concluye que los problemas que representan una mayor importancia corresponden a:

- Contaminación de condensado
- Filtración de licor
- Bajo rendimiento del intercambiador de calor

#### 5.1.1 Contaminación de condensado

El vapor es el fluido que circula por la carcasa de los intercambiadores de digestores y gran parte de los presentes en el patio de estanques, este circula por la carcasa a una presión de 11bar e ingresa al intercambiador a una temperatura de 218°C y sale del intercambiador de calor a una temperatura de 185°C, mientras que por el haz tubular circula el licor, generalmente licor negro a excepción de los calentadores de licor blanco.

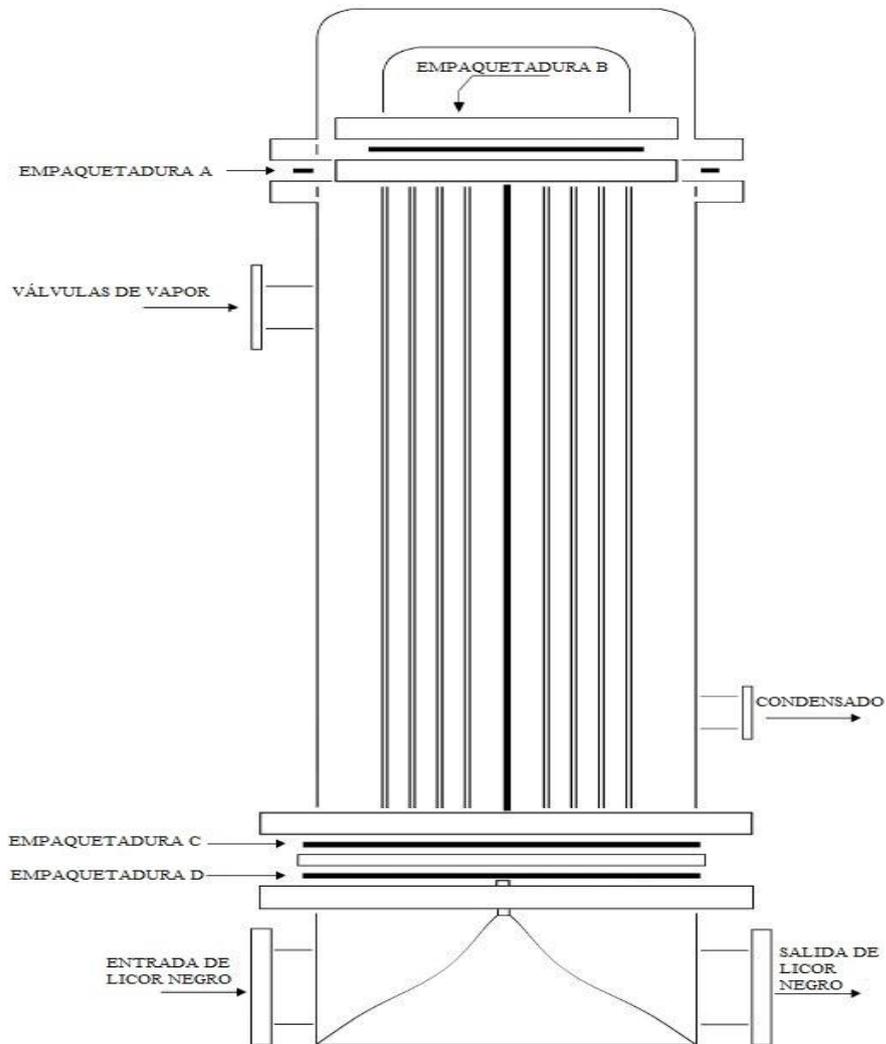
El vapor tras salir del intercambiador de calor es dirigido hacia un acumulador de condensado donde es almacenado en estado líquido, para posteriormente ser enviada a la planta de desmineralizado para ser tratado y reutilizado en el proceso como agua industrial.

El problema de la contaminación de condensado surge cuando el licor se filtra hacia la carcasa del intercambiador, de tal manera que se mezcla con el vapor. Este problema se detecta mediante un sensor de conductividad ubicado antes del acumulador de condensado, al detectarse un nivel de conductividad mayor o igual a  $10\mu S$ , el sistema automáticamente cierra la válvula de descarga hacia el acumulador de condensado y este es liberado hacia el drenaje y

parte que no alcanza a condensar es liberado en forma de vaho al ambiente, cuando la conductividad disminuye bajo  $10\mu S$ , la válvula de descarga es cerrada automáticamente y el condensado puede retornar al circuito del acumulador de condensado.

La contaminación de condensado se origina por dos motivos, ya sea rotura de uno o más de los tubos por donde circula el licor o bien por una filtración por alguna de las empaquetaduras descritas en la Ilustración 15.

**Ilustración 15: Esquema Intercambiador de calor**



Fuente: Proporcionado por planta Constitución

Este es un problema de carácter grave y requiere atención inmediata, generalmente es catalogado como emergencia, dada la pérdida de agua en el sistema, lo cual afecta directamente a la planta de desmineralizado, lo cual repercute en las demás áreas de la planta como en la caldera a la hora de generar vapor, lo que trae como consecuencia una disminución de la velocidad de operación de toda la planta.

### 5.1.2 Filtración de licor

Este problema consiste en una filtración de licor hacia el exterior del intercambiador de calor, generalmente las filtraciones se dan por una de las empaquetaduras, o bien por las uniones enflanchadas. Tal como se puede ver en la Ilustración 16.

**Ilustración 16: Filtraciones de licor**



*Fuente: Arauco Planta Constitución*

Un aviso de este tipo de problema, es de carácter programable, lo que quiere decir que no requiere atención inmediata, puesto que se trata de un problema que no incide en la producción, claro depende de la magnitud de la filtración que generalmente es leve. Su detección se realiza por inspección visual.

### 5.1.3 Problemas de bajo rendimiento del intercambiador de calor

El intercambiador de calor no realiza eficazmente el intercambio de calor. Este problema se da por el ensuciamiento y posterior taponamiento del interior de los tubos del intercambiador de calor, lo que trae como consecuencia una disminución del área de intercambio de calor, por lo que se reduce el intercambio de calor. La forma óptima de detectar este problema es midiendo y monitoreando el flujo de licor a la salida del intercambiador de calor, no obstante Planta Constitución no tiene implementado medidores de flujo en todos sus equipos, por lo que es medido indirectamente mediante el consumo de corriente de la bomba que impulsa el licor por el interior del intercambiador de calor, a mayor consumo de corriente se entiende un mayor grado de obstrucción del intercambiador de calor, sin embargo este método no resulta muy efectivo dado que existen otros factores que pueden incidir en la carga de la bomba como lo puede ser la densidad del licor, obstrucción en la bomba, o una falla de esta. En la Ilustración 17 se puede apreciar un intercambiador de calor con un alto grado de obstrucción

**Ilustración 17: Intercambiador de calor con tubos obstruidos**



*Fuente: Arauco Planta Constitución*

Este problema se origina por las condiciones operacionales del proceso, puesto que el fluido que circula por el interior de los tubos del intercambiador de calor corresponde a licor negro (a excepción de E58 y E59), el cual se define como un residuo alcalino viscoso del proceso de fabricación de pulpa de celulosa que contiene varios compuestos orgánicos e inorgánicos. Dos tercios de los sólidos en licor negro son compuestos orgánicos, predominantemente lignina (29-45%) y extractivos (25-35%). y el tercio restante son compuestos inorgánicos originados de la cocción, los cuales facilitan las incrustaciones durante el proceso de calentamiento, los cuales se muestran en la Tabla 23.

