

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Valparaíso Chile**



**PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO PARA  
EL SISTEMA DE ABATIMIENTO DE UNA CENTRAL  
TERMOELÉCTRICA**

**EDUARDO SEBASTIÁN SAAVEDRA ROJAS**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO  
INDUSTRIAL**

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.**

**PROFESOR CORREFERENTE: ING. VICTOR BAEZA V.**

**DICIEMBRE - 2023**



**CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE  
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO**

**1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO**

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Propuesta de plan de mantenimiento para el sistema de distribución de una central termoeléctrica

Nombre del candidato(a): EdUARDO SEBASTIÁN SAAVEDRA ROJAS

Carrera / Grado: Ingeniería Mecánica Industrial

Campus: CABA Central Departamento: Ingeniería Mecánica

**2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS**

Yo, Nario Toledo Torres, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)

del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

**3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)**

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**4.- FIRMAS**

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/11/2025 Firma: [Firma]

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/11/2025 Firma: [Firma]

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

---

## Agradecimientos

Para comenzar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia por el apoyo incondicional en cada etapa de este largo trayecto; sin ellos a mi lado, no habría logrado superar los desafíos personales y familiares de este proceso. Una mención especial a mi madre, Rossana Rojas, quien en el momento más difícil de la carrera supo encontrar las palabras precisas para renovar mis ánimos y mis ganas de seguir adelante.

A mi pareja María José Lagos, por brindarme su amor, confianza, temple, apoyo y ganas en los momentos más complejos en el desarrollo de este trabajo. A pesar de las dificultades externas e internas que experimente en esta etapa, siempre tuvo una palabra, un cariño o simplemente un momento para escucharme y alentarme para seguir adelante. Sin su apoyo, nada de estos hubiese sido posible, hasta el último día de presentación y como sigue siendo hoy en día, el pilar fundamental de mi vida.

Asimismo, agradezco a todos mis amigos que me acompañaron durante estos años: a los de infancia en Limache, por estar presentes a pesar de la distancia, y a mis compañeros de carrera, con quienes formamos la familia "Club Social y Deportivo Pichicatas", que hasta el día de hoy nos sigue manteniendo juntos.

En el ámbito académico, agradezco a los profesores, ayudantes y todos los que conforman esta institución. Especialmente a mi profesor guía, Mario Toledo, por su orientación técnica, sus críticas constructivas y, sobre todo, por su calidad humana y apoyo ante los imprevistos surgidos.

Finalmente, mi gratitud a la empresa AES y especialmente a mi jefatura, Víctor Baeza. Gracias por abrirme las puertas al mundo laboral, confiar en mis capacidades sin tener experiencia previa y participar directamente en este trabajo como correferente, entregándome las herramientas y confianza para iniciar mi desarrollo profesional.

---

## Resumen

En el contexto de mejora continua de la gestión de mantenimiento en la Central Termoeléctrica Ventanas, el presente trabajo de titulación propone un plan de mantenimiento para el sistema de abatimiento “Fabric Filter”, con el objetivo de incrementar su disponibilidad y optimizar el uso de recursos.

A partir del levantamiento de información técnica, el historial de fallas y el mantenimiento actualmente aplicado al sistema, se realizó una jerarquización de componentes mediante una matriz de criticidad. Como resultado, se identificaron cinco equipos de alta criticidad: bolsas filtrantes, lampos de entrada, válvulas poppet, válvulas de pulsos de aire y transmisores de presión diferencial.

Sobre esta base, se efectuó un análisis de fallas utilizando las metodologías RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) y AMFE (Análisis Modal de Fallas y Efectos), con el fin de determinar los modos de falla y definir actividades de mantenimiento preventivo y predictivo para cada componente.

Posteriormente, se programaron las actividades propuestas, junto con rutas de inspección y pautas de mantenimiento para los equipos críticos. Finalmente, se estableció el presupuesto anual estimado para el sistema “Fabric Filter” de cada unidad de la Central Termoeléctrica Ventanas, el cual asciende a CLP \$112.464.000.

**Palabras claves:** Fabric Filter, Mantenimiento, Pulse Jet, Central Termoeléctrica.

---

## Abstract

In the context of continuous improvement in maintenance management at the Ventanas Thermoelectric Power Plant, this thesis proposes a maintenance plan for the “Fabric Filter” abatement system, aiming to increase system availability and optimize resource utilization.

Based on technical structure, failure history, and current maintenance practices, a criticality matrix was developed to prioritize system components. As a result, five highly critical components were identified: filter bags, inlet dampers, poppet valves, pulse air valves, and differential pressure transmitters.

A failure analysis was then conducted using the RCM (Reliability-Centered Maintenance) and FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) methodologies to determine failure modes and define preventive and predictive maintenance activities for each component.

The proposed activities were scheduled, including inspection routes and maintenance guidelines for the most critical equipment. Finally, the annual budget for the “Fabric Filter” system of each unit at the Ventanas Thermoelectric Power Plant was estimated at CLP \$112,464,000.

**Keywords:** maintenance, criticality, RCM, FMEA, availability, Fabric Filter.

---

## Listado de símbolos

SO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
PM	Material particulado
MW	Megavatio
°C	Grado
bar	Bares
kg	Kilogramo
ton	Tonelada
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico
ton/h	Tonelada por hora
mmH <sub>2</sub> O	Milímetros de agua
kg/cm <sup>2</sup>	Kilogramo por centímetro Cuadrado
m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> min	Metro cúbico por metro cuadrado por minute
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
CaOH <sub>2</sub>	Cal
SaSO <sub>3</sub>	Sulfito de calcio
O <sub>2</sub>	Oxígeno

---

SaSO <sub>4</sub>	Sulfato de calcio
HCl	Ácido clorhídrico
HF	Fluoruro de hidrógeno
FF	Fabric Filter
SDA	Absorbedor de secado por rocío
FGD	Sistema de desulfurización de gases de combustión
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
MP	Ácido clorhídrico

---

## Glosario

Fabric Filter	Equipo utilizado para capturar el material particulado (MP) de los gases de combustión provenientes de la Caldera.
Lampo entrada	Mecanismo utilizado para impedir el ingreso de los gases de combustión provenientes de la caldera a uno de los módulos del Fabric Filter. También llamado Damper gas sucio.
Válvula poppet	Mecanismo utilizado para incomunicar un módulo del “Fabric Filter” desde el ducto de gas limpio. También llamado Damper gas limpio.
Precoating	Proceso de “curado” de mangas de filtrado, lo que consiste básicamente en recubrir el filtro con un material inerte y de ciertas propiedades físicas y químicas, lo que evita la saturación temprana del filtro.
Permeabilidad	Capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado.
PD/DP	Presión diferencial.

---

# Índice

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>ii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTADO DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>v</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1.    Introducción.....	1
1.2.    Antecedentes generales .....	2
1.3.    Objetivos y alcances .....	11
<b>CAPÍTULO 2: SISTEMA DE ABATIMIENTO.....</b>	<b>13</b>
2.1.    Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA).....	14
2.2.    Filtros de tela (FF).....	16
<b>CAPÍTULO 3: JERARQUIZACIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS.....</b>	<b>51</b>
3.1.    Jerarquización de equipos .....	51
3.2.    Matriz de criticidad .....	51
3.3.    Análisis de fallas .....	71
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE REPUESTOS CRÍTICOS.....</b>	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO 5: ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO ....</b>	<b>100</b>
5.1.    Programación de intervención del Mantenimiento.....	100
5.2.    Actividades propuestas para los equipos críticos .....	104
<b>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PRUPUESTA.....</b>	<b>107</b>
6.1.    Costos actuales de mantenimiento .....	107
6.2.    Propuesta de presupuesto anual.....	108
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>111</b>
Conclusiones .....	111
Recomendaciones .....	116
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>120</b>

---

Anexo A: Planos .....	120
Anexo B: Plan Maestro de Mantenimiento Filtros de Tela .....	124
Anexo C: AMFE Bolsas Filtrante.....	125
Anexo D: AMFE Lamos de Entrada.....	126
Anexo E: AMFE Válvulas Poppet.....	127
Anexo F: AMFE Válvulas Pulsos de Aire .....	128
Anexo G: AMFE Transmisor de Presión Diferencial.....	129
Anexo H: Pauta de Mantenimiento Válvulas de Pulso de Aire INST 1S ....	130
Anexo I: Pauta de Mantenimiento Válvulas de Pulso de Aire INST 3M ....	131
Anexo J: Pauta de Mantenimiento Lamos de Entrada INST 3M.....	132
Anexo K: Pauta de Mantenimiento Lamos de Entrada MEC 3M .....	133
Anexo L: Pauta de Mantenimiento Válvulas Poppet INST 3M .....	134
Anexo M: Pauta de Mantenimiento Válvulas Poppet MEC 3M.....	135
Anexo N: Pauta de Mantenimiento Transmisor PD INST 2S .....	136
Anexo O: Diagrama de decisión RCM .....	137

---

## Índice de figuras

Figura 1.1: Mapa de ubicación del Complejo Termoeléctrico Central Ventanas.....	3
Figura 1.2: Diagrama de Caldera de Unidades 3 y 4.....	5
Figura 1.3: Diagrama de Turbina de Vapor.....	7
Figura 1.4: Diagrama de flujo del Sistema de Agua de Alimentación.....	8
Figura 1.5: Diagrama de flujo del Sistema de Condensado.....	8
Figura 1.6: Diagrama de flujo del Sistema de Circulación.....	9
Figura 1.7: Quemadores Tangenciales de bajo NOx.....	10
Figura 1.8: Diagrama de flujos del Sistema FGD.....	11
Figura 2.1: Sistema de Desulfurización del Gas de Combustión FGD.....	13
Figura 2.2: Absorbedor de secado por pulverización (SDA) .....	15
Figura 2.3: Reacciones de gas de combustión con la mezcla alcalina.....	16
Figura 2.4: Filtro de Tela tipo Agitador Mecánico.....	17
Figura 2.5: Filtro de Tela tipo Aire Inverso.....	18
Figura 2.6: Filtro de Tela tipo Pulse Jet (Chorro Pulsado) .....	19
Figura 2.7: Esquema del sistema de inyección de aire de pulso.....	21
Figura 2.8: Limpieza de bolsas filtrantes.....	21
Figura 2.9: Esquema de los compartimientos de los filtros de tela.....	22
Figura 2.10: Trayectoria del flujo de los filtros de tela N°1 y N°2.....	23

---

Figura 2.11: Trayectoria del flujo de los filtros de tela N°3 y N°4.....	23
Figura 2.12: Diagrama de bolsa filtrante con anillo de retención.....	25
Figura 2.13: Limpieza por pulsos con y sin Venturi.....	26
Figura 2.14: Diagrama de la distribución de la presión de limpieza con Venturi.....	27
Figura 2.15: Principales componentes sistema de pulsos de aire.....	27
Figura 2.16: Distribución de transmisor y manómetros.....	29
Figura 2.17: Diagrama esquemático de sistema de pulsos de aire.....	30
Figura 2.18: Esquema de limpieza de bolsa tipo Pulse Jet.....	30
Figura 2.19: Distribución de placa tubular, tubo de soplado y bolsas filtrantes.....	31
Figura 2.20: Ejemplo de esquema de funcionamiento de vibradores eléctricos.....	36
Figura 2.21: Ejemplo de esquema de funcionamiento de las Almohadillas de aire.....	37
Figura 4.1: Diagrama de Pareto para Materiales 2018.....	93
Figura 4.2: Diagrama de Pareto para Materiales 2019.....	94
Figura 4.3: Diagrama de Pareto para Materiales 2020.....	94
Figura 4.4: Diagrama de Pareto para Materiales 2021.....	95
Figura 4.5: Diagrama de Pareto para Materiales 2022.....	95
Figura 4.6: Diagrama de Pareto para Materiales 2023.....	96
Figura 4.7: Consumo anual para Bolsas Filtrantes en CLP.....	97
Figura 4.8: Consumo anual para Jaulas de Bolsas Filtrantes en CLP.....	97

---

Figura 4.9: Consumo anual para Conector para válvula de pulso de aire en CLP.....98

---

## Índice de tablas

Tabla 2.1: Avisos 2018.....	41
Tabla 2.2: Avisos 2019.....	41
Tabla 2.3: Avisos 2020.....	41
Tabla 2.4: Avisos 2021.....	42
Tabla 2.5: Avisos 2022.....	42
Tabla 2.6: Avisos 2023.....	42
Tabla 2.7: Total de Avisos comprendidos entre 2018-2023.....	43
Tabla 2.8: Mantenimientos preventivos/predictivos ejecutados.....	43
Tabla 2.9: Fallas extraídas desde SAP para el año 2018 de Unidad 3.....	44
Tabla 2.10: Fallas extraídas desde SAP para el año 2019 de Unidad 3.....	44
Tabla 2.11: Fallas extraídas desde SAP para el año 2019 de Unidad 4.....	45
Tabla 2.12: Fallas extraídas desde SAP para el año 2020 de Unidad 3.....	45
Tabla 2.13: Fallas extraídas desde SAP para el año 2020 de Unidad 4.....	46
Tabla 2.14: Fallas extraídas desde SAP para el año 2021 de Unidad 3.....	46
Tabla 2.15: Fallas extraídas desde SAP para el año 2021 de Unidad 4.....	47
Tabla 2.16: Fallas extraídas desde SAP para el año 2022 de Unidad 3.....	48
Tabla 2.17: Fallas extraídas desde SAP para el año 2022 de Unidad 4.....	48
Tabla 2.18: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 3.....	49

---

Tabla 2.19: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 4.....	49
Tabla 2.20: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 3.....	50
Tabla 2.21: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 4.....	50
Tabla 3.1: Matriz de Criticidad definida por AES Andes S.A. ....	52
Tabla 3.2: Nivel de criticidad definido por AES Andes S.A.....	53
Tabla 3.3: Nivel de probabilidad definido por AES Andes S.A. ....	54
Tabla 3.4: Cálculo de probabilidad de ocurrencia de falla para Nueva Ventanas.....	55
Tabla 3.5: Cálculo de probabilidad de ocurrencia de falla para Campiche.....	55
Tabla 3.6: Nivel de consecuencia en Seguridad y Salud definido por AES Andes.....	56
Tabla 3.7: Cálculo de consecuencia seguridad y salud para Nueva Ventanas.....	57
Tabla 3.8: Cálculo de consecuencia seguridad y salud para Campiche.....	57
Tabla 3.9: Nivel de criticidad definido por AES Andes S.A. ....	58
Tabla 3.10: Cálculo de consecuencia medio ambiente para Nueva Ventanas.....	59
Tabla 3.11: Cálculo de consecuencia medio ambiente para Campiche.....	59
Tabla 3.12: Nivel de consecuencia Operacional definido por AES Andes S.A.....	60
Tabla 3.13: Cálculo de consecuencia operacional para Nueva Ventanas.....	61
Tabla 3.14: Cálculo de consecuencia operacional para Campiche.....	61
Tabla 3.15: Nivel de consecuencia en Calidad definido por AES Andes S.A.....	62
Tabla 3.16: Cálculo de consecuencia de calidad para Nueva Ventanas.....	63

---

Tabla 3.17: Cálculo de consecuencia de calidad para Campiche.....	63
Tabla 3.18: Evaluación de criticidad de equipos para Nueva Ventanas.....	64
Tabla 3.19: Evaluación de criticidad de equipos para Campiche.....	64
Tabla 3.20: Resumen análisis de criticidad para Nueva Ventanas.....	65
Tabla 3.21: Resumen análisis de criticidad para Campiche.....	65
Tabla 3.22: Resumen análisis de criticidad para las Unidades 3 y 4.....	67
Tabla 3.23: Matriz de Criticidad para el Sistema de Abatimiento Fabric Filter.....	68
Tabla 3.24: Parámetros de operación del sistema Filtros de Tela.....	75
Tabla 3.25: Fallas funcionales de los equipos más críticos.....	77
Tabla 3.26: Anexos AMFE.....	80
Tabla 3.27: Resultados IPR AMFE.....	81
Tabla 3.28: Metodología RCM para Bolsas Filtrantes.....	88
Tabla 3.29: Metodología RCM para Bolsas Filtrantes (continuación) .....	89
Tabla 3.30: Metodología RCM para Lamos de Entrada.....	89
Tabla 3.31: Metodología RCM para Válvulas Poppet (dispositivo de salida) .....	90
Tabla 3.32: Metodología RCM para Válvula Pulsos de Aire.....	91
Tabla 3.33: Metodología RCM para Válvula Pulsos de Aire (continuación).....	92
Tabla 3.34: Metodología RCM para Transmisor de Presión Diferencial.....	92
Tabla 4.1: Listado de repuestos críticos para Sistema Filtros de Tela.....	99

---

Tabla 5.1: Total de tareas propuestas para ser realizadas por operadores del sistema...	101
Tabla 5.2: Total de tareas propuestas para ser realizadas por personal de mantenimiento.....	102
Tabla 5.3: Paquetes de trabajo de mantenimiento para el Sistema Filtros de Tela.....	103
Tabla 5.4: Resumen de Plan maestro de Mantenimiento Filtros de Tela.....	103
Tabla 5.5: Pauta de Recorrido para Operadores del Sistema Filtros de Tela.....	104
Tabla 5.6: Pauta de Mantenimiento para Bolsas Filtrantes MEC 3M.....	105
Tabla 5.7: Distribución Anexos Pautas de Mantenimiento.....	106
Tabla 6.1: Gastos correspondientes al mantenimiento de Filtros de Tela 2022.....	107
Tabla 6.2: Costo Anual de HH del Plan de Mantenimiento propuesto.....	109
Tabla 6.3: Costos de Repuestos Críticos del Plan de Mantenimiento propuesto.....	109
Tabla 6.4: Presupuesto anual para el Plan de Mantenimiento propuesto para el Sistema de Filtros de Tela de cada Unidad.....	109

---

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

El proceso productivo de una central termoeléctrica está compuesto por diversos activos que, en conjunto, permiten la generación de energía eléctrica a partir del calor liberado mediante la combustión de combustibles fósiles. Estos activos pueden formar parte del sistema principal de generación, como la caldera, la turbina y el generador, o de sistemas auxiliares que aseguran la disponibilidad, confiabilidad, cumplimiento de parámetros operacionales, normativas ambientales y estándares de seguridad.

Uno de los procesos auxiliares más relevantes es el sistema de abatimiento de emisiones, compuesto por el Sistema de Desulfurización de Gases de Combustión, el cual trata los gases generados por la quema de carbón en la caldera, reduciendo las emisiones de gases ácidos y material particulado.

En el marco del plan de descarbonización impulsado por el Gobierno de Chile en 2019, cuyo objetivo es eliminar progresivamente las centrales a carbón antes del año 2040, y considerando los límites de emisión establecidos por el Decreto Supremo N°13, la optimización del sistema de abatimiento se ha convertido en una prioridad para las empresas generadoras.

Los filtros de tela se presentan como una solución eficiente y de bajo costo para la filtración de partículas en los gases de combustión. Su diseño técnico sencillo y robusto permite un bajo consumo energético y facilita las labores de mantenimiento.

En consecuencia, considerando el contexto nacional y social de operación de las centrales termoeléctricas, y en línea con las políticas de mejora continua de la Central Termoeléctrica Ventanas, este trabajo de titulación tiene como propósito aplicar metodologías de análisis y herramientas técnicas para desarrollar una propuesta de plan de mantenimiento del sistema de abatimiento mediante filtros de tela, con el fin de mejorar su disponibilidad y optimizar el uso de recursos.

---

## **1.2. Antecedentes generales**

### **1.2.1. Organización**

AES Corporation es una empresa transnacional de origen estadounidense dedicada a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en diversos países de América, incluyendo Estados Unidos, México, El Salvador, República Dominicana, Costa Rica, Colombia, Brasil, Argentina y Chile.

En el territorio chileno, AES opera a través de su filial AES Chile, anteriormente conocida como Chilegener y luego AES Gener, tras la adquisición por parte de AES Corporation en el año 2000.

Actualmente, AES Chile se posiciona como la segunda empresa generadora más importante del país, con una participación de mercado del 12,9 %. Su capacidad instalada alcanza los 3.523 [MW], distribuidos en un 60 % en centrales termoeléctricas a carbón, 23 % en centrales hidroeléctricas, 8 % en parques eólicos y 3 % en plantas solares.

Este estudio se enfoca en el Complejo Termoeléctrico Central Ventanas, ubicado en la comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. El complejo cuenta con cuatro unidades generadoras que suman una potencia instalada de 884 [MW], distribuidas de la siguiente manera:

- Unidad 1: pertenece a la Central Termoeléctrica Ventanas, es conocida como Ventanas 1 (V1) y tuvo su puesta en servicio el año 1964. Posee una turbina de vapor conectada al generador principal con la potencia para generar 120 [MW]. Utiliza como combustible principal el carbón pulverizado.
- Unidad 2: pertenece a la Central Termoeléctrica Ventanas, es conocida como Ventanas 2 (V2) y tuvo su puesta en servicio el año 1977. Posee una turbina de vapor conectada al generador principal con la potencia para generar 220 [MW]. Utiliza como combustible principal carbón pulverizado.

- 
- Unidad 3: pertenece a la Central Termoeléctrica Nueva Ventanas, es conocida como Ventanas 3 (V3) y tuvo su puesta en servicio el año 2010. Posee una turbina de vapor conectada al generador principal con la potencia para generar 270 [MW]. Utiliza como combustible principal carbón pulverizado.
  - Unidad 4: pertenece a la Central Termoeléctrica Campiche, es conocida como Ventanas 4 (V4) y tuvo su puesta en servicio el año 2013. Posee una turbina de vapor conectada al generador principal con la potencia para generar 270 [MW]. Utiliza como combustible principal carbón pulverizado.

El Complejo Termoeléctrico Central Ventanas se ubica en la comuna de Puchuncaví, V Región de Valparaíso, Chile. En la Figura 1.1 se presenta el mapa de ubicación del complejo, incluyendo las cuatro unidades y el sistema de desulfurización de gases de combustión (FGD) correspondiente a las Unidades 3 y 4.



Figura 1.1: Mapa de ubicación del Complejo Termoeléctrico Central Ventanas

En el marco del plan de descarbonización nacional, AES Chile ha iniciado un proceso de retiro progresivo de sus unidades a carbón. Ventanas 1 fue desconectada del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en junio de 2022, mientras que Ventanas 2 se encuentra en condición de reserva energética desde septiembre de 2023, con

---

proyección de desconexión definitiva. Las unidades 3 y 4 se mantienen operativas, con estimaciones de funcionamiento hasta el año 2029.

### **1.2.2. Valores Corporativos**

AES Andes se rige por tres valores fundamentales:

- i. “La seguridad es primero: La seguridad es el centro de todo lo que hacemos. Siempre identificamos los riesgos potenciales para nuestra gente, clientes, socios, contratistas, y comunidades. Medimos el éxito con base en la seguridad con la que realizamos nuestro trabajo juntos, mientras contribuimos a un futuro energético más sostenible.” [12].
- ii. “Aplicamos los más altos estándares: Actuamos con la mayor integridad con nuestra gente, clientes, socios y comunidades. Las soluciones que juntos ofrecemos cumplen con estándares globales de excelencia” [12].
- iii. “Todos juntos: Trabajamos como un equipo con nuestra gente, clientes, socios, contratistas y comunidades. Satisfacemos las necesidades cambiantes de los clientes con agilidad y disfrutamos celebrando el éxito de todos, resolviendo retos significativos como un equipo” [12].

### **1.2.3. Sistema Productivo**

El objetivo principal de una central termoeléctrica es la generación de energía eléctrica de forma eficiente y segura, mediante la conversión de energía térmica obtenida por la combustión de combustibles fósiles, principalmente carbón. Este proceso se lleva a cabo a través de una serie de sistemas interconectados que permiten transformar el calor en energía eléctrica aprovechable.

El presente estudio se enfoca en las Unidades 3 y 4 del Complejo Termoeléctrico Central Ventanas, considerando su estado actual de operación. Cabe destacar que la Unidad 1 se encuentra desconectada del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) desde junio

---

de 2022, mientras que la Unidad 2 está en condición de reserva energética, con proyección de desconexión definitiva. Las Unidades 3 y 4, objeto de este análisis, presentan una construcción y sistemas productivos idénticos.

## Centrales Térmicas

Los sistemas más relevantes del proceso de generación en una central termoeléctrica son:

### 1) Generador de vapor (Caldera)

Comprende al conjunto o sistema formado por una caldera y sus respectivos accesorios, encargados de transformar un líquido a vapor a presión, con una temperatura superior a la atmosférica.

Las calderas de las Unidades 3 y 4 son de circulación natural y de tiro inducido, con quemadores tangenciales tipo “Low NO<sub>x</sub>” (bajo NO<sub>x</sub>). Utilizan carbón subbituminoso como combustible principal, y diésel como combustible de partida y respaldo. La producción máxima de vapor alcanza las 763 [ton/h], con una presión de 160 [bar] y una temperatura de 565 [°C] a la salida del sobrecalentador.

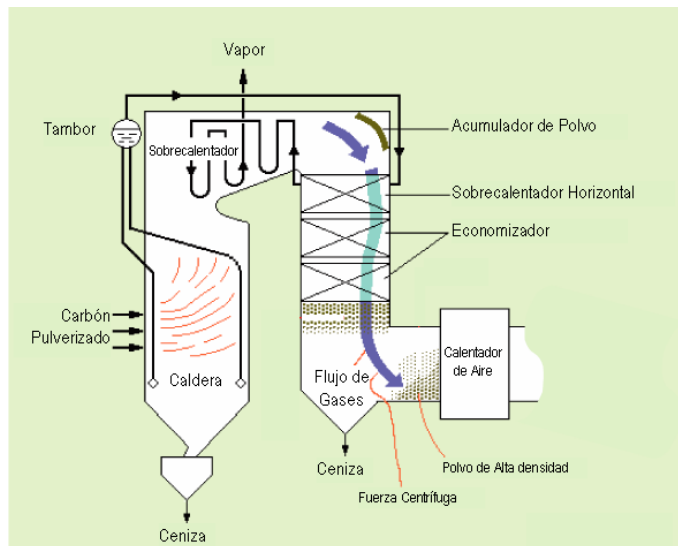


Figura 1.2: Diagrama de Caldera de Unidades 3 y 4

---

## 2) Turbina-generador

Las turbinas de vapor son máquinas que aprovechan la energía térmica contenida en el vapor para transformarla en trabajo mecánico mediante un proceso de expansión termodinámico. El vapor, generado en otro componente del ciclo térmico como la caldera, se expande aumentando su volumen específico, lo que produce una fuerza que impulsa los álabes de la turbina, provocando así la rotación del eje.

Existen dos tipos principales de turbinas de vapor: de acción y de reacción. En las turbinas de acción, la expansión del vapor y la transferencia de energía se producen únicamente en los álabes móviles. En cambio, en las turbinas de reacción, la expansión ocurre tanto en los álabes fijos como en los rotatorios.

En el caso de las turbinas instaladas en Nueva Ventanas y Campiche, se trata de turbinas de reacción, lo que implica que el vapor se expande a medida que pasa por los álabes fijos y rotatorios. Estas turbinas operan con vapor sobrecalentado y recalentado, lo que aumenta su eficiencia termodinámica.

Las turbinas de vapor están compuestas por tres secciones principales:

- Turbina de alta presión: Cuenta con dos válvulas de paro o cierre rápido y dos válvulas de control. Las condiciones nominales de operación son a presión de vapor de 160 [bar] a 565 [°C].
- Turbina de media presión: Similar a la sección de alta presión, posee dos válvulas de paro o cierre rápido y dos válvulas de control. Las condiciones nominales de operación son a presión de 35 [bar] a 565 [°C].
- Turbina de baja presión: Se conecta con la turbina de media presión mediante un “crossover”. Las condiciones nominales de operación son a presión de 5,45 [bar] a 282,8 [°C].

El flujo máximo de vapor es de 741 [ton/h], lo que permite una generación de hasta

---

280 [MW] por unidad.

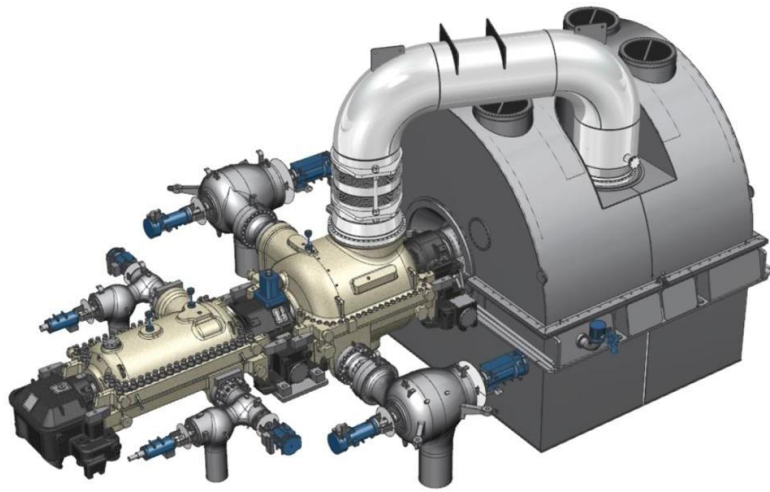


Figura 1.3: Diagrama de Turbina de Vapor

Posterior a la turbina de baja presión se encuentra el generador de corriente alterna que transforma la energía disponible de un sistema motriz (turbina de vapor, hidráulica, gas, etc.) en energía eléctrica, bajo forma de corriente alterna. El generador es una máquina sincrónica y, por lo tanto, siendo reversible puede funcionar ya sea como generador como motor.

### **3) Sistema de agua de alimentación**

Consiste en el sistema de alimentación de la caldera compuesto por dos bombas de alimentación, dos calentadores de agua, un economizador, un desaireador y un estanque de agua de alimentación.

Su función es suministrar el agua necesaria para el funcionamiento del generador de vapor, manteniendo un nivel de agua seguro y estable en el domo en todo momento.

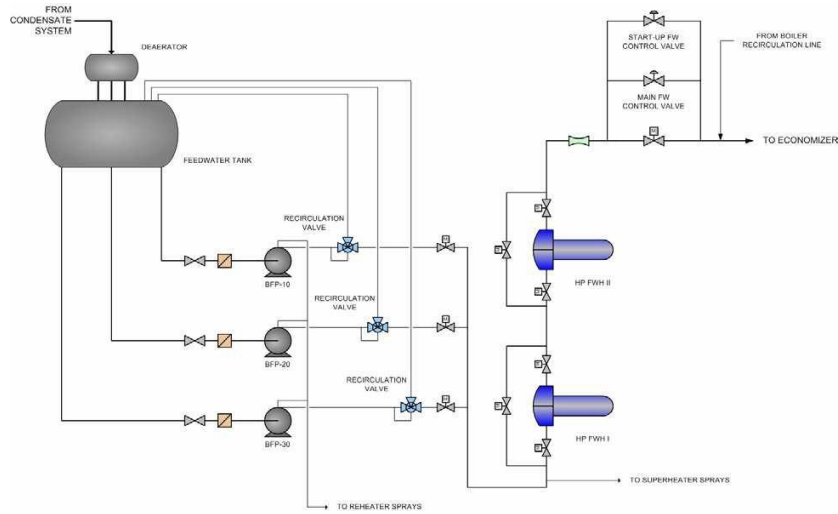


Figura 1.4: Diagrama de flujo del Sistema de Agua de Alimentación

#### 4) Sistema de condensado

Tiene como función tomar el agua del pozo caliente del condensador (condensado) por medio de las bombas de condensado, las cuales poseen una presión suficiente para llegar al estanque de alimentación y circular por sus respectivos calentadores. Esto tiene como objetivo que esta agua vuelva al sistema, y alimente el estanque de agua de alimentación donde succionan las bombas de alimentación de caldera.

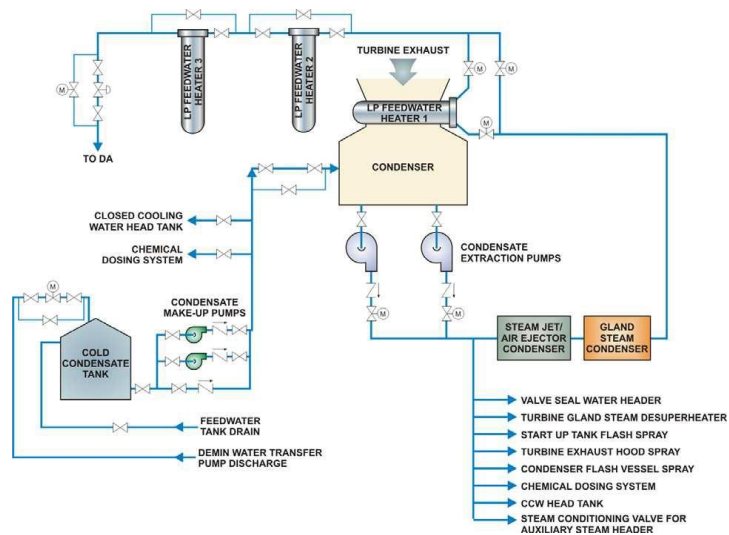


Figura 1.5: Diagrama de flujo del Sistema de Condensado

---

## 5) Sistema de circulación

Se compone de dos bombas ubicadas en cada pozo del “intake”, y su objetivo principal es suministrar el agua de mar que será utilizada como medio de refrigeración para producir la condensación del vapor en el condensador.