**Tabla 23: Contenidos de compuestos inorgánicos en el licor negro**

	<i>Na</i>	<i>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	<i>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	<i>Na<sub>2</sub>S</i>	<i>Ca (ppm)</i>
<b>Promedio</b>	18,4%	10,0%	6,03%	0,79%	409
<b>Desv. Estándar</b>	1,65%	2,6%	4,18%	0,92%	278

Fuente: (Broberg & Akesho, 2012)

Es usual encontrar incrustaciones en forma de CaCO<sub>3</sub> en intercambiadores de calor; las cuales son poco solubles en aguas y en soluciones alcalinas y en altos contenidos de sólidos secos, donde estas sales de sodio están más concentradas. Por otro lado, el carbonato de calcio puede co-precipitar con el carbonato de sodio en forma de una sal doble llamada Pirsonita, la cual es parcialmente soluble en agua. Los depósitos de estos tipos de incrustaciones son de color marrones, alrededor del 20% de calcio y, además, se disuelven en ácido.

El calcio presente en el licor negro presenta baja solubilidad, alrededor de 50ppb (microgramo/kg), además, debería precipitar inmediatamente en el licor negro por su alto contenido de ion carbonato ( $CO_3^{-2}$ ), sin embargo, los orgánicos presentes en el licor negro permiten niveles muchos más altos de calcio disuelto. Ahora bien, es difícil limitar los niveles de calcio en el licor negro, ya que, la mayoría de este proviene desde los chips de madera. El contenido típico de calcio disuelto en el licor negro es de alrededor de 200 a 2000 ppm(mg/kg) y, además, es necesario indicar que el calcio soluble proviene de la madera y no de la cal.

Para que se inicie el mecanismo de formación de incrustaciones el licor negro debe estar supersaturado de sólidos disueltos incrustantes, la superficie rugosa de la tubería tiene bordes irregulares microscópicos, en los cuales con el paso del tiempo se depositan los sólidos que pueden tener un tamaño entre 1-20micras<sup>5</sup>, un grano de arena es 50 veces más grande (1,000micras) que los sólidos incrustantes presentes en el licor negro. Con los cambios de presión, temperatura, y flujo, los sólidos incrustantes se agrupan convirtiéndose en granos y ocupan las superficies rugosas de la tubería hasta cubrir por completo la pared interna del tubo. Una vez cubierta la pared del tubo con incrustaciones, los nuevos granos incrustantes se aglomeran con los inicialmente incrustados, facilitándose así el crecimiento interno de la incrustación, reduciendo el área de flujo interior del tubo.

Dentro de las variables que más influyen en la formación de incrustaciones esta la:

**Sobresaturación:** La sobresaturación es simple y sencillamente la cantidad de minerales presentes en el licor negro, mientras más iones contenga el agua, mayor será la probabilidad de que se acumulen sedimentos minerales en los ductos, es el origen de todo el proceso denominado incrustaciones.

**Solubilidad:** Es la capacidad o facilidad que tiene una sustancia de disolverse en una determinada sustancia o medio. Para el estudio de las incrustaciones es muy importante este término, ya que si la solubilidad de los sólidos incrustantes presentes en el agua de formación es baja, será más fácil que se depositen y formen incrustaciones. La solubilidad se ve muy afectada por los cambios de temperatura que experimente el licor a través de los ductos y elementos superficiales de producción. La incrustación que más se ve afectada por el cambio de solubilidad es el carbonato de calcio, es por esta razón que es la común de encontrarse en los ductos.

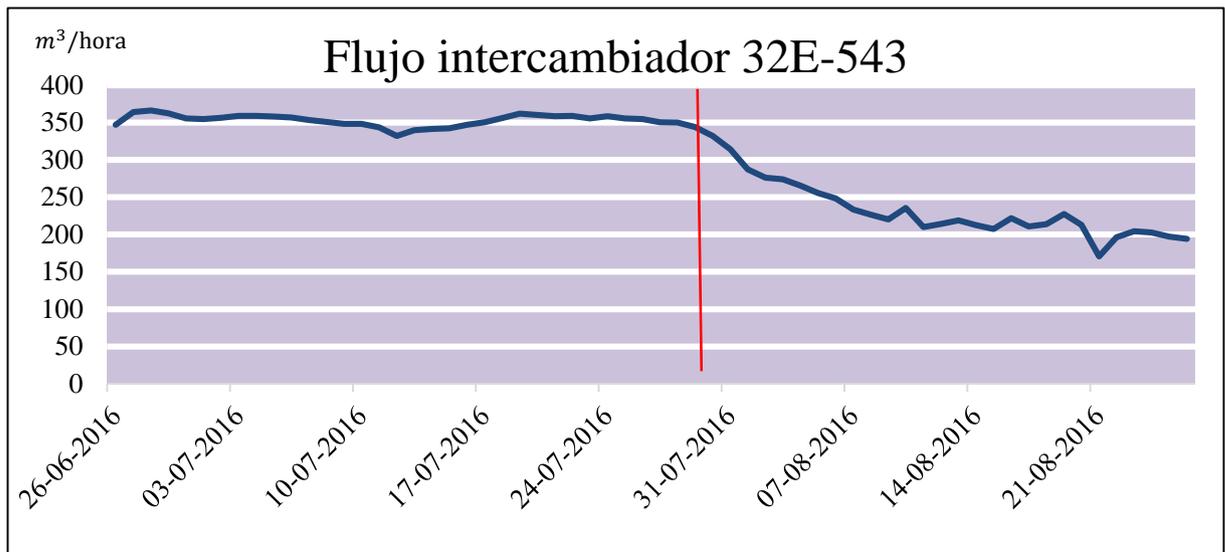
Hay que mencionar que una vez iniciado este proceso y dependiendo del tipo de incrustación, si no se inicia la inyección de inhibidores de incrustación para prever la formación de incrustaciones, con el paso del tiempo incrustaciones como el carbonato de calcio son prácticamente inamovibles y se deberá realizar la sustitución del elemento afectado por la incrustación (eliminación del tubo). Las incrustaciones de carbonato de calcio y sulfato de calcio pueden ser removidas con la inyección de ácido y después de remover la

incrustación se puede iniciar la inyección de productos para evitar que nuevamente se depositen minerales en la tubería y las incrustaciones remanentes.

Analizando la velocidad de ensuciamiento de los intercambiadores de calor de planta constitución se tiene que hasta los 35 días de operación del intercambiador de calor el flujo disminuye a una razón de  $1,75\text{m}^3/\text{día}$ , mientras que pasado los 35 días el flujo disminuye a una razón de  $4,4\text{m}^3/\text{día}$ , tal como se puede apreciar en el Gráfico 20.