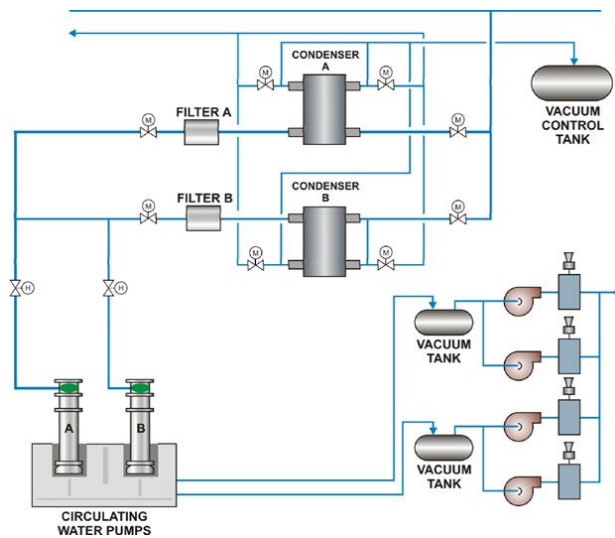


Figura 1.6: Diagrama de flujo del Sistema de Circulación

## 6) Sistema de combustible

Las unidades operan principalmente con carbón pulverizado, y utilizan petróleo diésel en las fases de arranque. El diseño considera una mezcla de 54 % carbón bituminoso y 46 % subbituminoso, con un flujo de 100 [ton/h] y un poder calorífico promedio de 6.000 [kcal/kg].

## 7) Sistema de combustión

Consiste en los equipos que permiten que se produzca la combustión: pulverizadores de carbón, quemadores, calentadores de aire y ventiladores (tiro forzado (FDF), aire primario (PAF) y tiro inducido (IDF)).

## 8) Sistema de mitigación medioambiental

---

Para cumplir con la normativa ambiental establecida por el Decreto Supremo N°13 [10], cada unidad cuenta con un sistema de abatimiento compuesto por:

- Quemadores de bajo  $\text{NO}_x$ : son de tipo combustión secuencial, lo que permite que la temperatura de la llama no alcance el límite necesario para que el nitrógeno deje de ser inerte, esto debido a que la combustión completa del combustible la generan en múltiples etapas.

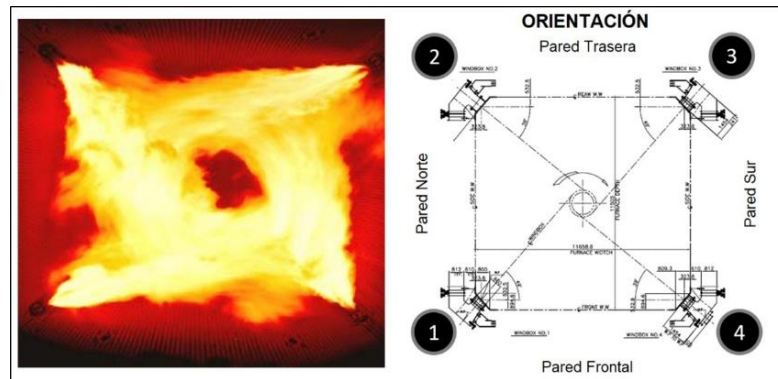


Figura 1.7: Quemadores Tangenciales de bajo  $\text{NO}_x$

- Sistema de abatimiento o Sistema de desulfurización de gas de combustión (FGD): se encarga del tratamiento de los gases de combustión de la caldera, y está compuesto por el Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA) y los Filtros de Tela (FF), encargados de reducir las emisiones de gases ácidos y material particulado.
  - Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA): El absorbedor de secado por pulverización (SDA, por sus siglas en inglés) es un proceso semiseco, que tiene como principio de funcionamiento la reacción entre él  $\text{SO}_2$  y él  $\text{CaOH}_2$  en condiciones húmedas específicas. Su función es el tratamiento de las emisiones de gases ácidos de los gases de combustión que se emiten de la caldera, para su posterior tratamiento en el sistema Filtros de Tela.
  - Filtros de Tela (FF): Los filtros de tela (FF, por sus siglas en inglés) se

encargan de la captación del material particulado (MP) de los gases de combustión que salen del recipiente del SDA. Su principal función es la filtración de MP, pero en un porcentaje menor también ayudan a controlar el SO<sub>2</sub> y los gases ácidos del gas de combustión, esto debido a que cuentan con un revestimiento de cal sin reaccionar que se forma en las bolsas filtrantes de los Filtros de Tela. Posteriormente, el gas tratado (limpio) sale de los filtros a la succión de los ventiladores de tiro inducido (VTI), para su posterior circulación a la chimenea y atmósfera.

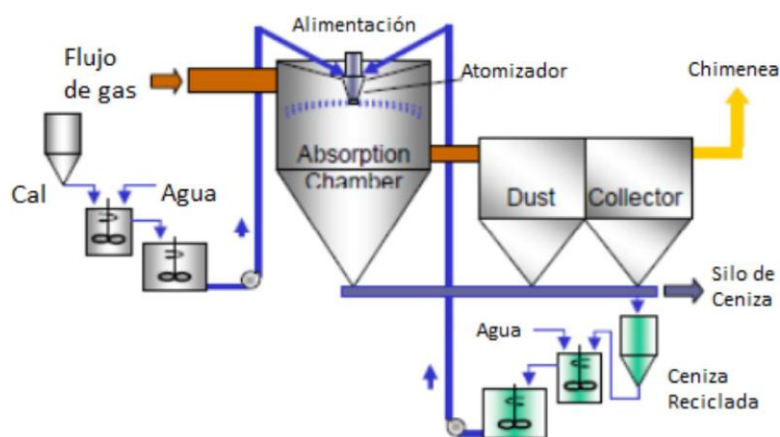


Figura 1.8: Diagrama de flujos del Sistema FGD

### 1.3. Objetivos y alcances

#### 1.3.1. Objetivo General

En el marco de la mejora de la gestión del mantenimiento, fundamentada en las políticas de mejora continua de la Central Termoeléctrica Ventanas, se establece como objetivo principal de este trabajo proponer un plan de mantenimiento para el sistema de abatimiento “Fabric Filter”, con el fin de mejorar el nivel de disponibilidad del equipo y optimizar el uso de los recursos.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- 1) Realizar un levantamiento de información sobre la estructura técnica, el

---

historial de fallas y el mantenimiento actualmente aplicado al sistema de abatimiento “Fabric Filter”.

- 2) Jerarquizar los componentes del sistema mediante la definición de una matriz de criticidad y desarrollar un análisis de fallas para los equipos más críticos.
- 3) Generar un listado de repuestos considerados críticos para asegurar una operación confiable del sistema.
- 4) Elaborar un nuevo plan de mantenimiento para el sistema de abatimiento, basado en el análisis realizado.
- 5) Realizar un análisis de costos asociado a la propuesta del plan de mantenimiento.

## CAPÍTULO 2: SISTEMA DE ABATIMIENTO

El sistema de abatimiento utilizado para tratar los gases de combustión generados por las calderas que operan con carbón en las Unidades 3 y 4 de la Central Termoeléctrica Ventanas está conformado por el Sistema de Desulfurización de Gases de Combustión (FGD, por sus siglas en inglés). Su propósito principal es reducir las emisiones de gases ácidos y material particulado presentes en los gases de combustión antes de que estos sean impulsados por los ventiladores de tiro inducido hacia la chimenea y liberados a la atmósfera, cumpliendo así con los límites de emisión establecidos por el Decreto Supremo N°13 [10].

Este sistema está compuesto por dos subsistemas principales:

- i. Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA)
- ii. Filtros de Tela (Fabric Filter, FF)

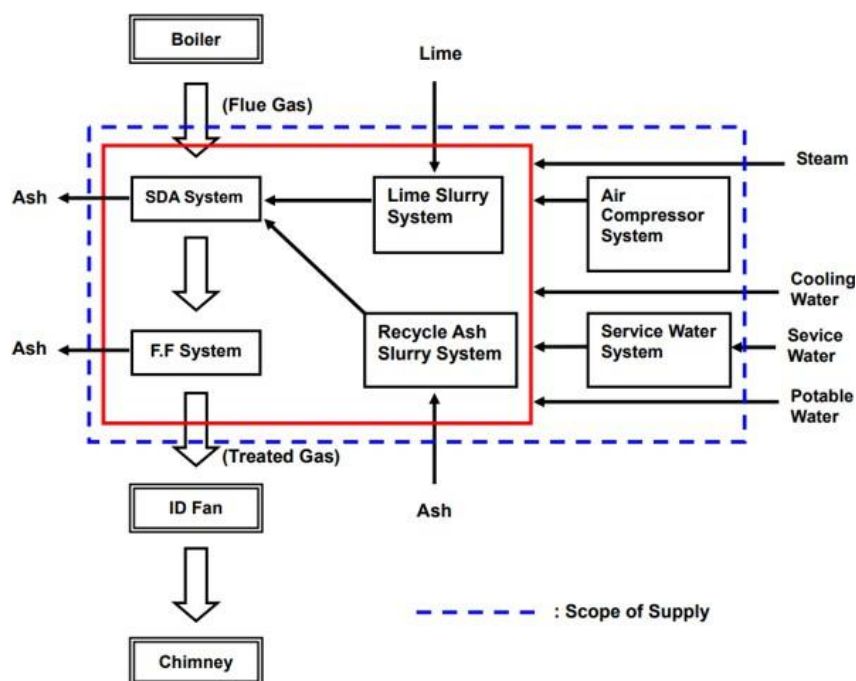


Figura 2.1: Sistema de Desulfurización del Gas de Combustión FGD

---

Ambos subsistemas trabajan de manera complementaria para asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, contribuyendo a la reducción de contaminantes atmosféricos y al mejoramiento de la calidad del aire en las zonas aledañas a la central.

### **2.1. Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA)**

El sistema Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA, por sus siglas en inglés Spray Dry Absorber) es el encargado de la eliminación de gases ácidos (SOx) provenientes de la combustión en las calderas. Su principio de funcionamiento se basa en la reacción química entre el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) en condiciones de humedad específicas.

La cal es un reactivo que es proporcionado por las bombas de lechada de cal y de lechada de producto reciclada, flujos que se mezclan en el tanque superior del atomizador antes de su introducción al recipiente del SDA.

La lechada de cal, compuesta por agua y cal virgen o reciclada, es atomizada en forma de una nube de gotas finas (aproximadamente 50 micras de diámetro) dentro del recipiente del SDA. Esta nube interactúa con el flujo de gases de combustión que ingresa por la parte superior del recipiente (60 %) y a través de un dispersor central (40 %), permitiendo que los componentes ácidos del gas sean absorbidos y neutralizados rápidamente por las gotas alcalinas. Simultáneamente, el agua contenida en la lechada se evapora.

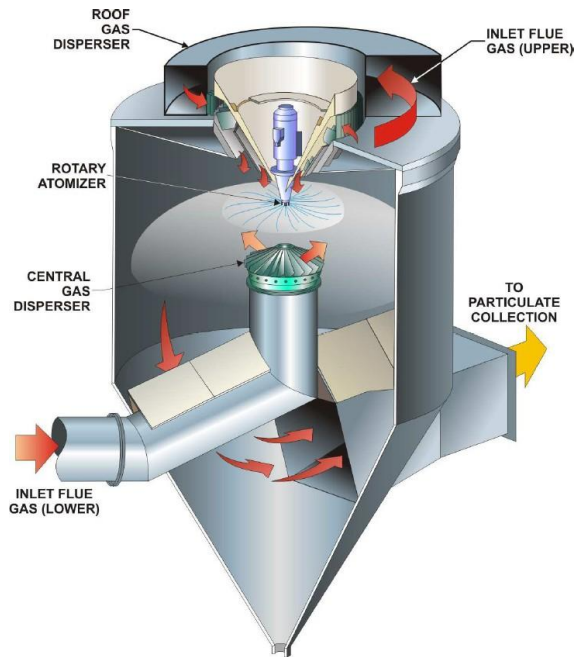
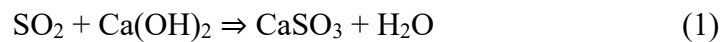


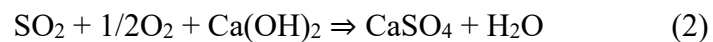
Figura 2.2: Absorbedor de secado por pulverización(SDA)

Las principales reacciones químicas que ocurren en el SDA corresponden a reacciones entre los componentes ácidos del flujo de gas de combustión de la caldera ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ) y la alimentación de mezcla alcalina, ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), las cuales ocurren en una zona cerca de la boquilla del atomizador, en donde las condiciones de masa y temperatura son las óptimas para que se produzca la transferencia.

La principal reacción química corresponde a:



Una pequeña parte del  $\text{SO}_2$  también reacciona de la siguiente manera:



También se producen otras reacciones ácidas que involucran  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{HF}$ , aunque en menor proporción.

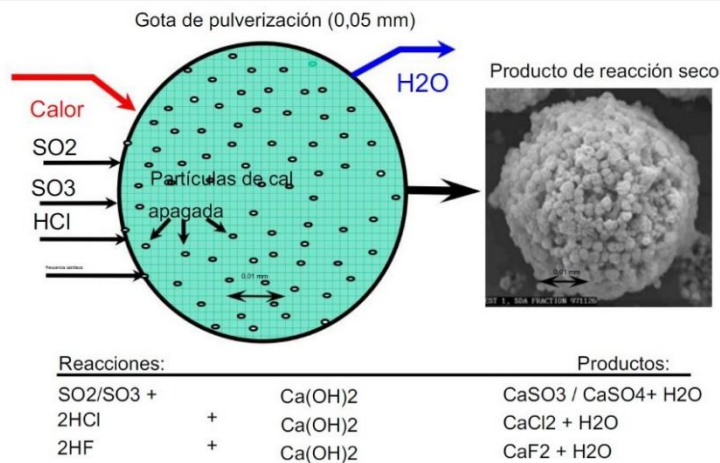


Figura 2.3: Reacciones de gas de combustión con la mezcla alcalina

Para lograr una atomización eficiente, se utiliza una mezcla de 30% de lechada de cal virgen y 70% de lechada reciclada, esta última obtenida de la ceniza capturada en los filtros de tela, mezclada nuevamente con cal y agua. Esta estrategia permite reducir el consumo de cal fresca y mejorar la eficiencia del proceso.

El producto seco resultante, compuesto por ceniza y residuos de reacción, se deposita en el fondo del recipiente del SDA y es descargado al sistema de transporte de cenizas. El gas tratado fluye hacia los Filtros de Tela (FF), donde se realiza la captura final del material particulado. Finalmente, el gas limpio es impulsado por los ventiladores de tiro inducido (VTI) hacia la chimenea para su liberación a la atmósfera.

## 2.2. Filtros de tela (FF)

El sistema de filtros de tela (Fabric Filter, FF) es responsable de la eliminación de partículas sólidas provenientes del proceso de desulfurización realizado en el Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA). Su función principal es capturar el material particulado (MP) presente en los gases de combustión, y adicionalmente contribuir a la reducción de gases ácidos como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), gracias al revestimiento de cal sin reaccionar que se forma en las bolsas filtrantes.

En la industria existen tres tipos principales de filtros de tela:

- Filtro de Tela tipo Agitador Mecánico: Las bolsas filtrantes tubulares se sujetan a la placa tubular en la parte inferior de la carcasa del filtro y se suspenden desde una barra horizontal ubicada en la parte superior. El gas sucio ingresa por el fondo de la cámara de bolsas, permitiendo que las partículas más grandes se separen por sedimentación gravitacional. La limpieza se realiza mediante la acción de un mecanismo agitador que sacude la barra superior, generando un movimiento ondulante a lo largo de la tela. Este movimiento provoca que el polvo acumulado en la superficie se desprenda.

Debido a la baja relación aire/tela que poseen estos filtros, los requisitos de espacio son elevados. Además, la acción de agitación genera un mayor estrés sobre las bolsas, lo que exige el uso de telas más pesadas y duraderas para resistir el desgaste.

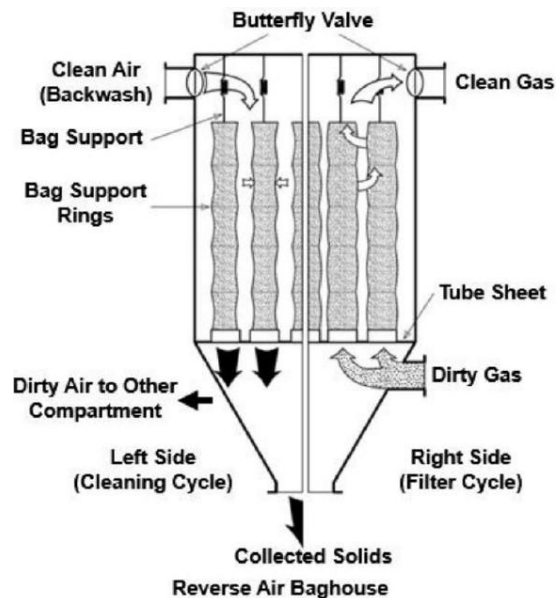


Figura 2.4: Filtro de Tela tipo Agitador Mecánico

- Filtros de tela tipo Aire Inverso (R/A): Este tipo de filtro consiste en la sujeción de las bolsas filtrantes a la placa tubular en la parte inferior del compartimiento, suspendidas desde ganchos ajustables en la parte superior, lo que permite calibrar la tensión de las bolsas. El flujo de gas sucio ingresa a la cámara de bolsas y pasa a

---

través de las bolsas filtrantes, acumulando el polvo en su interior.

La limpieza se realiza mediante la inyección de aire limpio en sentido inverso al flujo de gas, lo que genera la presurización del compartimiento. Esta presión colapsa suavemente las bolsas hacia sus líneas centrales, provocando que la torta de polvo se agriete y se desprenda de la superficie de la tela, cayendo a la tolva inferior. Aunque este sistema presenta una mayor eficiencia que el tipo agitador mecánico, depende fuertemente del tensado adecuado de las bolsas: una tensión excesiva impide el movimiento de limpieza, mientras que una tensión insuficiente puede provocar el colapso de la bolsa sobre la conexión inferior

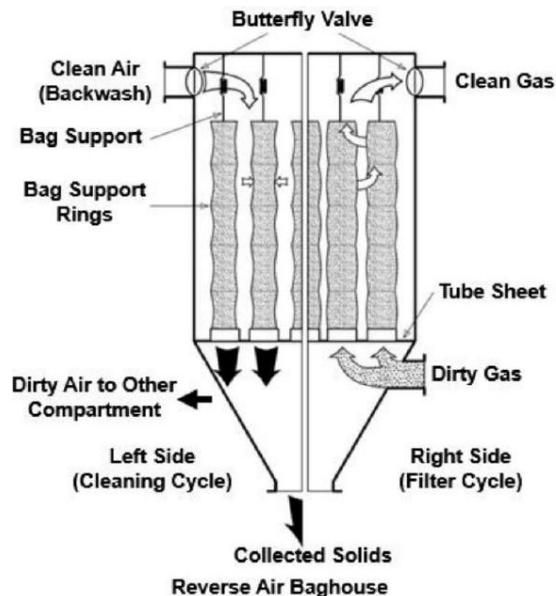


Figura 2.5: Filtro de Tela tipo Aire Inverso

- Filtro de Tela tipo Pulse Jet (Chorro Pulsado): Las bolsas filtrantes están sujetas a una placa tubular ubicada en la parte superior del compartimiento. El flujo de aire con carga de polvo ingresa desde la parte inferior de la carcasa y fluye desde el exterior hacia el interior de las bolsas. El aire atraviesa el medio filtrante, mientras que los sólidos quedan retenidos en la superficie externa.

La limpieza se realiza mediante la inyección de pulsos de aire comprimido a alta

presión, activados a través de una señal de un transmisor de presión diferencial que acciona una válvula solenoide normalmente cerrada, la cual libera presión en el tubo que conecta el solenoide a la válvula de pulso/diafragma, lo que genera la apertura de la válvula y permite que el aire de limpieza fluya por un tubo de soplado que posee boquillas en la parte superior de cada bolsa. La ráfaga de aire genera una onda de choque que provoca la flexión de las bolsas, lo que a su vez desprende la torta de polvo acumulada en la superficie externa del medio filtrante. El polvo eliminado cae a la tolva inferior del compartimiento.

Una de las principales ventajas de este sistema es la rapidez del proceso de limpieza, que se realiza en fracciones de segundo, en contraste con los métodos anteriores que requieren varios segundos por ciclo. Además, el sistema permite la operación continua del filtro, ya que la limpieza se realiza compartimiento por compartimiento, sin afectar significativamente el flujo de gas limpio.

Otra característica destacada es la posibilidad de aislar compartimientos individuales mediante compuertas de entrada y salida de gases, lo que permite realizar tareas de mantenimiento sin interrumpir la operación del resto del sistema.

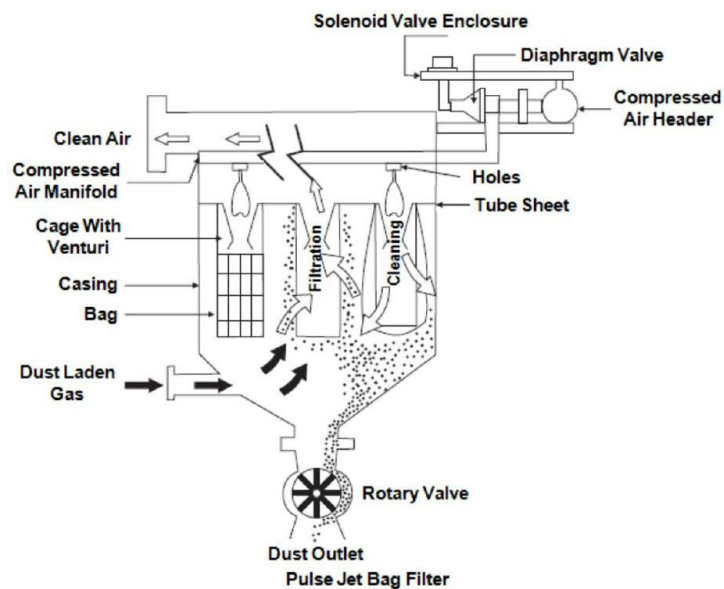


Figura 2.6: Filtro de Tela tipo Pulse Jet (Chorro Pulsado)

---

### 2.2.1. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del sistema de filtros de tela tipo Pulse Jet consiste en la entrada de los gases de combustión a través de un canal central de gas bruto hacia el filtro, y desde allí, mediante una tobera, a las cámaras de polvo. El flujo de gas con carga de partículas se dirige a la cámara mediante una distribución central, diseñada para lograr una óptima dispersión del gas dentro del filtro, minimizando la turbulencia en la zona del elemento filtrante.

El gas fluye a través del medio filtrante (la tela) desde el exterior hacia el interior de las bolsas filtrantes, mientras que las partículas sólidas quedan atrapadas en la superficie externa de las bolsas. Estas partículas se acumulan formando una capa denominada “torta de polvo”, la cual permanece adherida a la tela hasta que el flujo de aire ya no puede atravesarla con eficiencia. Este fenómeno favorece la filtración y genera un aumento en la presión diferencial ( $\Delta P$ ) del sistema.

Cuando la presión diferencial alcanza un valor límite preestablecido, se activa el proceso de limpieza de los compartimientos. Para evitar una resistencia excesiva al flujo de aire durante la limpieza, el aire comprimido es suministrado desde el distribuidor hacia cada bolsa mediante válvulas de membrana conectadas a tubos de inyección ubicados sobre la placa tubular. Estos tubos poseen boquillas alineadas con la parte superior de cada bolsa filtrante.

Para mejorar la eficiencia del proceso y reducir el consumo de aire comprimido, los extremos superiores de las bolsas están equipados con inyectores tipo Venturi, que mezclan el chorro de aire comprimido con el gas secundario proveniente de la zona de gas limpio. Esta mezcla genera un contraflujo de presión que atraviesa brevemente la bolsa filtrante, expulsando la torta de polvo desde su superficie externa. Las partículas desprendidas caen por gravedad hacia las tolvas de recolección ubicadas en la parte inferior de cada compartimiento.

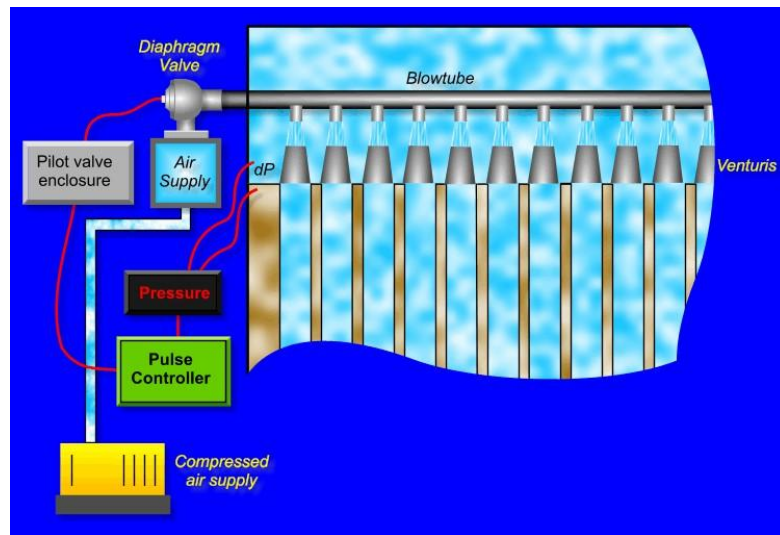


Figura 2.7: Esquema del sistema de inyección de aire de pulso

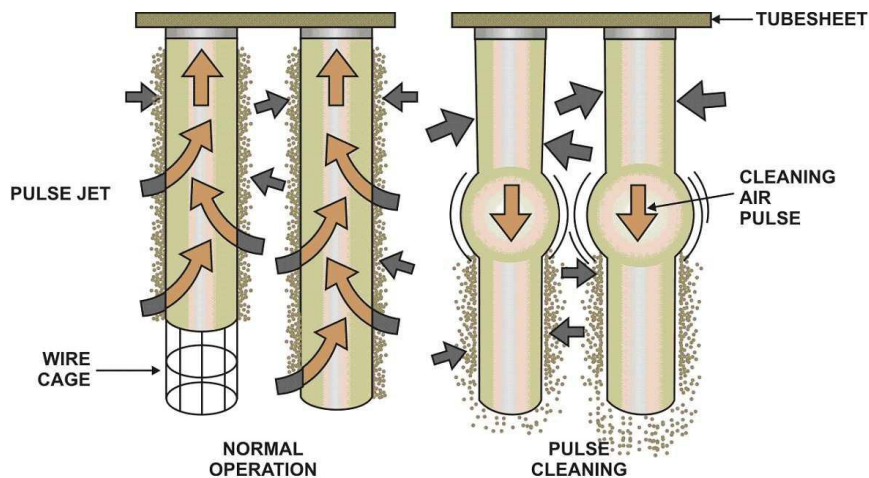


Figura 2.8: Limpieza de bolsas filtrantes

La frecuencia de la secuencia de limpieza y el tiempo de apertura de las válvulas pueden ajustarse de forma fija o controlarse automáticamente en función de la presión diferencial. Dado que la limpieza se realiza fila por fila y abarca solo una pequeña parte del área total del filtro durante un corto intervalo de tiempo, el flujo de gas limpio no se ve afectado significativamente por el ciclo de limpieza. Este gas limpio sale del sistema de filtración a través de las boquillas de salida y es conducido hacia el ducto de gas limpio.

---

Una característica destacada de los filtros tipo Pulse Jet es la posibilidad de aislar compartimientos individuales mediante el cierre simultáneo de las compuertas de entrada y salida de gases. Esto permite realizar tareas de mantenimiento sin interrumpir la operación del resto del sistema, garantizando así la continuidad del proceso de abatimiento.

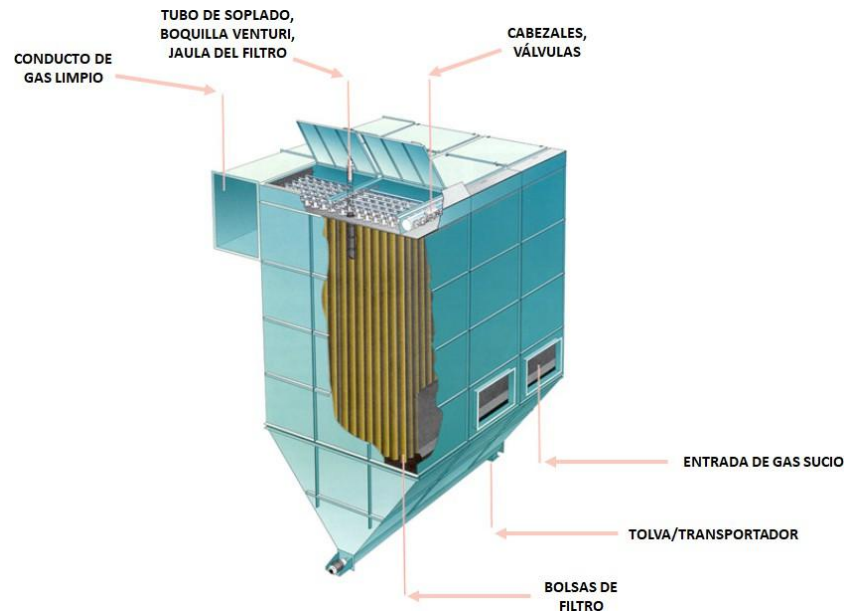


Figura 2.9: Esquema de los compartimientos de los filtros de tela

### 2.2.2. Descripción de los componentes

#### Filtros de tela

Cada unidad del sistema cuenta con cuatro filtros de tela, y cada uno de ellos está compuesto por 16 compartimientos o módulos. El gas de combustión descargado desde el recipiente del SDA se divide en dos cabezales: el primero alimenta los filtros N°1 y N°2, y el segundo los filtros N°3 y N°4. Cada compartimiento está conformado por una placa tubular, un sistema de pulsos de aire, un conjunto de tolva, una carcasa y escotillas desmontables.

El aire filtrado y libre de partículas es conducido desde los filtros hacia los

ventiladores de tiro inducido. Los filtros N°1 y N°2 descargan al ventilador de aspersion inducida ID FAN A, mientras que los filtros N°3 y N°4 lo hacen al ventilador ID FAN B. Las trayectorias de los flujos pueden observarse en las Figuras 2.10 y 2.11.

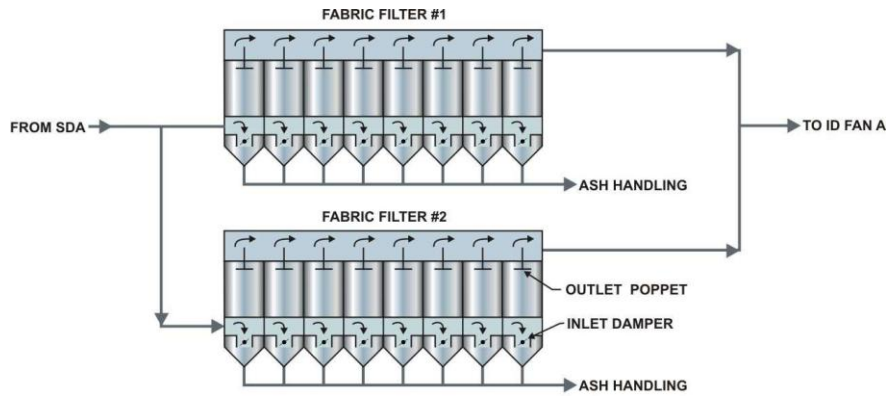


Figura 2.10: Trayectoria del flujo de los filtros de tela N°1 y N°2

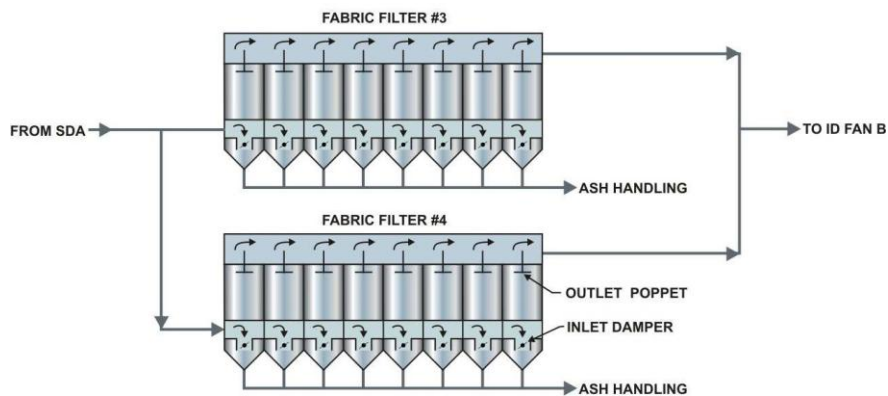


Figura 2.11: Trayectoria del flujo de los filtros de tela N°3 y N°4

### Carcasa del Filtro

Estructura prefabricada y compuesta por:

- Cámara de gas limpio con boquilla lateral de salida.
- Cámara de gas con polvo, reforzada externamente y con boquilla de entrada.
- Tolvas de recolección de polvo con boquilla de descarga.

---

## **Compartimientos**

Elementos básicos del sistema, donde se realiza la extracción de partículas de polvo del gas de combustión y el flujo de gas limpio pasa al conducto de salida. Están contruidos con estructura metálica resistente a la corrosión y altas temperaturas. La placa tubular, ubicada en la parte superior, sostiene las bolsas filtrantes y sus respectivas jaulas. Además, cada compartimiento cuenta con un sistema de pulsos de aire comprimido para la limpieza de las telas filtrantes y la liberación de partículas sólidas adheridas.