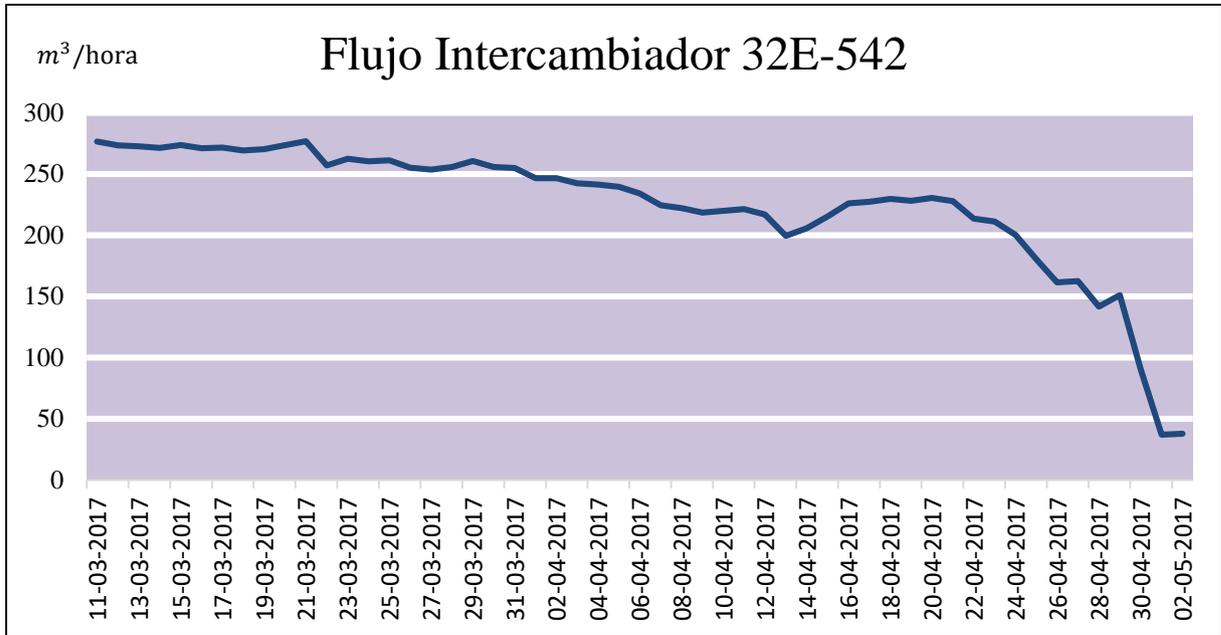
**Gráfico 20: Flujo intercambiador 32E-543**

*Fuente: Elaboración propia en base a datos tomados en terreno*



Mientras que el flujo para el intercambiador 32E-542 coincidentemente disminuye a una razón de  $1,75\text{m}^3/\text{día}$  hasta los 35 días de ahí en adelante su velocidad de disminución del flujo aumenta hasta  $6,4\text{m}^3/\text{día}$ . Tal como se puede ver en el Gráfico 21. Este efecto corrobora lo visto en la teoría donde se afirma que una vez cubierta la pared del tubo con incrustaciones, los nuevos granos incrustantes se aglomeran con los inicialmente incrustados, facilitándose así el crecimiento interno de la incrustación, aumentando la velocidad a la que se reduce el área de flujo interior del tubo.

Gráfico 21: Flujo Intercambiador 32E-542



Fuente: Elaboración propia en base a datos tomados en terreno

## 5.2. Propuesta a Problema de contaminación de condensado y filtración de licor al exterior

Se agrupan estos dos problemas puesto que tienen un origen en común el cual es una filtración de licor, si la filtración es al interior del intercambiador de calor, esta califica como contaminación de condensado, mientras que si la filtración de licor es al exterior del intercambiador de calor, el problema se clasifica como filtración de licor al exterior del intercambiador de calor.

Estas filtraciones se producen por un desgaste de la empaquetadura, la cual se termina rompiendo o por que los pernos que sujetan la empaquetadura ceden su apriete.

Por lo tanto se propone la opción de cambiar el tipo de empaquetadura existente, por una que ofrezca mayor confiabilidad, además de cambiar los pernos de sujeción cada vez que sea cambiada la empaquetadura.

En la Tabla 24 se presentan las alternativas disponibles de empaquetaduras aptas para los intercambiadores de calor presentes en el área de fibra

Tabla 24: Características empaquetaduras intercambiadores de calor

Situación actual	Propuesta 1	Propuesta 2
Empaquetadura Espirometálica de Garlock	Empaquetadura “Selco Seal Gasket” de Selco	Empaquetadura “Change Gasket” de Flexitallic
<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de un anillo interno y externo.</li> <li>• Vida útil: 70 días.</li> <li>• Fácil maniobrabilidad e instalación.</li> <li>• Compresión graduada, sin capacidad de recuperación.</li> <li>• Mediano rendimiento en aplicaciones de ciclo térmico.</li> <li>• Necesita reapriete</li> <li>• Junta contra incendios (API 6FB)</li> <li>• Costo Juego 4 empaquetaduras: US\$ 1.511</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de un anillo interno y externo.</li> <li>• Vida útil: 90 días.</li> <li>• Fácil maniobrabilidad e instalación.</li> <li>• Compresión graduada, sin capacidad de recuperación</li> <li>• Alto rendimiento en aplicaciones de ciclo térmico</li> <li>• No necesita reapriete</li> <li>• Junta contra incendios (API 6FB)</li> <li>• Costo Juego 4 empaquetaduras: US\$ 3.211</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No necesita de un anillo interno o externo</li> <li>• Vida útil :112 días</li> <li>• Es de fácil maniobrabilidad, se instala como una empaquetadura espirometálica.</li> <li>• Excelente compresión y recuperación (resiliencia)</li> <li>• Alto rendimiento en aplicaciones de ciclo térmico</li> <li>• No necesita reapriete</li> <li>• Junta contra incendios (API 6FB)</li> <li>• Costo Juego 4 empaquetaduras: US\$ 4.072</li> </ul>

Fuente elaboración propia en base a catálogo Garlock, SEICO y Flexitallic

Para la selección de la mejor alternativa tecnológica se hará uso de una matriz multicriterio, herramienta que permite la selección de opciones sobre la base de ponderación y aplicación

de criterios, permitiendo adoptar una decisión, priorizar y clarificar problemas, facilitando una óptima selección, (Aiteco Consultores, s.f.).

La selección de alternativa tecnológica se realizará en base a ciertos criterios de evaluación con la finalidad de que éstos permitan tomar la mejor decisión, por ello los criterios a considerar son los siguientes:

- ❖ Necesidad de anillo: Si la empaquetadura necesita un anillo exterior o interior para su sujeción.
- ❖ Requiere reapriete: Determina si la empaquetadura es necesario reapretarla en un periodo determinado.
- ❖ Vida útil: determina cuánto dura técnicamente el equipo por lo que el criterio es relevante considerarlo puesto que se debe conocer el periodo de duración de la inversión.
- ❖ Rendimiento en ciclos térmicos: Si la empaquetadura tiene la capacidad de adaptarse a los ciclos térmicos y no sufre deformaciones
- ❖ Costo: asociado al costo que la empresa debe pagar por la adquisición e implementación de la alternativa tecnológica.
- ❖ Maniobrabilidad e instalación: Se refiere a la facilidad para manipular la empaquetadura e instalarla.