Cada compartimiento está diseñado para alojar dos juegos de bolsas y jaulas, totalizando 252 unidades por compartimiento (distribuidas en 14 x 18 filas). Las dimensiones son: 4.400 [mm] de largo, 3.150 [mm] de ancho y 6.925 [mm] de alto. El material de fabricación es acero inoxidable SS400 de 5 [mm] de espesor, con temperatura de diseño de 150 °C y presión de diseño de -0,08 [kg/cm<sup>2</sup>] (-800 mmH<sub>2</sub>O).

Adicionalmente poseen los siguientes accesorios y elementos:

- Placa de cubierta.
- Pared de distribución de gas.
- Secciones de refuerzo.
- Abertura de inspección SQ 500.
- Ganchos de soporte.

## **Bolsas Filtrantes**

Las bolsas filtrantes constituyen el elemento fundamental para la realización del proceso de filtrado, ya que corresponden al medio a través del cual fluye el gas de combustión y se adhieren las partículas sólidas.

---

Están fabricadas de acrílico homopolímero y poseen un manguito en la parte superior, el cual utiliza un anillo de retención cosido para sujetarse a la placa tubular, formando un sello positivo, tal como se indica en la Figura 2.12. Las costuras son de tipo longitudinal de tres pliegues y fondo cerrado.

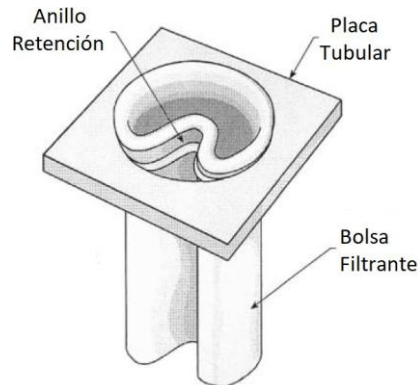


Figura 2.12: Diagrama de bolsa filtrante con anillo de retención

Cada compartimiento contiene 252 bolsas, lo que da un total de 8.064 bolsas por los cuatro filtros de tela de cada Unidad. Cada bolsa posee un diámetro interior de 156 [mm] y una longitud de 5,5 [m] (ver Anexo A), con un área de filtrado de 2.695 [m<sup>2</sup>]. En condiciones normales de operación, presentan una relación aire/tela de 1.001 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·min], es decir, el volumen de aire que atraviesa la bolsa es de 1.001 [m<sup>3</sup>/min] por metro cuadrado de superficie.

La temperatura máxima de funcionamiento continuo que pueden soportar las bolsas es de 103°C, con un pico de hasta 140°C durante un máximo de 30 [min]. Temperaturas superiores pueden provocar fallas en el material filtrante.

### **Jaula de Bolsas Filtrantes**

Las jaulas o canastillos se encargan de que las bolsas filtrantes no se caigan debido a la corriente de gas de combustión. Además, permiten que no colapsen durante los procesos de pulsos de limpieza, manteniendo su forma en toda su longitud.

Poseen forma cilíndrica y están construidas de alambre de acero con anillos de

---

---

forma circular a lo largo y alambres verticales para completar y mantener la estructura, de manera que puedan alojar las bolsas filtrantes. El fondo es de tipo cerrado, con diseño de una sola pieza. Cuentan con una tapa superior e inferior que se encargan de mantener la forma de los filtros y sostener las bolsas en su lugar (ver Anexo A).

Las jaulas utilizadas poseen una tapa superior tipo Venturi, la cual consiste en un dispositivo en forma de cono que tiene como propósito aumentar la intensidad de la presión del pulso inyectado en la bolsa. De esta manera, se reduce el consumo de energía requerido por la bolsa filtrante durante la limpieza [11], además de aumentar la eficiencia de operación y la vida útil de los elementos filtrantes.

En la Figura 2.13 se muestra la diferencia entre la limpieza por pulsos con y sin Venturi.

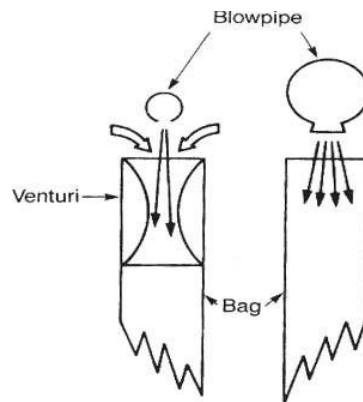


Figura 2.13: Limpieza por pulsos con y sin Venturi

El aire comprimido emitido por la boquilla del tubo soplador arrastra una gran cantidad de flujo de aire secundario cerca de la boca de la bolsa para entrar en ella. El Venturi actúa como una bomba de chorro y ayuda a inducir aire adicional, provocando que la torta de polvo se desprenda de forma más efectiva, resultando en una operación de limpieza más eficiente (ver Figura 2.14).

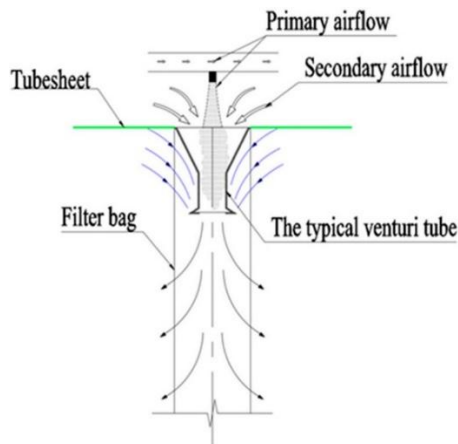


Figura 2.14: Diagrama de la distribución de la presión de limpieza con Venturi

### Sistema de Pulsos de Aire

El sistema de limpieza de las bolsas filtrantes consiste en un sistema de pulsos de aire comprimido encargado de eliminar la torta de polvo que se acumula en la superficie de las mangas filtrantes. El aire comprimido es suministrado por los compresores de aire del sistema FGD, el cual es depositado en un tanque receptor de aire para asegurar que se suministre limpio, seco y de calidad. Además, permite proporcionar un aumento brusco de volumen para garantizar el volumen y presión de aire adecuado durante la operación de limpieza.

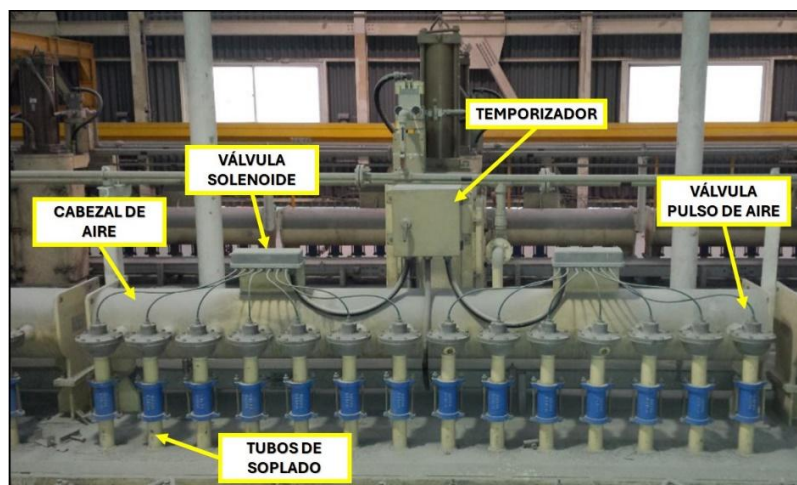


Figura 2.15: Principales componentes sistema de pulsos de aire

---

En la Figura 2.15 se indican los principales componentes del sistema de pulsos de aire, que corresponden a:

- Distribuidor de aire comprimido (cabezal de aire): 1 [u] por compartimiento.
- Válvulas de impulso de aire tipo diafragma: 14 [u] por compartimiento.
- Válvulas piloto eléctricas (solenoides) con amortiguadores de ruido de soplado conectadas a cada válvula diafragma: 2 [u] por compartimiento.
- Temporizador para frecuencia de pulso (tablero): 1 [u] por compartimiento.
- Tubos de circulación de aire (tubos de soplado): 14 [u] por compartimiento.
- Acoplamientos de tuberías.
- Indicador de presión diferencial (manómetro): 1 [u] por compartimiento.
- Transmisor de presión diferencial: 1 [u] por cada filtro de tela (1 [u] por cada 8 compartimientos).

La frecuencia de limpieza de los compartimientos puede definirse en un intervalo de tiempo concreto o de manera automática, tomando como base la presión diferencial, la cual se mide a la entrada y salida de cada línea de filtro de tela mediante un transmisor de presión diferencial. La caída de presión de diseño (operación normal) a través del filtro es de 140–160 [mmH<sub>2</sub>O]. En caso de aumento, el transmisor envía la señal al controlador para iniciar la operación de limpieza.

Para medir la presión en cada compartimiento se cuenta con un manómetro de presión diferencial, el cual proporciona la lectura visual entre la entrada y salida del medio filtrante, es decir, entre la cámara de gas sucio y la de gas limpio respectivamente. La distribución del transmisor y manómetro se muestra en la Figura 2.16.

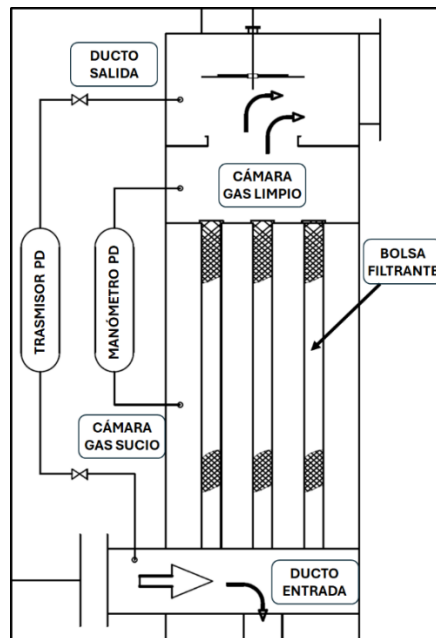


Figura 2.16: Distribución de transmisor y manómetros

El aire del sistema se proporciona al cabezal de aire comprimido, que consiste en un cilindro de almacenamiento conectado a cada válvula de diafragma. Este distribuye aire a todas las válvulas de diafragma del módulo. Para el accionamiento del soplado se cuenta con válvulas piloto eléctricas (solenoides), que se encargan de dar la señal de apertura a las válvulas de diafragma, teniendo 1 válvula piloto por cada 7 válvulas de impulso.

En la Figura 2.17 se indica la trayectoria del aire pulsado, el cual es transportado desde el puerto de salida de la válvula de impulso (diafragma) a las boquillas del tubo de soplado, que se encuentra instalado sobre la placa tubular. Las boquillas, ubicadas en la parte inferior del tubo de soplado, permiten que el aire comprimido fluya al centro de la abertura superior de cada bolsa filtrante. El tubo de soplado cuenta con una junta de expansión que permite absorber las dilataciones y contracciones causadas por los cambios de presión y temperatura.

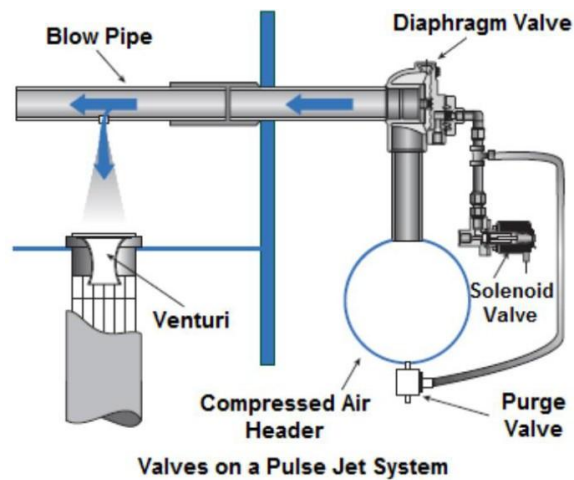


Figura 2.17: Diagrama esquemático de sistema de pulsos de aire

Para controlar la secuencia de soplado, la válvula de impulso cuenta con una válvula solenoide de aire de operación eléctrica normalmente cerrada. Cuando la válvula solenoide está en operación, se descarga un impulso de aire al soplete, enviando una ráfaga de aire a la hilera de bolsas a las que da servicio, tal como se indica en la Figura 2.18.

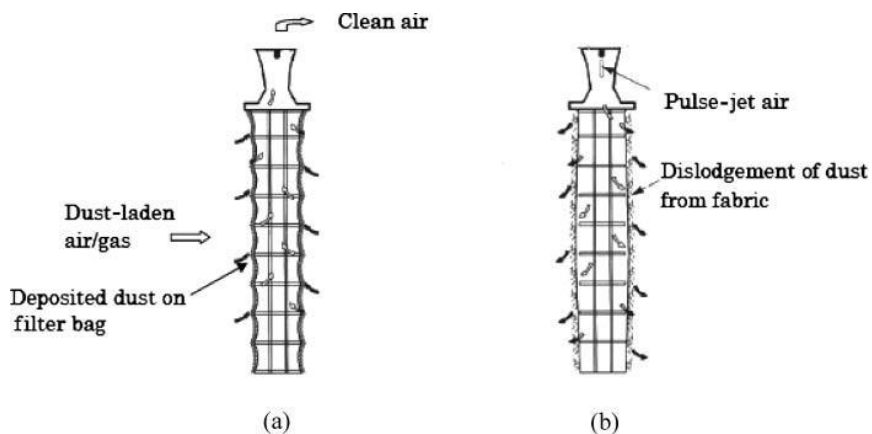


Figura 2.18: Esquema de limpieza de bolsa tipo Pulse Jet

Este sistema de limpieza por pulsos de aire comprimido, como se ha indicado, es fundamental para mantener la eficiencia del proceso de filtrado. Su correcto funcionamiento depende de la adecuada operación de los componentes mencionados,

---

especialmente de las válvulas solenoides, cuya falla puede afectar directamente la limpieza de las bolsas filtrantes.

### **Placa Tubular**

La placa tubular de la Figura 2.19 corresponde a una base de acero con perforaciones para que se instalen las bolsas filtrantes y sus jaulas. Las perforaciones están arregladas en hileras paralelas para que los orificios del soplete de los pulsos de aire de los tubos de soplado se localicen en el centro sobre cada bolsa de filtro.

La placa tubular está instalada en la parte superior de los compartimientos de los filtros de tela. Por arriba de la placa está el área donde el flujo de gas sale del compartimiento hacia el múltiple. El acceso a esta área es a través de una escotilla que proporciona el área de trabajo suficiente para el mantenimiento y cambio de las bolsas filtrantes.

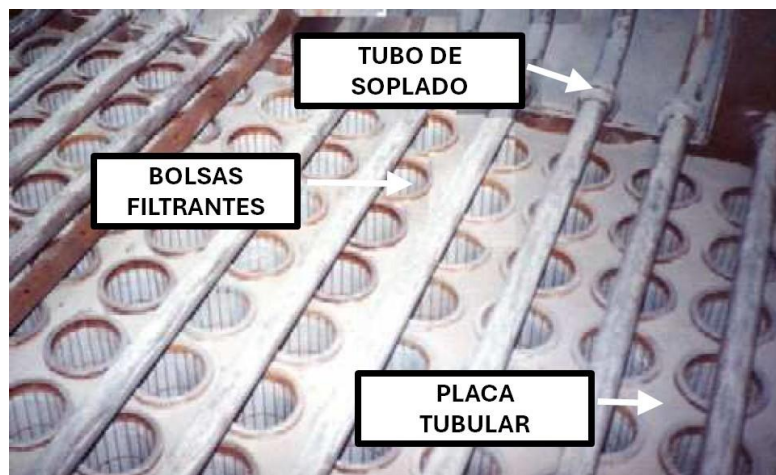


Figura 2.19: Distribución de placa tubular, tubo de soplado y bolsas filtrantes

### **Conductos de gas sucio y limpio**

Los conductos de gas sucio y limpio son los encargados de transportar los gases de combustión antes y después de la operación de filtrado en los compartimientos. Están prefabricados principalmente con planchas de acero y material exterior de refuerzo, de

---

manera que puedan soportar condiciones extremas como altas presiones, temperaturas y corrosión.

Están compuestos por:

- Conducto de entrada/salida con bridas de entrada/salida.
- Conducto de gases sucios/limpios con toberas con bridas hacia las cámaras de gases sucio/limpio.
- Pared divisoria entre el conducto de gas crudo y limpio.
- Paneles de guía de gases.
- Soportes de apoyo.

El objetivo principal de estos conductos es alimentar aire cargado de polvo de manera continua y permitir que el volumen y velocidad de alimentación sean los requeridos. Deben soportar niveles elevados de presión y temperatura de los gases de combustión, además de la corrosión causada por los productos ácidos.

El funcionamiento consiste en la circulación de los gases de combustión provenientes del SDA, que ingresan a cada filtro de tela por medio del conducto de entrada, desde la brida de entrada al conducto de gases sucios, para ser transportados a cada cámara de gas sin limpiar de cada compartimiento. El flujo ingresa a la cámara mediante una tobera rectangular y es regulado a través de una compuerta de cierre accionada por un actuador electroneumático (lampo de entrada). Cada filtro cuenta con su propio conducto de gases de combustión, por lo que se tiene un total de 2 conductos por unidad.