Por medio de una matriz de priorización (ver Tabla 25) será posible establecer la ponderación de los criterios de evaluación antes mencionados, de acuerdo a la importancia que cada uno tenga respecto de otro, para lo cual se establece el valor de 1 si el criterio de la fila es más importante que el de la columna; valor 0 si el criterio de la fila es menos importante que el de la columna; y 0,5 si tienen igual importancia. Posterior a ello se realiza un sumatoria por filas y se obtiene la ponderación con respecto a la sumatoria total.

**Tabla 25: Ponderación de criterios empaquetaduras**

	Necesidad de anillo	Requiere reapriete	Vida útil	Rendimiento en ciclos térmicos	Costo	Maniobrabilidad e instalación	Total	Ponderación
Necesidad de anillo		0	0	0	0	0,5	<b>0,5</b>	3%
Requiere reapriete	1		0	0,5	1	1	<b>3,5</b>	23%
Vida útil	1	1		1	1	1	<b>5</b>	33%
Rendimiento en ciclos térmicos	1	0,5	0		1	1	<b>3,5</b>	23%
Costo	1	0	0	0		1	<b>2</b>	13%
Maniobrabilidad e instalación	0,5	0	0	0	0		<b>0,5</b>	3%
							<b>Total 15</b>	

Fuente: elaboración propia

**Tabla 26: Calificación de alternativas**

<b>Muy deficiente</b>	<b>0-2</b>
<b>Deficiente</b>	<b>3-4</b>
<b>Suficiente</b>	<b>5-6</b>
<b>Bueno</b>	<b>7-8</b>
<b>Muy bueno</b>	<b>9-10</b>

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la Tabla 26, se procede a calificar las alternativas de empaquetaduras para determinar cuál de éstas es la mejor alternativa para la empresa (ver Tabla 27).

**Tabla 27: Matriz de factores ponderados para empaquetaduras**

Criterios	Ponderación	Espirometálica	Selco Seal Gasket	Change Gasket
Necesidad de anillo	3%	4	4	7
Requiere reapriete	23%	4	7	7
Vida útil	33%	5	8	10
Capacidad de recuperación en ciclos térmicos	23%	5	7	10
Costo	13%	9	7	5
Facilidad de maniobrabilidad e instalación	3%	9	9	9
Promedio		5,28	7,16	<b>8,13</b>

Fuente: Elaboración propia

Tomando como base los resultados entregados por la matriz de factores ponderados, la mejor opción corresponde a la alternativa de empaquetadura “*Change Gasket*”, ya que ponderó 8,13 a diferencia de la alternativa de empaquetadura “*Selco Seal Gasket*”, ponderando con 7,16 y por último la empaquetadura que se usa actualmente ponderó 5,28. Como se observa, la brecha fue muy amplia entre la Empaquetadura “*change gasket*” y la empaquetadura espirometálica (usada actualmente), las alternativas distan entre sí por 2,85 puntos.

### **5.3. Propuesta a Problema de bajo rendimiento del intercambiador de calor**

Como se describió en la sección 5.1.3 el problema de bajo rendimiento del intercambiador de calor es una consecuencia de las condiciones operacionales del proceso de calentamiento del licor negro, las cuales no es posible modificarlas, por lo tanto este problema intrínseco no puede ser eliminado de raíz y se debe abordar desde el punto de vista de los métodos de limpieza disponibles.

Los métodos disponibles para enfrentar este problema se describen a continuación:

#### **5.3.1 Lavado químico**

El lavado químico implica recircular ácido inhibido por el interior de los tubos para disolver las incrustaciones. La limpieza química es un proceso de varias etapas que busca eliminar todas las incrustaciones existentes en el interior de los tubos del intercambiador de calor. El lavado químico puede llevarse a cabo a diferentes concentraciones y diferentes temperaturas, los cuales son factores cruciales que determinan la efectividad del lavado químico.

Esta etapa ácida es potencialmente dañina para el intercambiador, por lo tanto, requiere un monitoreo cuidadoso para evitar una pérdida grave de metal.

En planta constitución para realizar el lavado químico se utiliza ácido fórmico, el cual ha sido probado y resulta ser inerte con las tuberías de acero inoxidable.

En base a los registros históricos se tiene que el lavado químico presenta óptimos resultados realizándose a una concentración inicial superior a  $75 \text{ gr/lts}$  y a una temperatura

de 70°C, reestableciendo el flujo del intercambiador de calor hasta en un 85%. Su ventaja es que no requiere destapar el intercambiador de calor.

### 5.3.2 Limpieza alta presión 6000 psi

Consiste en la remoción de las incrustaciones en el interior de los tubos mediante el impacto de chorros de agua a alta presión (6000psi), los cuales son impulsados por bombas con sus respectivas mangueras, boquillas y accesorios seleccionados para cada caso. En la Ilustración 18 se puede apreciar un lavado a 6000psi.

Su desventaja es que es necesario destapar el intercambiador de calor y puede llegar a romper tubos del intercambiador de calor.

Su efectividad depende del grado de incrustación del intercambiador de calor, de los registros históricos de limpiezas a alta presión a 6000psi se tiene que su efectividad fluctúa entre un 40 a 70%.

**Ilustración 18: Lavado a alta presión 6000psi**



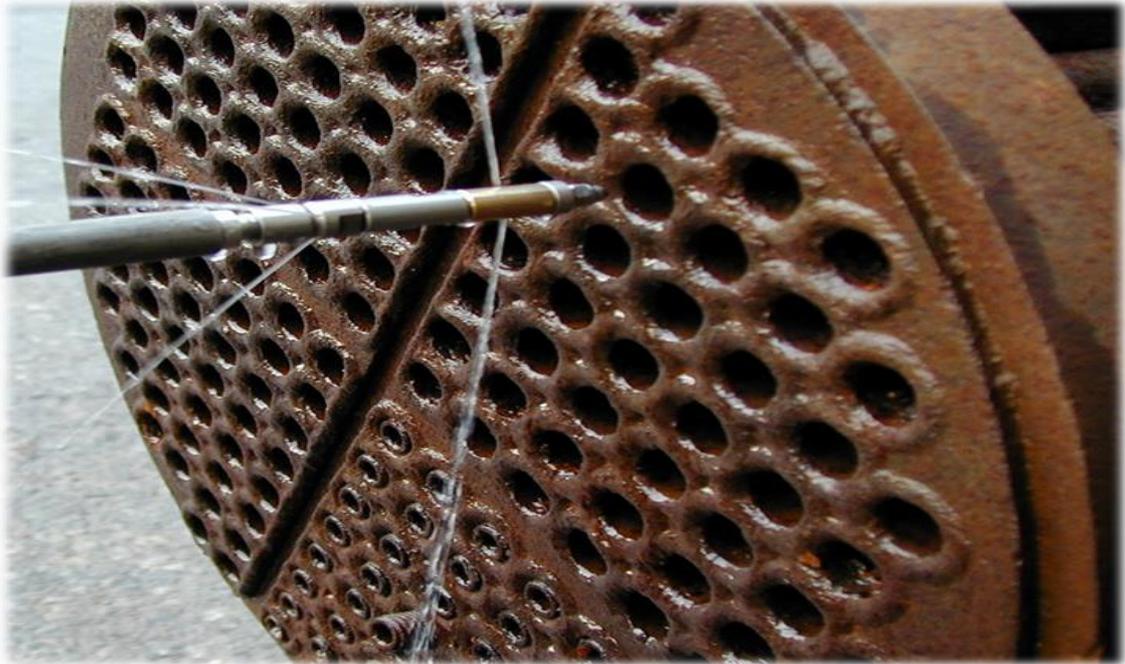
*Fuente: Nexxo S.A*

### 5.3.3 Limpieza alta presión 15000 psi

Consiste en la remoción de las incrustaciones en el interior de los tubos mediante el impacto de chorros de agua a alta presión (15000psi), los cuales son impulsados por bombas con sus respectivas mangueras, boquillas y accesorios seleccionados para cada caso. En la Ilustración 19 se aprecia una boquilla utilizada para limpieza a 15000psi.