Luego del proceso de eliminación de partículas llevado a cabo en cada compartimiento, los gases limpios emanados de las bolsas filtrantes fluyen a la parte superior de estos, específicamente a la cámara de gas limpio. Esta cámara está

---

compuesta por paneles individuales para cada compartimiento, permitiendo atender fallas sin detener la circulación de gas limpio en el resto del sistema. El aire depositado en la cámara de gas limpio ingresa al conducto de gases limpios del filtro de tela, siendo regulado mediante una válvula de asiento tipo poppet con actuador neumático. Cada filtro cuenta con su propio conducto de gases limpios, por lo que también se tiene un total de 2 conductos por unidad.

El diseño de los filtros de tela considera la misma altura para los conductos de gases de combustión y gases limpios, lo que facilita el acceso a las bolsas de filtrado para su limpieza y reemplazo, además de reducir los costos de construcción. Para evitar la mezcla de gases, se incluye una pared divisoria entre ambos conductos, fabricada con el mismo material que las paredes de los conductos y con una pendiente negativa a lo largo del sistema, lo que evita la acumulación de partículas sólidas en el conducto de entrada.

### **Dispositivo de Entrada de gas sucio (Lampo de entrada)**

El flujo de gas de combustión que ingresa a cada cámara de gas sucio de cada compartimiento es regulado a través de un dispositivo de cierre, el cual se caracteriza por ser una compuerta oscilante accionada por un actuador electroneumático, con cierre hermético y una instalación adecuada para zonas con polvo. Este sistema incluye válvulas distribuidoras e interruptores de fin de carrera (“limit switch”) para la indicación de posición abierta/cerrada.

Estos dispositivos se encargan de bloquear el ingreso de gas sucio a las bolsas filtrantes, por lo que son esenciales para realizar tareas de mantenimiento o limpieza de los compartimientos. También cumplen una función crítica en la prevención de emisiones contaminantes a la atmósfera en caso de falla del sistema de filtración.

Por lo general, estos componentes permanecen abiertos durante la operación normal, y se cierran únicamente cuando es necesario aislar un compartimiento para realizar mantenimiento, mientras el resto del sistema continúa en operación.

---

El plano correspondiente al dispositivo de entrada de gas sucio (lampo de entrada) se presenta en el Anexo A.

### **Dispositivo salida gas limpio (Válvula Poppet)**

El gas de combustión tratado o gas limpio sale de los compartimientos a través de la tobera de salida y pasa hacia el múltiple de salida. Cada múltiple recolecta el gas de combustión de los ocho compartimientos. Las toberas y el múltiple de salida tienen el tamaño adecuado para reducir al mínimo la caída de presión ocasionada por las velocidades altas del gas de combustión.

En cada tobera de salida hay un regulador que consiste en una válvula de compuerta tipo poppet (disco), con interruptores limitadores para la indicación de abierto/cerrado. Estos componentes están normalmente abiertos, excepto cuando es necesario aislar un compartimiento para su mantenimiento, mientras el resto de los compartimientos sigue en línea o durante el modo de limpieza fuera de línea.

El gas de combustión filtrado de cada cámara de gas limpio pasa a través de un orificio hacia el conducto de gas limpio, para ser transportado hacia la chimenea por medio de los ventiladores de tiro inducido. Tanto el orificio como el conducto de salida tienen el tamaño adecuado para minimizar la caída de presión provocada por las altas velocidades del gas.

Para regular la salida de gas limpio a la atmósfera se cuenta con un dispositivo de cierre que consiste en una válvula de compuerta de tipo asiento (poppet), accionada por un actuador neumático, con cierre hermético y una instalación adecuada para zonas con polvo. Este sistema incluye válvulas distribuidoras e interruptores de fin de carrera (“limit switch”) para la indicación de posición abierta/cerrada.

Al igual que los dispositivos de entrada de gas de combustión no tratado, estos componentes permanecen abiertos en todo momento, excepto cuando es necesario aislar un compartimiento para realizar operaciones de mantenimiento, mientras los

---

demás compartimientos continúan en operación.

El plano correspondiente a la válvula poppet se presenta en el Anexo A.

### **Válvula de derivación de gas**

Para evitar daños en las bolsas filtrantes por exposición a temperaturas elevadas, cada conjunto de filtros cuenta con una válvula de derivación de gas de combustión. Esta válvula se abre de manera automática en caso de que la temperatura del gas de entrada alcance los 91 [°C].

Su función principal es desviar el flujo de gas caliente antes de que ingrese al sistema de filtrado, protegiendo así los elementos filtrantes de posibles fallas térmicas. Esta acción preventiva permite mantener la integridad del sistema y evitar paradas no programadas por sobre temperatura.

### **Tolvas recolectoras de polvo**

Durante el proceso de filtración, después de cada ciclo de limpieza de las bolsas filtrantes, el polvo desprendido cae por acción de la gravedad a las tolvas recolectoras de polvo. Estas tienen como función principal la eliminación del material particulado para su correcta disposición en el sistema de tratamiento de cenizas. Cada compartimiento posee su propia tolva, por lo tanto, están diseñadas para que, en caso de problemas en una cámara, las demás puedan seguir funcionando sin necesidad de detener la operación del filtro de tela.

Las tolvas utilizadas son de tipo piramidal y están compuestas por los siguientes elementos:

- Parte superior e inferior de la tolva.
- Placa deflectora.
- Escotilla de inspección.

- 
- Air pad (almohadilla de aire).
  - Vibrador eléctrico.
  - Calentador eléctrico.
  - Compuerta deslizable.

Las tolvas se encuentran aguas abajo de los dispositivos de entrada de gas de combustión (lampos de entrada) y en la parte inferior de la entrada de gas a la cámara correspondiente. Esta configuración permite la aislación en caso de falla del compartimiento. En la entrada del gas, en la parte superior de la tolva, se encuentra una placa deflectora que distribuye uniformemente el gas de combustión sobre las bolsas filtrantes, mejorando la eficiencia de limpieza.

La escotilla de inspección está ubicada aproximadamente en la parte media de la tolva y permite visualizar su estado en terreno, siendo un componente importante para las tareas de mantenimiento.

El vibrador eléctrico se encuentra aproximadamente a la mitad de la altura de la tolva y genera vibraciones en su superficie interna para desprender el polvo acumulado y facilitar su recolección. Está compuesto por un motor eléctrico que hace girar un eje conectado a una masa vibrante. La Figura 2.20 muestra ejemplos del funcionamiento del vibrador eléctrico.

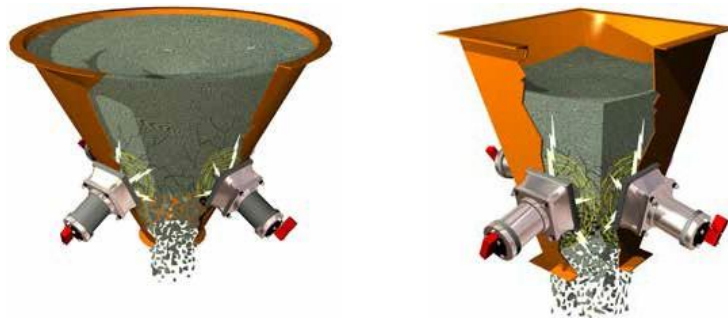


Figura 2.20: Ejemplo de esquema de funcionamiento de vibradores eléctricos

---

El air pad o almohadilla de aire, ilustrado en la Figura 2.21, corresponde a una unidad de aireación fijada en la parte inferior de la tolva. Mediante la inyección de aire, se utiliza para disipar la aglomeración de granos de polvo en la superficie de la tolva, facilitando el flujo y descarga del material. Se cuenta con 4 [u] por tolva. La almohadilla está fabricada en acero inoxidable austenítico (SUS304) por su alta resistencia a la corrosión. Posee una tobera conectada que distribuye el aire de limpieza uniformemente a través de los orificios en su base.

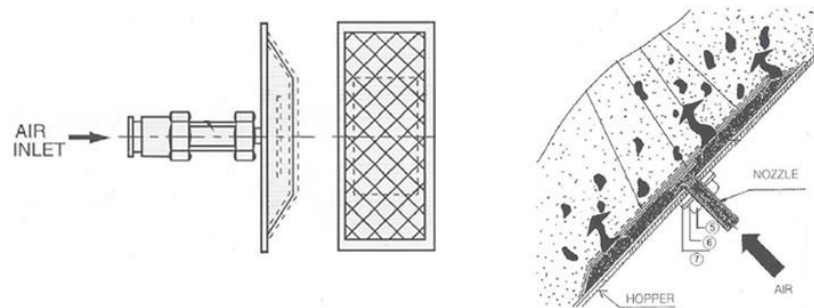


Figura 2.21: Ejemplo de esquema de funcionamiento de las Almohadillas de aire

Los calentadores eléctricos se utilizan para prevenir la condensación dentro de las tolvas, la cual puede provocar corrosión y aglutinamiento de partículas sólidas. Están compuestos por resistencias eléctricas que, al calentarse, transfieren calor a las partículas, reduciendo la humedad y mejorando la eficiencia de descarga. Se ubican en las paredes inferiores de la tolva y su operación es controlada por un termostato de doble contacto. En caso de baja temperatura, se activa una alarma en el sistema DCS (Digital Control System), iniciando el funcionamiento de los calentadores eléctricos.

En la parte inferior de la tolva se encuentra la compuerta deslizante, cuya función es controlar el flujo de partículas sólidas que salen de la tolva. Está ubicada entre la brida inferior de la tolva y la válvula hermética de charnela doble. Está compuesta por un cuerpo principal, brida, tapa con placa deslizante, empaquetadura, tornillo, cojinete y volante. Además de controlar el flujo de salida de ceniza, permite realizar tareas de mantenimiento cuando está cerrada.

---

### **2.2.3. Situación actual del mantenimiento de Fabric Filter**

La base del sistema de mantenimiento actual de los Fabric Filter consiste en la combinación de dos planes de mantenimiento que interactúan entre sí. El primero corresponde a un plan basado en la experiencia y recomendaciones de los fabricantes, mientras que el segundo se enfoca en mantenimientos realizados durante paradas programadas y grandes revisiones.

### **2.2.4. Mantenimiento realizado actualmente a los Fabric Filter**

Basándose en la Norma UNE 13306:2018 [2], se realizó el análisis de los tipos de mantenimiento utilizados para este sistema:

1. Mantenimiento correctivo (después de la avería): consiste en realizar el mantenimiento después del reconocimiento de una avería, con el objetivo de poner un elemento en condiciones de cumplir su función requerida. Dependiendo del equipo afectado, el tipo de avería y sus consecuencias, este se clasifica en:
  - a. Diferido: no se realiza inmediatamente después de detectarse la avería, sino que se retrasa según reglas establecidas.
  - b. Inmediato: se ejecuta sin demora tras la detección de la avería, a fin de evitar consecuencias inaceptables.
2. Mantenimiento preventivo (antes del fallo): se lleva a cabo para evaluar y/o mitigar la degradación y reducir la probabilidad de fallo de un elemento. Según el análisis de los datos operacionales, se clasifica en:
  - a. Mantenimiento predeterminado: se realiza de acuerdo con intervalos de tiempo establecidos o con un número definido de unidades de funcionamiento, sin análisis previo de la condición del elemento. Estos intervalos pueden definirse a partir del conocimiento de los mecanismos de fallo.

- 
- b. Mantenimiento basado en la condición: incluye una combinación de evaluación de condiciones físicas, análisis y posibles acciones posteriores. La evaluación puede realizarse mediante observación del operador, inspección, pruebas o monitoreo de parámetros del sistema, ya sea de forma programada, bajo solicitud o continua.

Los programas de mantenimiento utilizados inicialmente se basaron en las recomendaciones de los fabricantes, quienes priorizan evitar fallas durante el período de garantía, lo que puede implicar una mayor frecuencia de mantenimiento. Esta estrategia puede generar sobrecostos en mano de obra por intervenciones innecesarias para mantener la confiabilidad operativa.

Con el tiempo, la experiencia del personal y la mejora de los métodos de trabajo han permitido optimizar los planes de mantenimiento, tanto en aspectos técnicos como logísticos y administrativos. Se han instaurado chequeos exhaustivos del estado de las mangas, lo que permite definir cuáles deben ser reemplazadas, junto con mejoras en los procedimientos de trabajo.

Además, se ha comenzado a analizar la calidad de los canastillos y mangas, lo que ha permitido identificar las características necesarias para su correcto funcionamiento. Sin embargo, continúan presentándose fallas entre los mantenimientos programados, lo que genera problemas en la operación del filtro y de la unidad.

Dada la importancia de los Fabric Filter dentro de la operación de las unidades para mantener los niveles de material particulado dentro de lo permitido por el D.S. N°13 [10], y los costos que genera un deficiente mantenimiento de estos equipos, se genera la necesidad de identificar las causas que estarían provocando las fallas, con el fin de obtener una mayor confiabilidad en el desempeño operacional del sistema, lo que permitiría prolongar el periodo entre las intervenciones de mantenimiento.

#### **2.2.5. Historial de fallas**

---

Para optimizar y mejorar continuamente la gestión de mantenimiento, AES utiliza el sistema informático SAP (Systeme Anwendungen und Produkte), el cual permite gestionar los recursos de la empresa a nivel integral. Su utilidad radica en la recopilación y procesamiento de datos, proporcionando información útil para la toma de decisiones en las distintas áreas de la organización.

La planificación y programación del mantenimiento mediante SAP es administrada por el Departamento de Planificación de la Central, con el objetivo de aprovechar al máximo los recursos disponibles, coordinar las actividades con el Departamento de Mantenimiento y asegurar la disponibilidad operacional de los activos.

Dado el número de equipos que componen el sistema de abatimiento Fabric Filter, se realizó un análisis de criticidad para determinar los componentes más relevantes. Para ello, se utilizó el historial de fallas registrado en SAP, a través de los Avisos, que corresponden a notificaciones de avería o solicitudes de mantenimiento.

La clasificación de los Avisos se realizó según el tipo de evento o falla notificada, utilizando la siguiente nomenclatura:

- M1: Solicitud de mantenimiento preventivo o predictivo.
- M2: Aviso de avería/falla que impide el cumplimiento de la función del equipo.
- M3: Aviso de actividad no productiva o no asociada a la generación de energía.
- PM: Mantenimiento preventivo/predictivo generado automáticamente por SAP, según criterios definidos por el Departamento de Planificación.

El levantamiento de información consideró los Avisos del sistema Fabric Filter entre los años 2018 y 2023 (hasta octubre), con un total de 953 registros: 494 correspondientes a Nueva Ventanas y 459 a Campiche.

En las Tablas 2.1,2.2,2.3,2.4,2.5 y 2.6, se presenta un resumen de los avisos por

tipo, comprendidos entre los años 2018 y 2023 para las Unidades Nueva Ventanas y Campiche.

Tabla 2.1: Avisos 2018

AÑO	TIPO AVISO	NUEVA VENTANAS (V3)		CAMPICHE (V4)		TOTAL (V3+V4)	
		Nº	%	Nº	%	Nº	%
2018	M1	0	0%	0	0%	0	0%
2018	M2	38	52%	0	0%	38	52%
2018	M3	1	1%	0	0%	1	1%
2018	PM	34	47%	0	0%	34	47%
<b>TOTAL</b>		<b>73</b>	<b>100%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>73</b>	<b>100%</b>

Tabla 2.2: Avisos 2019

AÑO	TIPO AVISO	NUEVA VENTANAS (V3)		CAMPICHE (V4)		TOTAL (V3+V4)	
		Nº	%	Nº	%	Nº	%
2019	M1	1	1%	0	0%	1	0%
2019	M2	24	23%	41	31%	65	27%
2019	M3	1	1%	1	1%	2	1%
2019	PM	80	75%	89	68%	169	71%
<b>TOTAL</b>		<b>106</b>	<b>100%</b>	<b>131</b>	<b>100%</b>	<b>237</b>	<b>100%</b>

Tabla 2.3: Avisos 2020

AÑO	TIPO AVISO	NUEVA VENTANAS (V3)		CAMPICHE (V4)		TOTAL (V3+V4)	
		Nº	%	Nº	%	Nº	%
2020	M1	2	2%	0	0%	2	1%
2020	M2	18	20%	35	41%	53	30%
2020	M3	1	1%	0	0%	1	1%
2020	PM	69	77%	51	59%	120	68%
<b>TOTAL</b>		<b>90</b>	<b>100%</b>	<b>86</b>	<b>100%</b>	<b>176</b>	<b>100%</b>

Tabla 2.4: Avisos 2021

AÑO	TIPO AVISO	NUEVA VENTANAS (V3)		CAMPICHE (V4)		TOTAL (V3+V4)	
		N°	%	N°	%	N°	%
2021	M1	0	0%	0	0%	0	0%
2021	M2	8	11%	45	46%	53	31%
2021	M3	0	0%	0	0%	0	0%
2021	PM	64	89%	52	54%	116	69%
<b>TOTAL</b>		<b>72</b>	<b>100%</b>	<b>97</b>	<b>100%</b>	<b>169</b>	<b>100%</b>

Tabla 2.5: Avisos 2022

AÑO	TIPO AVISO	NUEVA VENTANAS (V3)		CAMPICHE (V4)		TOTAL (V3+V4)	
		N°	%	N°	%	N°	%
2022	M1	0	0%	0	0%	0	0%
2022	M2	28	32%	19	38%	47	34%
2022	M3	0	0%	0	0%	0	0%
2022	PM	59	68%	31	62%	90	66%
<b>TOTAL</b>		<b>87</b>	<b>100%</b>	<b>50</b>	<b>100%</b>	<b>137</b>	<b>100%</b>

Tabla 2.6: Avisos 2023

AÑO	TIPO AVISO	NUEVA VENTANAS (V3)		CAMPICHE (V4)		TOTAL (V3+V4)	
		N°	%	N°	%	N°	%
2023	M1	0	0%	0	0%	0	0%
2023	M2	13	20%	20	35%	33	27%
2023	M3	0	0%	0	0%	0	0%
2023	PM	53	80%	37	65%	90	73%
<b>TOTAL</b>		<b>66</b>	<b>100%</b>	<b>57</b>	<b>100%</b>	<b>123</b>	<b>100%</b>

En la Tabla 2.7 se presenta el consolidado de los Avisos entre 2018 y 2023, donde se concluye que el 68 % corresponde a mantenimientos preventivos/predictivos, el 32 % a averías, y menos del 1 % a actividades puntuales o no productivas.

Tabla 2.7: Total de Avisos comprendidos entre 2018-2023

TIPO AVISO	NUEVA VENTANAS (V3)		CAMPICHE (V4)		TOTAL (V3+V4)	
	N°	%	N°	%	N°	%
M1	3	1%	0	0,0%	3	0%
M2	129	26%	160	38%	289	32%
M3	3	1%	1	0,2%	4	0%
M4	359	73%	260	62%	619	68%
<b>TOTAL</b>	<b>494</b>	<b>100%</b>	<b>421</b>	<b>100%</b>	<b>915</b>	<b>100%</b>

La Tabla 2.8 muestra los mantenimientos preventivos/predictivos periódicos realizados a los Fabric Filter de las Unidades 3 y 4, según información entregada por el Departamento de Planificación.

Tabla 2.8: Mantenimientos preventivos/predictivos ejecutados

SISTEMA/EQUIPO	ÁREA ENCARGADA	TIPO MANTENIMIENTO	FRECUENCIA
Válvulas de aire de soplado Fabric Filter A	Instrumentación	Preventivo	6 Meses
Válvulas de aire de soplado Fabric Filter B	Instrumentación	Preventivo	6 Meses
Transmisor de presión diferencial de gases de entrada y salida Fabric Filter A-B	Instrumentación	Preventivo	2 Semanas
Sensores de nivel de tolvas Fabric Filter A-B	Instrumentación	Preventivo	3 Meses
Montacargas eléctrico Fabric Filter A	Mecánica	Preventivo	2 Meses
Montacargas eléctrico Fabric Filter B	Mecánica	Preventivo	2 Meses
Panel Control Local Fabric Filter A	Instrumentación	Preventivo	1 Mes
Panel Control Local Fabric Filter B	Instrumentación	Preventivo	1 Mes

Para determinar los modos de falla de los equipos, se utilizó el historial de fallas extraído de los Avisos tipo M2 (avería), organizados por equipo y por año. Esta información fue utilizada para elaborar la matriz de criticidad.

A continuación, en la Tabla 2.9, se presentan las fallas y su respectiva ocurrencia para el año 2018 de la Unidad 3, tener en cuenta que no existieron avisos para la Unidad 4:

Tabla 2.9: Fallas extraídas desde SAP para el año 2018 de Unidad 3

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	20
2	TRANS PRES DIF	Indicación errática/fija	4
3	TUBO SOPLADO	Junta de expansión dañada	2
4	VV POPPET	No cierra completamente	2
5	VV PULSOS DE AIRE	Filtración de aire por membrana	2
6	VV PULSOS DE AIRE	No completa carrera de apertura	2
7	LAMPO ENTRADA	No opera en remoto	1
8	PANEL CONTROL LOCAL	Trip fuente poder por acumulacion ceniza	1
9	VIBRADOR ELÉCTRICO	Eje de vibrador trabado	1
10	VV GUILLOTINA	Falla en el cierre	1
11	VV POPPET	Falla apertura	1
12	VV PULSOS DE AIRE	Falla electroválvula	1

A continuación, en las Tablas 2.10 y 2.11, se presentan las fallas y su respectiva ocurrencia para el año 2019 de las Unidades 3 y 4 respectivamente:

Tabla 2.10: Fallas extraídas desde SAP para el año 2019 de Unidad 3

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	VV PULSOS DE AIRE	Falla en operación soplado	4
2	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	3
3	ESTRUCTURA	Iluminación deficiente	2
4	LAMPO ENTRADA	No cierra	2
5	VV PULSOS DE AIRE	Falla electroválvula	2
6	VV PULSOS DE AIRE	Tubo de aire comprimido desconectado/dañado	2
7	AIR PAD	Línea aire comprimida rota	1
8	CABEZ AIRE COMPR	Filtración de aire por drenaje	1
9	CABEZ AIRE COMPR	Regulador de aire de instrumento con filtración	1
10	COMPARTIMIENTO	Filtración por tapa superior	1
11	VIBRADOR ELÉCTRICO	Falla eléctrica	1
12	VV POPPET	Falla electroválvula (apertura y cierre)	1
13	VV POPPET	Falla sensor apertura	1
14	VV POPPET	Falta lubricación vástagos	1
15	VV POPPET	Filtración aire por electroválvula	1

Tabla 2.11: Fallas extraídas desde SAP para el año 2019 de Unidad 4

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	VV PULSOS DE AIRE	Pegada abierta	8
2	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	4
3	BOLSAS FILTRANTES	Jaula desajustada	3
4	TRANS PRES DIF	Indicación errática/fija	3
5	VV PULSOS DE AIRE	Filtración de aire por membrana	3
6	CABEZ AIRE COMPR	Filtración de aire por drenaje	2
7	LAMPO ENTRADA	No cierra	2
8	VIBRADOR ELÉCTRICO	Ruido anormal	2
9	VV POPPET	Filtración aire por electroválvula	2
10	VV PULSOS DE AIRE	Falla en operación soplado	2
11	CONDUCTO ENTRADA	Falla sensor T°	1
12	ESTRUCTURA	Iluminación deficiente	1
13	PANEL CONTROL LOCAL	Boton reset no funciona	1
14	PANEL CONTROL LOCAL	Falla PLC	1
15	VIBRADOR ELÉCTRICO	Falla eléctrica	1
16	VV GUILLOTINA	Falla en el cierre	1
17	VV PULSOS DE AIRE	Falla electroválvula	1
18	VV PULSOS DE AIRE	Obstrucción línea de soplado	1
19	VV PULSOS DE AIRE	Pegada cerrada	1
20	VV PULSOS DE AIRE	Tubo de aire comprimido desconectado/dañado	1

A continuación, en las Tablas 2.12 y 2.13, se presentan las fallas y su respectiva ocurrencia para el año 2020 de las Unidades 3 y 4 respectivamente:

Tabla 2.12: Fallas extraídas desde SAP para el año 2020 de Unidad 3

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	3
2	ESTRUCTURA	Iluminación deficiente	2
3	LAMPO ENTRADA	Filtración de aire por silenciador de electroválvula	2
4	MONTACARGA FF	Cable eléctrico torcido	2
5	PANEL CONTROL LOCAL	Punto caliente en breaker	2
6	VV POPPET	Filtración aire por electroválvula	2
7	ESTRUCTURA	Panel de policarbonato (externa) quebrado	1
8	MONTACARGA COMP	Cable eléctrico torcido	1
9	TRANS PRES DIF	Indicación errática/fija	1
10	VV POPPET	Falla en operación apertura-cierre	1
11	VV POPPET	Operación errática	1

Tabla 2.13: Fallas extraídas desde SAP para el año 2020 de Unidad 4

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	VV PULSOS DE AIRE	Pegada abierta	5
2	LAMPO ENTRADA	Sensores posicionamiento dañados	4
3	PANEL CONTROL LOCAL	Punto caliente en breaker	4
4	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	3
5	VV POPPET	Brazo desajustado a plato	2
6	VV POPPET	Falla sensor apertura	2
7	VV POPPET	Filtración aire por electroválvula	2
8	VV PULSOS DE AIRE	Falla al cierre	2
9	VV PULSOS DE AIRE	Falla en operación soplado	2
10	CONDUCTO SALIDA	Obstrucción línea	1
11	MONTACARGA FF	Cable eléctrico torcido	1
12	PANEL CONTROL LOCAL	Amperímetro descalibrado	1
13	PANEL CONTROL LOCAL	Falla en botón de operación	1
14	PANEL CONTROL LOCAL	Panel con suciedad	1
15	PANEL CONTROL LOCAL	Punto caliente en bornera	1
16	PANEL CONTROL LOCAL	Sin indicación de T°	1
17	TRANS PRES DIF	Indicación errática/fija	1
18	VV POPPET	Falla al cierre	1

A continuación, en las Tablas 2.14 y 2.15, se presentan las fallas y su respectiva ocurrencia para el año 2021 de las Unidades 3 y 4 respectivamente:

Tabla 2.14: Fallas extraídas desde SAP para el año 2021 de Unidad 3

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	2
2	PANEL CONTROL LOCAL	Punto caliente en breaker	2
3	PANEL CONTROL LOCAL	Falla en información entregada DCS	1
4	VV POPPET	Falla al cierre	1
5	VV PULSOS DE AIRE	Pegada abierta	1
6	VV PULSOS DE AIRE	Tubo de aire comprimido desconectado/dañado	1

Tabla 2.15: Fallas extraídas desde SAP para el año 2021 de Unidad 4

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	3
2	CABEZ AIRE COMPR	Regulador de aire de instrumento con filtración	1
3	CALENTADORES TOLV	Baja temperatura	2
4	CALENTADORES TOLV	Apagados	1
5	ESTRUCTURA	Iluminación deficiente	1
6	LAMPO ENTRADA	Desajuste mecánico actuador	2
7	LAMPO ENTRADA	Sensores posicionamiento dañados	2
8	LAMPO ENTRADA	No opera	1
9	TRANS PRES DIF	Indicación errática/fija	1
10	TUBO SOPLADO	Fisura en tubos de soplado	1
11	VV POPPET	Falla al cierre	9
12	VV POPPET	Falla apertura	5
13	VV POPPET	Falla en operación apertura-cierre	1
14	VV PULSOS DE AIRE	Falla en operación soplado	5
15	VV PULSOS DE AIRE	Filtración de aire por membrana	3
16	VV PULSOS DE AIRE	No opera	2
17	VV PULSOS DE AIRE	Pegada cerrada	2
18	VV PULSOS DE AIRE	Pegada abierta	1
19	VV PULSOS DE AIRE	Pegada cerrada	1

A continuación, en las Tablas 2.16 y 2.17, se presentan las fallas y su respectiva ocurrencia para el año 2022 de las Unidades 3 y 4 respectivamente:

Tabla 2.16: Fallas extraídas desde SAP para el año 2022 de Unidad 3

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	VV PULSOS DE AIRE	Rotura conector tubo aire comprimido	6
2	VIBRADOR ELÉCTRICO	Baja vibración	4
3	VV POPPET	Filtración aire por electroválvula	3
4	VV PULSOS DE AIRE	Pegada abierta	3
5	ESTRUCTURA	Iluminación deficiente	2
6	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	1
7	CALENTADORES TOLV	Apagados	1
8	COMPARTIMIENTO	Ruido anormal	1
9	CONDUCTO SALIDA	Obstrucción línea	1
10	MONTARCAGA COMPR	Botonera mal estado	1
11	PANEL CONTROL LOCAL	Falla control HMI	1
12	PANEL CONTROL LOCAL	Punto caliente en bornera	1
13	TRANS PRES DIF	Línea de toma obstruida	1
14	VV POPPET	Falla apertura	1
15	VV PULSOS DE AIRE	Falla en operación soplado	1

Tabla 2.17: Fallas extraídas desde SAP para el año 2022 de Unidad 4

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	4
7	CALENTADORES TOLV	Apagados	1
8	LAMPO ENTRADA	Sensores posicionamiento dañados	1
3	TRANS PRES DIF	Indicación errática/fija	2
4	VV POPPET	Falla al cierre	2
9	VV POPPET	No opera	1
2	VV PULSOS DE AIRE	Filtración de aire por membrana	3
5	VV PULSOS DE AIRE	Rotura conector tubo aire comprimido	2
6	VV PULSOS DE AIRE	Tarjeta soplado sin energía	2
10	VV PULSOS DE AIRE	Falla en operación soplado	1

A continuación, en las Tablas 2.18 y 2.19 se presentan las fallas y su respectiva ocurrencia para el año 2023 de las Unidades 3 y 4 respectivamente:

Tabla 2.18: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 3

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	4
2	VV PULSOS DE AIRE	Rotura conector tubo aire comprimido	3
3	TOLVA	Indicación nivel alto	1
4	TOLVA	Rotura en pared	1
5	TRANS PRES DIF	Indicación errática/fija	1
6	VV POPPET	No cierra completamente	1
7	VV PULSOS DE AIRE	Filtración de aire por membrana	1
8	VV PULSOS DE AIRE	Tarjeta soplado sin energía	1

Tabla 2.19: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 4

ÍTEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN DE LA AVERÍA	OCURRENCIA
1	VV PULSOS DE AIRE	Filtración de aire por membrana	10
2	VV POPPET	Falla Electroválvula (apertura y cierre)	2
3	BOLSAS FILTRANTES	Mangas rotas	1
4	ESTRUCTURA	Iluminación deficiente	1
5	LAMPO ENTRADA	Sensores posicionamiento dañados	1
6	TOLVA	Rotura en pared	1
7	VV POPPET	Falla en operación apertura-cierre	1
8	VV POPPET	Falla sensor apertura	1
9	VV POPPET	No cierra completamente	1
10	VV PULSOS DE AIRE	Rotura conector tubo aire comprimido	1

Sobre la base de los resultados anuales para V3 y V4, se obtuvieron las Tablas 2.20 y 2.21 respectivamente:

Tabla 2.20: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 3

ÍTEM	EQUIPO	Nº FALLAS	%
1	BOLSAS FILTRANTES	33	26%
2	VV PULSOS DE AIRE	30	23%
3	VV POPPET	17	13%
4	PANEL CONTROL LOCAL	8	6%
5	ESTRUCTURA	7	5%
6	TRANS PRES DIF	7	5%
7	VIBRADOR ELÉCTRICO	6	5%
8	LAMPO ENTRADA	5	4%
9	CABEZ AIRE COMPR	2	2%
10	COMPARTIMIENTO	2	2%
11	MONTACARGA COMP	2	2%
12	MONTACARGA FF	2	2%
13	TOLVA	2	2%
14	TUBO SOPLADO	2	2%
15	AIR PAD	1	1%
16	CALENTADORES TOLV	1	1%
17	CONDUCTO SALIDA	1	1%
18	VV GUILLLOTINA	1	1%

Tabla 2.21: Fallas extraídas desde SAP para el año 2023 de Unidad 4

ÍTEM	EQUIPO	Nº FALLAS	%
1	VV PULSOS DE AIRE	59	37%
2	VV POPPET	32	20%
3	BOLSAS FILTRANTES	18	11%
4	LAMPO ENTRADA	13	8%
5	PANEL CONTROL LOCAL	12	8%
6	TRANS PRES DIF	7	4%
7	CALENTADORES TOLV	4	3%
8	CABEZ AIRE COMPR	3	2%
9	ESTRUCTURA	3	2%
10	VIBRADOR ELÉCTRICO	3	2%
11	CONDUCTO ENTRADA	1	1%
12	CONDUCTO SALIDA	1	1%
13	MONTACARGA FF	1	1%
14	TOLVA	1	1%
15	TUBO SOPLADO	1	1%
16	VV GUILLLOTINA	1	1%

Se determinó que tanto para la Unidad 3 como para la Unidad 4, los equipos que presentan un mayor porcentaje de ocurrencia de fallas corresponden a las bolsas filtrantes, las válvulas de pulsos de aire y las válvulas poppet.

---

## CAPÍTULO 3: JERARQUIZACIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS

### 3.1. Jerarquización de equipos

Uno de los principales desafíos en la gestión de mantenimiento es ejecutar y planificar las tareas de manera eficiente, considerando que los recursos disponibles suelen ser limitados. Este aspecto es fundamental para elaborar un plan de mantenimiento viable, especialmente en sistemas complejos como los filtros de tela, donde la cantidad de tareas necesarias para cubrir todas las fallas de los componentes y subsistemas puede volverse excesiva, desviando el foco principal de optimización de recursos.