Su desventaja es que es necesario destapar el intercambiador de calor y puede llegar a romper tubos del intercambiador de calor. Este método de limpieza resulta ser el más efectivo, no obstante, es el más costoso.

Ilustración 19: Boquillas utilizadas en limpieza a 15000psi



Fuente: Nexxo

### 5.3.4 Resumen de características métodos de limpieza

En la Tabla 28 se resumen las características de los métodos de limpieza disponibles para los intercambiadores de calor.

Tabla 28: Métodos de limpieza

Lavado químico con ácido fórmico	Limpieza alta presión a 6000psi	Limpieza alta presión 15000psi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demora en promedio 12 horas</li> <li>• No requiere (des)tapar intercambiador</li> <li>• Es realizada por personal de planta (disponibilidad inmediata)</li> <li>• Costo: US\$1.128 por intercambiador.</li> <li>• Efectividad: 30-85%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demora en promedio 30 horas por intercambiador.</li> <li>• Requiere (des)tapar intercambiador</li> <li>• Es realizado por empresa local (Disponibilidad inmediata)</li> <li>• Costo: US\$ 2.319 por intercambiador</li> <li>• Efectividad: 40 – 70%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demora en promedio 10 horas por intercambiador.</li> <li>• Requiere (des)tapar intercambiador</li> <li>• Es realizada por empresa nacional (Requiere planificación anticipada)</li> <li>• Costo: US\$3.018 por intercambiador</li> <li>• Efectividad: 95%</li> </ul>

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en terreno

Para la selección del mejor método de limpieza se hará uso de una matriz multicriterio, herramienta que permite la selección de opciones sobre la base de ponderación y aplicación de criterios, permitiendo adoptar una decisión, priorizar y clarificar problemas, facilitando una óptima selección, (Aiteco Consultores, s.f.).

La selección del método de limpieza se realizará en base a ciertos criterios de evaluación con la finalidad de que éstos permitan tomar la mejor decisión, por ello los criterios a considerar son los siguientes:

- ❖ **Tiempo de limpieza:** Tiempo que el equipo está fuera de servicio, mientras se está limpiando
- ❖ **Requiere des(tapar):** Determina si es necesario (des)tapar el intercambiador de calor, lo cual supone un tiempo y costo extra
- ❖ **Disponibilidad:** Se refiere a la rapidez con que es posible acceder a este servicio.
- ❖ **Costo:** asociado al costo que la empresa debe pagar por el uso de este método de limpieza.

- ❖ **Efectividad:** Se refiere a la efectividad de la limpieza en la remoción de incrustaciones, para los casos que presentan una efectividad variable se tomara la mediana para efectos de cálculos.

Por medio de una matriz de priorización (ver Tabla 29) será posible establecer la ponderación de los criterios de evaluación antes mencionados, de acuerdo a la importancia que cada uno tenga respecto de otro, para lo cual se establece el valor de 1 si el criterio de la fila es más importante que el de la columna; valor 0 si el criterio de la fila es menos importante que el de la columna; y 0,5 si tienen igual importancia. Posterior a ello se realiza un sumatoria por filas y se obtiene la ponderación con respecto a la sumatoria total.

**Tabla 29: Ponderación de criterios métodos de limpieza**

	Tiempo de limpieza	Requiere destapar	Disponibilidad	Costo	Efectividad	Total	Ponderación
Tiempo de limpieza		0,5	0	0,5	0	<b>1</b>	10%
Requiere destapar	0,5		1	1	0	<b>2,5</b>	25%
Disponibilidad	1	0		1	0	<b>2</b>	20%
Costo	0,5	0	0		0,5	<b>1</b>	10%
Efectividad	1	1	1	0,5		<b>3,5</b>	35%
<b>Total</b>						<b>10</b>	

Fuente: elaboración propia

Utilizando la Tabla 30, se procede a calificar las alternativas de empaquetaduras para determinar cuál de éstas es la mejor alternativa para la empresa (ver Tabla 31).

**Tabla 30: Calificación de alternativas métodos de limpieza**

<b>Muy deficiente</b>	0-2
<b>Deficiente</b>	3-4
<b>Suficiente</b>	5-6
<b>Bueno</b>	7-8
<b>Muy bueno</b>	9-10

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 31: Matriz de factores ponderados para métodos de limpieza**

<b>Criterios</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Lavado químico</b>	<b>limpieza alta presión 6.000psi</b>	<b>limpieza alta presión 15.000psi</b>
<b>Tiempo de limpieza</b>	10%	7	5	8
<b>Requiere destapar</b>	25%	10	4	4
<b>Disponibilidad</b>	20%	9	7	4
<b>Costo</b>	10%	10	6	4
<b>Efectividad</b>	35%	6	6	10
<b>Promedio</b>		<b>8,1</b>	5,6	6,5

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos por la matriz de factores ponderados, la mejor opción corresponde al método de limpieza “lavado Químico”, ya que ponderó 8,1 a diferencia de la alternativa de empaquetadura “Limpieza a alta presión 6000psi”, ponderando con 6,5 y por último la limpieza a alta presión a 6000psi ponderó 5,6.

Por lo tanto se elige como método de limpieza el lavado químico, los cuales deben ser realizados en periodos menores o igual a 35 días (punto en que aumenta la velocidad de ensuciamiento del intercambiador de calor).

Puesto que la máxima efectividad del lavado químico es de un 85%, esto ocasionará que en cada lavado queden restos de incrustaciones, los cuales se irán acumulando progresivamente en el tiempo, haciendo necesario optar por un método de limpieza que presente mayor efectividad como lo es el lavado de alta presión de 15000psi, por lo que en conjunto con el equipo de profesionales del área de fibra, se elige como “*set point*” cuando el flujo del intercambiador de calor este en un valor menor o igual a  $150\text{m}^3/\text{hora}$  se hace necesario realizar una limpieza a a alta presión de 15000psi, no se considera el uso de limpieza a alta presión de 6000psi, puesto que presenta efectividad similar al lavado químico.

# **CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL PROYECTO**

*En el presente capítulo se presenta la evaluación del impacto del proyecto en la empresa, considerando las repercusiones económicas que tiene, como en las decisiones y en la organización de las actividades.*

## 6.1 Costos asociados proyecto cambio de empaquetaduras

La empaquetadura seleccionada corresponde a la empaquetadura “Change Gasket”, la cual es diseñada, patentada y fabricada exclusivamente por la empresa Flexitallic, tratándose de un producto innovador en el rubro de las empaquetaduras. Por lo tanto es el único proveedor, al cual fue realizada una cotización para cada una de las 4 empaquetaduras que utiliza cada intercambiador de calor, los resultados de la cotización se presentan en la Tabla 32.

**Tabla 32: Costos empaquetadura "Change Gasket"**

<b>Empaquetadura "Change Gasket"</b>			
<b>Ubicación</b>	<b>Código SAP</b>	<b>Precio US\$</b>	<b>Cantidad</b>
Superior Interno (Segmentos)(Fig.B)	S00005773	946	1c/U
Superior Exterior(Fig.A)	S00005771	1.145	1c/U
Inferior (Fig.C)	S00005772	1.067	1c/U
Inferior (Fig.D)	S00005770	914	1c/U
<b>Total</b>		4.072	

*Fuente: elaboración propia en base a cotización realizada a Flexitallic*

Si se compara con los costos de la empaquetadura actual, los cuales se muestran en la Tabla 33.

**Tabla 33: Costos empaquetadura espirometálica**

<b>Empaquetadura Espirometálica</b>			
<b>Ubicación</b>	<b>Código SAP</b>	<b>Precio US\$</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Superior Interno (Segmentos)(Fig.B)</b>	92684	230	1c/U
<b>Superior Exterior(Fig.A)</b>	92685	888	1c/U
<b>Inferior (Fig.C)</b>	92686	252	1c/U
<b>Inferior (Fig.D)</b>	97696	141	1c/U
<b>Total</b>		1.511	

*Fuente: elaboración propia en base a información extraída desde SAP*

Se conoce que la duración promedio de una empaquetadura espirometalica es de 70 días, mientras que la empaquetadura “Change Gasket”, ofrece una duración un 60% superior, lo que se traduce en una duración de 112 días, además se conoce que un cambio de

empaquetaduras significa una pérdida de producción avaluada en US\$20.600. Información que se presenta en la Tabla 34.

**Tabla 34: Tabla comparativa empaquetaduras**

	Empaquetadura Espirometálica	Empaquetadura “Change Gasket”
<b>Duración promedio (días)</b>	70	112
<b>Frecuencia de cambio (veces por año)</b>	5,21	3,25
<b>Costo juego de empaquetaduras (US\$)</b>	1.511	4.072
<b>Costo por perdida producción (US\$)</b>	20.600	20.600
<b>Costo anual (US\$)</b>	115.198	80.184
<b>Diferencia (US\$)</b>	35.014	

*Fuente: elaboración propia*

Se observa que al implementar el cambio de empaquetaduras de tipo “Change Gasket” se obtiene un ahorro esperado de US\$35.014 anuales, respecto al tipo de empaquetaduras que se utilizan actualmente.

## **6.2 Costos asociados a método de lavado químico mas limpieza a alta presión 15000psi**

La propuesta consiste en realizar lavados químicos cada 35 días y realizar una limpieza a alta presión de 15000psi, cuando el intercambiador de calor presente un flujo menor o igual a  $150\text{m}^3/\text{hora}$ .

Realizando una simulación de este escenario en donde un intercambiador de calor presenta un flujo inicial de  $250 \text{ m}^3/\text{hora}$  y una velocidad de ensuciamiento de  $1,75 \text{ m}^3/\text{día}$ , el lavado químico presenta una efectividad de un 70%, mientras que la efectividad del lavado a alta presión (15000psi) es de un 90%.

Bajo estas condiciones se da la siguiente situación

**Ilustración 20: Simulación propuesta de mejora métodos de limpieza**

Días	Flujo inicial (m3/hora)	Flujo post limpieza (m3/hora)	Limpieza
0		250	
35	189	232	
70	170	213	Lavado químico
105	152	195	
140	134	238	Lavado alta presión
175	177	220	
210	159	202	Lavado químico
245	140	183	
280	122	237	Lavado alta presión
315	176	219	
350	158	200	Lavado químico
385	139	182	

Fuente: Elaboración propia

Se espera realizar 8 lavados químicos y dos limpiezas de alta presión de 15000psi, anualmente, los costos de ambos métodos de limpieza se presentan en la Tabla 35.

**Tabla 35: Costos lavado químico**

	Lavado químico	Lavado alta presión (15000psi)
Frecuencia	8 veces por año	2 veces por año
Costo unitario (US\$)	1128	3018
Costo anual (US\$)	9024	6036
Costo Total anual (US\$)	15060	

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la combinación de estas dos alternativas significa un costo de US\$15.060 anuales, estos valores se obtienen bajo un escenario optimista. Estos valores están sujetos a cambiar, mientras varíe el porcentaje de efectividad de cada método de limpieza, los porcentajes elegidos para realizar la simulación son los más frecuentes.

**Tabla 36: Situación histórica**

	<b>Lavado químico</b>	<b>Limpieza alta presión (15000psi)</b>
Frecuencia	2 veces por año	6 veces por año
Costo unitario (US\$)	1.128	2.319
Costo anual (US\$)	2.256	13.914
Costo Total anual (US\$)	16.170	

*Fuente: Elaboración propia*

Si se compara la situación proyectada con la situación histórica de limpieza a los intercambiadores, la cual se presenta en la Tabla 36, se puede apreciar que no existe diferencia muy significativa en cuanto a costos (US\$1.110 anuales), no obstante la diferencia radica en el nivel de limpieza que presentan los intercambiadores, puesto que históricamente no han mantenido flujos estables y siendo limpiados por medio de limpieza a alta presión de 6000psi la cual se demostró que es deficiente y siempre deja restos, perdiendo eficiencia el intercambiador de calor.

## CONCLUSIONES

En base al estudio realizado se logra concluir la importancia que tienen los equipos intercambiadores de calor dentro del proceso productivo de la celulosa, puesto que el área de fibra corresponde al núcleo del proceso productivo, un intercambiador dentro de esta área tiene la misma importancia que un digestor, puesto que ambos son esenciales para llevar a cabo la cocción de astillas (proceso principal en la obtención de celulosa).

Por lo tanto que los equipos intercambiadores de calor presenten un desempeño deficiente o estén en constantes paradas, afecta la producción, ya sea por detener una o más líneas o simplemente el bajo rendimiento afecta en la velocidad del proceso de cocción.

Planta Constitución era consciente de que existía un problema asociado a los intercambiadores de calor, pero nunca se había logrado cuantificar y describir la incidencia que este presentaba, además Planta Constitución tenía a su disposición herramientas para afrontar estos problemas, pero no existía claridad de que método era el más adecuado aplicar, y si realmente convenía aplicar alguna de estas alternativas desde el punto de vista económico.

En este trabajo se logró entregar dos propuestas las cuales ayudan a disminuir los tiempos fuera de servicio de los equipos intercambiadores de calor, no obstante por temas de alcance y de tiempo, no se examinaron nuevas propuestas de alternativas de solución, por lo cual se deja como recomendación analizar otras alternativas, como lo es para la propuesta asociada al bajo rendimiento de los intercambiadores de calor el analizar realizar lavados químicos con otro tipo ácido, puesto que existen otros ácidos que presentan un mejor desempeño en la remoción de incrustaciones pero hace necesario ver las contraindicaciones, respecto a la propuesta de cambio de empaquetaduras, hace necesario estar vigilando el mercado, puesto que se trata de una industria que presenta constante innovación y puede aparecer un producto que presente un mejor desempeño que el propuesto

## Bibliografía

- Ackoff, R. I. & Sasieni, M. W., 1968. *Fundamentals of Operations Research*. s.l.:s.n.
- Aguirre, E. & Martínez, E., 1983. *Selección de la mejor alternativa en lo que respecta al estudio de intercambiadores de calor*, s.l.: s.n.
- Ahumada, O. & Villalobos, J. R., 2011. Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. *International Journal of Production Economics*.
- Aiteco Consultores, s.f.. [En línea] Available at: <http://www.aiteco.com> [Último acceso: 03 09 2016].
- Alvarez Ramirez, M. A., 2017. *APLICACION DE JUNTAS DE EXPANSIÓN EN PLANTAS INDUSTRIALES*, Valparaíso: UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA.
- Alvear, A., 2010. *PLAN DE MEJORAMIENTO DE LOS TIEMPOS*, Curicó: s.n.
- Amavi, G., 2010. *ANÁLISIS FMECA A SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE PLATINAS DE REFINADORA DE PULPA DE PAPEL DISEÑADA PARA PAPELERA GUBELIN LTDA*, s.l.: s.n.
- Anon., 2015. *Bcentral*. [En línea] Available at: <http://www.bcentral.cl/estudios/documentos-trabajo/pdf/dtbc617.pdf> [Último acceso: Junio 2015].
- Ballou, R. H., 2004. *Administración de la Cadena de Suministro*. s.l.:s.n.
- Banco Mundial, E., 2014. *datos.bancomundial.org*. [En línea] Available at: [http://datos.bancomundial.org/pais/china#cp\\_gep](http://datos.bancomundial.org/pais/china#cp_gep) [Último acceso: 29 marzo 2015].
- Bard, J. F. & Nananukul, N., 2010. A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem. *Computer and Operations Research*.
- Bermúdez Colina, Y., s.f. Applications of linear, mixed and integer programming. En: *Actualidad y nuevas tendencias*. s.l.:s.n., pp. 85-104.
- Blichke, W. & Murthy, P., 2003. *Case studies in reliability and maintenance*. s.l.:s.n.
- Bowles, J. & Bonnell, R., 1998. *Failure mode, Effects and Criticality analysis*. s.l., s.n.
- Broberg, A. & Akesjo, A., 2012. *Experimental investigation and modelling of sodium scale dissolution rates in black liquor evaporators*, Göteborg, Sweden: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Caceres, L., 2016. [Entrevista] (Junio 2016).
- Cañas, M., 2015. *El Mercurio*. [En línea] Available at: <http://www.elmercurio.com/Inversiones/Noticias/Acciones/2014/07/08/Cual-es-el-premio-por-riesgo-de-la-bolsa-local.aspx> [Último acceso: 2016].
- Cengel, Y. A., 2007. *Transferencia de calor y masa*. 3ra Edición ed. Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Chaneski, W. S., 1998. Reviewing Seven Tools For Quality Management. En: s.l.:s.n., pp. 50-51.
- Comisión Nacional de Energía, 2016. *Bencina en línea*. [En línea] Available at: <http://www.bencinaenlinea.cl/web2/buscador.php?region=9>
- Cortez, K., 2014. *Diagrama Causa efecto*. [En línea] Available at: <https://kcortezh.weebly.com/uploads/4/1/3/6/41365833/diagrama-causa-efecto.docx>

- Díaz-Madroño, M., Peidro, D. & Mula, J., 2015. A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions. *Computer & Industrial Engineering*.
- Dudbridge, M., 2011. *Handbook of Lean Manufacturing in the Food Industry*. s.l.:Wiley-Blackwell.
- Ferrer, J.-C. y otros, 2007. An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*.
- Ghiani, G., Laporte, G. & Musmano, R., 2004. *Introduction to Logistics Systems Planning*. s.l.:s.n.
- Grupo Lanzco, 2016. *Lanzco*. [En línea] Available at: <http://www.lanzco.cl/Rentaequip/torresdeiluminacion/>
- Guomundsson, O., 2008. *Detection of fouling in heat exchangers*, s.l.: University of Iceland.
- Hartman, M. G., 2001. *Quality Progress*. [En línea] Available at: <http://asq.org/quality-progress/2001/09/problem-solving/separe-los-pocos-vitales-de-los-muchos-triviales.html> [Último acceso: Octubre 2018].
- Higgins, A., 2004. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operation Research*.
- Hillier, F. & Lieberman, G., 2002. *Introducción a la Investigación de Operaciones*. s.l.:s.n.
- IBM, 2016. *IBM*. [En línea] Available at: [https://www-112.ibm.com/software/howtobuy/buyingtools/paexpress/Express?P0=E1&part\\_number=D0C V0LL,D0LF1LL,D0TKXLL,D0TLFLL,D0CV2LL,D12N0LL,D120VLL,D16I8LL&catalogLocale=es\\_ES&Locale=es\\_ES&country=ESP&PT=jsp&CC=ESP&VP=&TACTICS=&S\\_TACT=&S\\_CMP=&brand=SSUG5H](https://www-112.ibm.com/software/howtobuy/buyingtools/paexpress/Express?P0=E1&part_number=D0C V0LL,D0LF1LL,D0TKXLL,D0TLFLL,D0CV2LL,D12N0LL,D120VLL,D16I8LL&catalogLocale=es_ES&Locale=es_ES&country=ESP&PT=jsp&CC=ESP&VP=&TACTICS=&S_TACT=&S_CMP=&brand=SSUG5H)
- IBRAHIM, H., 2012. *Fouling in Heat Exchangers, MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific*, s.l.: s.n.
- Instituto de Salud Publica, 2017. *ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICO DE RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN*, s.l.: s.n.
- Inzunza, J., s.f. *UDEC*. [En línea] Available at: <http://www2.udec.cl/~jinzunza/fisica/cap15.pdf> [Último acceso: 17 Octubre 2018].
- Jara Cardenas, A., 2014. *Estudio de mantenimiento basado en la confiabilidad acorde al sistema ASSET Management aplicado a la flota de bulldozer Cat D10T, Minera Anglo American Operación Mantoverde*, Concepción: s.n.
- K.J. Bell, A. C. M., 2001. *Engineering Data Book II*. s.l.:Wolverine Tube, Inc.
- Lamsal, K., Jones, P. C. & Thomas, B. W., 2015. Harvest logistics in agricultural systems with multiple, independent producers and no on-farm storage. *Computer & Industrial Engineering*.
- LIGNUM, 2018. Forestales apuestan a que precios de la celulosa se mantendrán altos. *LIGNUM*.
- Map, T., 2014. *Trade Map - International Trade Statistics*. [En línea] Available at: [https://www.trademap.org/tradestat/Country\\_SelProduct\\_TS.aspx?nvpm=3||||4804||||4|1|1|2|2|1|2|1|1](https://www.trademap.org/tradestat/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=3||||4804||||4|1|1|2|2|1|2|1|1) [Último acceso: 2018].

- Ministerio de Hacienda, 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.hacienda.cl/indicadores/inflacion-12-meses.html>
- Minitab, 2018. *Soporte de Minitab*. [En línea]  
Available at: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/supporting-topics/pareto-chart-basics/>  
[Último acceso: Octubre 2018].
- Mira, J. M., 2013. *Chile Alimentos*. [En línea]  
Available at: <http://www.chilealimentos.com/2013/images/Seminarios/2013/Conservas/Juan%20Manuel%20Mira%20VERSION%20FINAL.pdf>
- Ocampo, J. R., 2012. *Integrando la Metodología DMAIC de Seis Sigma con la*, Ciudad de Panamá: s.n.
- ODEPA, 2013. *ODEPA*. [En línea]  
Available at: <http://www.odepa.cl/odepaweb/publicaciones/doc/11024.pdf>
- Ramos, A. y otros, 2010. *Modelos Matemáticos de Optimización*, s.l.: s.n.
- Sandei, 2016. *Sandei*. [En línea]  
Available at: <http://www.mts-sandei.com/>
- SII, 2014. [En línea]  
Available at: [http://www.sii.cl/portales/reforma\\_tributaria/mapa\\_reformatributaria.pdf](http://www.sii.cl/portales/reforma_tributaria/mapa_reformatributaria.pdf)
- SII, 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2016.htm>
- Sugal Chile, 2016. *Sugal Chile*. [En línea]  
Available at: <http://www.sugalchile.cl/>
- Tapia, J., 2016. *PROPUESTA DE MEJORA PARA LA REDUCCION DE TIEMPOS MUERTOS EN*, Concepción: UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION.
- Tyagi, S., Choudhary, A. & Yang, K., 2014. Value Stream Mapping to Reduce The Lead-Time of a Product. *Int. J. Production Economics*.

# **ANEXOS**

**Anexo 1: Especificaciones técnicas intercambiador 32e-143**

<b>Intercambiador E143</b>	
<b>Numero de tubos</b>	203
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	8,22
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa (deflectores)</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío (kg)</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1989

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

## Anexo 2 : Especificaciones técnicas intercambiador 32e-213

<b>Intercambiador E213</b>	
<b>Posición</b>	Vertical
<b>Numero de tubos</b>	324
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Diámetro exterior (mm)</b>	1100
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	7,518
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1971

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 3: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-223**

<b>Intercambiador E223</b>	
<b>Numero de tubos</b>	324
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	8,22
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1971

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 4: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-243**

<b>Intercambiador E243</b>	
<b>Numero de tubos</b>	324
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	8,22
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1971

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 5: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-313**

<b>Intercambiador E313</b>	
<b>Numero de tubos</b>	324
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	8,22
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1971

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 6: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-323**

<b>Intercambiador E323</b>	
<b>Numero de tubos</b>	324
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	8,22
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1971

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 7: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-333**

<b>Intercambiador E333</b>	
<b>Numero de tubos</b>	324
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	8,22
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1971

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 8: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-343**

<b>Intercambiador E343</b>	
<b>Numero de tubos</b>	324
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,955
<b>Largo total (mts)</b>	8,22
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1971

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 9: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-443**

<b>Intercambiador E343</b>	
<b>Numero de tubos</b>	438
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	7,92
<b>Largo total (mts)</b>	9,2
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	3
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	1
<b>Pasos por la carcasa</b>	14
<b>Peso en operación (kg)</b>	12000
<b>Peso vacío</b>	9353
<b>Año de fabricación</b>	1981

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 10: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-56**

<b>Intercambiador E56</b>	
<b>Numero de tubos</b>	300
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	7,925
<b>Largo total (mts)</b>	8,433
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	4
<b>Peso en operación (kg)</b>	7200
<b>Peso vacío (kg)</b>	5000
<b>Año de fabricación</b>	1995

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 11: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-57**

<b>Intercambiador E57</b>	
<b>Numero de tubos</b>	300
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	7,925
<b>Largo total (mts)</b>	8,433
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	4
<b>Peso en operación (kg)</b>	7200
<b>Peso vacío (kg)</b>	5000
<b>Año de fabricación</b>	1995

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

**Anexo 12: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-58**

<b>Intercambiador E58</b>	
<b>Numero de tubos</b>	336
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	9,144
<b>Largo total (mts)</b>	9,7028
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	4
<b>Pasos por la carcasa</b>	1
<b>Peso en operación (kg)</b>	9221
<b>Peso vacío</b>	6727
<b>Año de fabricación</b>	1995

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

## Anexo 13: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-59

<b>Intercambiador E59</b>	
<b>Numero de tubos</b>	336
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	9,144
<b>Largo total (mts)</b>	9,7028
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	4
<b>Pasos por la carcasa</b>	1
<b>Peso en operación (kg)</b>	9221
<b>Peso vacío</b>	6727
<b>Año de fabricación</b>	1995

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

## Anexo 14: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-64

<b>Intercambiador E64</b>	
<b>Numero de tubos</b>	1528
<b>Diámetro haz tubular (mts)</b>	1,4224
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	6,096
<b>Largo total (mts)</b>	7,0104
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	8
<b>Pasos por la carcasa</b>	1
<b>Peso en operación (kg)</b>	29670
<b>Peso vacío (kg)</b>	21500
<b>Año de fabricación</b>	1995

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

## Anexo 15: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-65

<b>Intercambiador E65</b>	
<b>Numero de tubos</b>	350
<b>Diámetro haz tubular (mts)</b>	0,71
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	7,92
<b>Largo total (mts)</b>	8,48
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	6
<b>Pasos por la carcasa</b>	1
<b>Peso en operación (kg)</b>	8851
<b>Peso vacío (kg)</b>	6591
<b>Año de fabricación</b>	1995

Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo

## Anexo 16: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-542

<b>Intercambiador E542</b>	
<b>Numero de tubos</b>	294
<b>Diámetro haz tubular (mts)</b>	0,66
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	9,14
<b>Largo total (mts)</b>	9,82
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	1
<b>Peso en operación (kg)</b>	8522
<b>Peso vacío (kg)</b>	6250
<b>Año de fabricación</b>	1995

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*

## Anexo 17: Especificaciones técnicas intercambiador 32E-543

<b>Intercambiador E543</b>	
<b>Numero de tubos</b>	294
<b>Diámetro haz tubular (mts)</b>	0,66
<b>Material haz tubular</b>	SA-240-316L
<b>Largo haz tubular (mts)</b>	9,14
<b>Largo total (mts)</b>	9,82
<b>Diámetro tubos (cm)</b>	2,54
<b>Grosor tubos (mm)</b>	1,245
<b>Pasos por los tubos</b>	2
<b>Pasos por la carcasa</b>	1
<b>Peso en operación (kg)</b>	8522
<b>Peso vacío (kg)</b>	6250
<b>Año de fabricación</b>	1995

*Fuente: Elaboración propia en base a información de catalogo*