Una herramienta ampliamente utilizada en la planificación de mantenimiento es la matriz de criticidad, la cual permite evaluar la importancia de un equipo o sistema en función de la combinación de dos factores: probabilidad de falla y consecuencias del riesgo. Esta evaluación permite identificar los equipos críticos y asignarles los recursos necesarios para asegurar el cumplimiento de sus funciones.

Además, la matriz de criticidad proporciona una visión integral de las consecuencias de las fallas, que no solo afectan el ámbito operacional, sino también aspectos relacionados con la seguridad, el medio ambiente y la calidad.

### 3.2. Matriz de criticidad

AES cuenta con una estructura de criticidad de activos definida, la cual permite representar de manera más precisa los riesgos asociados y facilita la integración de la información de criticidad entre sus distintas plantas.

La definición del nivel de criticidad de los activos se utiliza como entrada para seleccionar las herramientas de análisis más adecuadas, con el fin de establecer estrategias de mantenimiento específicas para cada componente.

Mediante el análisis cualitativo y cuantitativo de los equipos y sus respectivas

fallas, considerando diversos criterios de impacto, se obtiene un valor adimensional que representa la asignación de criticidad correspondiente.

En la Tabla 3.1 se presenta la matriz de criticidad definida por AES Andes, con sus respectivos niveles de probabilidad y consecuencias. Esta matriz considera los siguientes criterios:

Tabla 3.1: Matriz de Criticidad definida por AES Andes S.A.

			Nivel de Consecuencia			
			Low	Medium	High	Very High
			1	100	500	1000
Nivel Probabilidad	Frecuente	5	5	500	2500	5000
	Probable	1	1	100	500	1000
	Posible	0.3	0.3	30	150	300
	Remoto	0.1	0.1	10	50	100
	Improbable	0.05	0.05	5	25	50

### 3.2.1. Nivel de Criticidad

Para la evaluación de la matriz de criticidad, se definen los niveles de criticidad de acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de cada equipo y/o sistema.

En la Tabla 3.2 se presentan los niveles de criticidad definidos por AES Andes S.A., los cuales permiten clasificar los activos según el impacto que sus fallas pueden generar en la operación, seguridad, medio ambiente y calidad. Esta clasificación es fundamental para priorizar los recursos de mantenimiento y establecer estrategias adecuadas para cada componente.

Tabla 3.2: Nivel de criticidad definido por AES Andes S.A.

Nivel de Criticidad	Descripción de Criticidad	Valor en Matriz de Criticidad
A	High Critical	1000 to 5000
B	Critical	150 to 500
C	Important	10 to 100
D	Non-Critical	0.05 to 5

### 3.2.2. Asignación de criticidad utilizando NTR

El concepto de criticidad de un equipo corresponde a una manifestación del enfoque de gestión de riesgos. Reconoce que los activos poseen distintos niveles de importancia y representan diferentes vulnerabilidades para la organización.

Para determinar y cuantificar el grado general de criticidad de cada equipo se utiliza el Número Total de Riesgos (NTR), el cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NTR = P_F * (SH + E + Op + Q) \quad (3)$$

Donde:

- $P_F$ : Factor de probabilidad de ocurrencia de falla.
- $SH$ : Factor de consecuencia en seguridad y salud.
- $E$ : Factor de consecuencia medioambiental.
- $Op$ : Factor de consecuencia operacional.
- $Q$ : Factor de consecuencia en calidad.

Este valor adimensional permite priorizar los equipos en función del riesgo total que representan, considerando tanto la probabilidad de falla como el impacto que esta puede generar en distintos ámbitos.

---

### 3.2.3. Evaluación de equipos

De acuerdo con la descripción técnica, funcional y operacional de los equipos presentada en el punto 2.2.2. Descripción de los componentes, se realiza la evaluación de criticidad considerando los criterios definidos previamente.

Para los cálculos posteriores, se consolidó la base de datos del historial de fallas por equipos para las Unidades 3 y 4, comprendido entre las Tablas 2.9 y 2.19. Estas fallas fueron clasificadas por equipo y se les asignó el nivel y factor correspondiente para cada criterio de evaluación.

### 3.2.4. Probabilidad de ocurrencia de falla

Para iniciar la evaluación de los equipos, se determina la probabilidad de ocurrencia de falla, la cual corresponde a un factor basado en el análisis de la cantidad de veces que ocurre un modo de falla durante los años considerados en el estudio.

El nivel de probabilidad está definido por la Tabla 3.3, que presenta la escala utilizada por AES Andes para clasificar este criterio.

Tabla 3.3: Nivel de probabilidad definido por AES Andes S.A.

Nivel de Probabilidad	Factor	Descripción
Frecuente	5	Un evento en un año. $T < 1$
Probable	1	Un evento entre 1 y 3 años. $1 < T < 3$
Posible	0.3	Un Evento entre 3 y 10 años. $3 < T < 10$
Remoto	0.1	Un Evento entre 10 años y ciclo de Vida. $10 < T < \text{Lifecycle}$
Improbable	0.05	Un evento en el Ciclo de Vida. $T \Rightarrow \text{Lifecycle}$

Los resultados obtenidos para cada unidad se presentan en las Tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3.4: Cálculo de probabilidad de ocurrencia de falla para Nueva Ventanas

Ítem	Equipo	Historial de fallas						Ocurrencia Falla	
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	Nivel de probabilidad	Factor
1	Bolsas filtrantes	20	3	3	2	1	4	Frecuente	5
2	Transmisor de presión diferencial	4	0	1	0	1	1	Frecuente	5
3	Válvula poppet	3	4	4	1	4	1	Frecuente	5
4	Válvula pulsos de aire	5	8	0	2	10	5	Frecuente	5
5	Lampo entrada	1	2	2	0	0	0	Probable	1
6	Panel control local	1	0	2	3	2	0	Probable	1
7	Estructura	0	2	3	0	2	0	Probable	1
8	Vibrador eléctrico de tolvas	1	1	0	0	4	0	Probable	1
9	Conducto de salida	0	0	0	0	1	0	Posible	0,3
10	Tubo de soplado	2	0	0	0	0	0	Posible	0,3
11	Air pad tolva	0	1	0	0	0	0	Posible	0,3
12	Cabezal de aire comprimido	0	2	0	0	0	0	Posible	0,3
13	Calentador de tolva	0	0	0	0	1	0	Posible	0,3
14	Compartimiento	0	1	0	0	1	0	Posible	0,3
15	Montacarga bolsas filtrantes	0	0	2	0	0	0	Posible	0,3
16	Montacarga compresor	0	0	1	0	1	0	Posible	0,3
17	Tolva (estructura)	0	0	0	0	0	2	Posible	0,3
18	Válvula guillotina	1	0	0	0	0	0	Posible	0,3

Tabla 3.5: Cálculo de probabilidad de ocurrencia de falla para Campiche

Ítem	Equipo	Historial de fallas					Ocurrencia Falla	
		2019	2020	2021	2022	2023	Nivel de probabilidad	Factor
1	Bolsas filtrantes	7	3	3	4	1	Frecuente	5
2	Lampo entrada	2	4	5	1	1	Frecuente	5
3	Transmisor de presión diferencial	3	1	1	2	0	Frecuente	5
4	Válvula poppet	2	7	15	3	5	Frecuente	5
5	Válvula pulsos de aire	17	9	14	8	11	Frecuente	5
6	Panel control local	2	9	0	0	0	Probable	1
7	Estructura	1	0	1	0	1	Probable	1
11	Cabezal de aire comprimido	2	0	1	0	0	Probable	1
12	Calentador de tolva	0	0	3	1	0	Probable	1
8	Conducto de entrada	1	0	0	0	0	Posible	0,3
9	Conducto de salida	0	1	0	0	0	Posible	0,3
10	Tubo de soplado	0	0	1	0	0	Posible	0,3
13	Montacarga bolsas filtrantes	0	1	0	0	0	Posible	0,3
14	Tolva (estructura)	0	0	0	0	1	Posible	0,3
15	Válvula guillotina	1	0	0	0	0	Posible	0,3
16	Vibrador eléctrico de tolvas	3	0	0	0	0	Posible	0,3

Estas tablas permiten visualizar la frecuencia relativa de fallas por equipo, lo que constituye una base cuantitativa para la asignación del factor  $P_F$  en el cálculo del Número Total de Riesgos (NTR).

---

### 3.2.5. Consecuencia seguridad y salud

Las fallas en los equipos pueden generar incidentes graves que afecten la seguridad y salud de las personas, tanto internas como externas a la Central. AES Andes considera la seguridad como uno de sus valores fundamentales, por lo que este criterio debe ser evaluado conforme a las políticas internas de la compañía.

El nivel de consecuencia en seguridad y salud está definido por la Tabla 3.6, la cual presenta la escala de clasificación utilizada por AES Andes S.A.

Tabla 3.6: Nivel de consecuencia en Seguridad y Salud definido por AES Andes

Nivel de Consecuencia	Factor	Descripción de consecuencia Seguridad y Salud
Very High	1000	Fatalidad Potencial.
High	500	Incidente con tiempo perdido. (LTI o CIP)
Medium	100	Incidente registrable.
Low	1	Menor, primeros auxilios o no incidente.

Para el desarrollo de este criterio se considera el riesgo potencial de las fallas sobre la seguridad de las personas y el impacto en términos de duración del evento. Esta evaluación se basa en las descripciones funcionales previamente realizadas para los equipos del sistema.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.7 y 3.8.

Tabla 3.7: Cálculo de consecuencia seguridad y salud para Nueva Ventanas

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Lampo entrada	Medio	100
2	Bolsas filtrantes	Bajo	1
3	Transmisor de presión diferencial	Bajo	1
4	Válvula poppet	Bajo	1
5	Válvula pulsos de aire	Bajo	1
6	Panel control local	Bajo	1
7	Estructura	Bajo	1
8	Vibrador eléctrico de tolvas	Bajo	1
9	Conducto de salida	Bajo	1
10	Tubo de soplado	Bajo	1
11	Air pad tolva	Bajo	1
12	Cabezal de aire comprimido	Bajo	1
13	Calentador de tolva	Bajo	1
14	Compartimiento	Bajo	1
15	Montacarga bolsas filtrantes	Bajo	1
16	Montacarga compresor	Bajo	1
17	Tolva (estructura)	Bajo	1
18	Válvula guillotina	Bajo	1

Tabla 3.8: Cálculo de consecuencia seguridad y salud para Campiche

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Lampo entrada	Medio	100
2	Bolsas filtrantes	Bajo	1
3	Transmisor de presión diferencial	Bajo	1
4	Válvula poppet	Bajo	1
5	Válvula pulsos de aire	Bajo	1
6	Panel control local	Bajo	1
7	Estructura	Bajo	1
8	Cabezal de aire comprimido	Bajo	1
9	Calentador de tolva	Bajo	1
10	Conducto de entrada	Bajo	1
11	Conducto de salida	Bajo	1
12	Tubo de soplado	Bajo	1
13	Montacarga bolsas filtrantes	Bajo	1
14	Tolva (estructura)	Bajo	1
15	Válvula guillotina	Bajo	1
16	Vibrador eléctrico de tolvas	Bajo	1

### 3.2.6. Consecuencia medio ambiente

El correcto funcionamiento del sistema de abatimiento mediante filtros de tela es

---

fundamental para cumplir con la normativa ambiental vigente [10], especialmente en lo relativo al control de emisiones de material particulado generado por los gases de combustión de la caldera.

La creciente conciencia sobre el cambio climático y sus efectos ha incrementado la relevancia de este criterio, dado que las emisiones contaminantes pueden generar impactos crónicos y agudos sobre el medio ambiente.

El nivel de consecuencia medioambiental está definido por la Tabla 3.9, la cual establece la escala de clasificación utilizada por AES Andes S.A.

Tabla 3.9: Nivel de criticidad definido por AES Andes S.A.

Nivel de Consecuencia	Factor	Descripción de consecuencia Medio Ambiente
Very High	1000	Remediación extensiva.
High	500	Remediación considerable.
Medium	100	Mínima remediación o incumplimiento Normativo.
Low	1	No requiere remediación.

Para el desarrollo de este criterio se considera el riesgo potencial de las fallas sobre el medio ambiente, así como el impacto en términos de las medidas necesarias para reparar el daño, deterioro o inconveniente generado.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.10 y 3.11:

Tabla 3.10: Cálculo de consecuencia medio ambiente para Nueva Ventanas

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Lampo entrada	Alto	500
2	Bolsas filtrantes	Alto	500
3	Transmisor de presión diferencial	Alto	500
4	Válvula poppet	Alto	500
5	Válvula pulsos de aire	Alto	500
6	Panel control local	Medio	100
7	Estructura	Medio	100
8	Conducto de salida	Medio	100
9	Tubo de soplado	Medio	100
10	Vibrador eléctrico de tolvas	Bajo	1
11	Air pad tolva	Bajo	1
12	Cabezal de aire comprimido	Bajo	1
13	Calentador de tolva	Bajo	1
14	Compartimiento	Bajo	1
15	Montacarga bolsas filtrantes	Bajo	1
16	Montacarga compresor	Bajo	1
17	Tolva (estructura)	Bajo	1
18	Válvula guillotina	Bajo	1

Tabla 3.11: Cálculo de consecuencia medio ambiente para Campiche

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Lampo entrada	Alto	500
2	Bolsas filtrantes	Alto	500
3	Transmisor de presión diferencial	Alto	500
4	Válvula poppet	Alto	500
5	Válvula pulsos de aire	Alto	500
6	Panel control local	Medio	100
7	Estructura	Medio	100
8	Cabezal de aire comprimido	Medio	100
9	Calentador de tolva	Medio	100
10	Conducto de entrada	Medio	100
11	Conducto de salida	Bajo	1
12	Tubo de soplado	Bajo	1
13	Montacarga bolsas filtrantes	Bajo	1
14	Tolva (estructura)	Bajo	1
15	Válvula guillotina	Bajo	1
16	Vibrador eléctrico de tolvas	Bajo	1

### 3.2.7. Consecuencia operacional

La consecuencia operacional corresponde a la valoración del impacto que una falla puede tener en la generación eléctrica, ya sea por una salida forzada de la unidad o por

---

un derrateo (reducción de carga de generación).

Este criterio considera el tiempo de indisponibilidad del equipo y su efecto directo sobre la capacidad de producción de la central. Para su evaluación se toma en cuenta la experiencia de personal especializado en operación, mantenimiento y planificación, así como información técnica complementaria como planos, diagramas de flujo y P&ID.

El nivel de consecuencia operacional está definido por la Tabla 3.12, la cual presenta la escala de clasificación utilizada por AES Andes.

Tabla 3.12: Nivel de consecuencia Operacional definido por AES Andes S.A.

Nivel de Consecuencia	Factor	Descripción de consecuencia Operacional
Very High	1000	Salida Forzada por más de 3 días o equivalente en derrateo
High	500	Salida Forzada entre 1 y 3 días o equivalente en derrateo
Medium	100	Salida Forzada menor a 24 horas o equivalente en derrateo
Low	1	Reparación menor, no hay pérdida de producción

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.13 y 3.14:

Tabla 3.13: Cálculo de consecuencia operacional para Nueva Ventanas

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Bolsas filtrantes	Media	100
2	Transmisor de presión diferencial	Media	100
3	Lampo entrada	Baja	1
4	Válvula poppet	Baja	1
5	Válvula pulsos de aire	Baja	1
6	Panel control local	Baja	1
7	Estructura	Baja	1
8	Conducto de salida	Baja	1
9	Tubo de soplado	Baja	1
10	Vibrador eléctrico de tolvas	Baja	1
11	Air pad tolva	Baja	1
12	Cabezal de aire comprimido	Baja	1
13	Calentador de tolva	Baja	1
14	Compartimiento	Baja	1
15	Montacarga bolsas filtrantes	Baja	1
16	Montacarga compresor	Baja	1
17	Tolva (estructura)	Baja	1
18	Válvula guillotina	Baja	1

Tabla 3.14: Cálculo de consecuencia operacional para Campiche

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Bolsas filtrantes	Media	100
2	Transmisor de presión diferencial	Media	100
3	Lampo entrada	Baja	1
4	Válvula poppet	Baja	1
5	Válvula pulsos de aire	Baja	1
6	Panel control local	Baja	1
7	Estructura	Baja	1
8	Cabezal de aire comprimido	Baja	1
9	Calentador de tolva	Baja	1
10	Conducto de entrada	Baja	1
11	Conducto de salida	Baja	1
12	Tubo de soplado	Baja	1
13	Montacarga bolsas filtrantes	Baja	1
14	Tolva (estructura)	Baja	1
15	Válvula guillotina	Baja	1
16	Vibrador eléctrico de tolvas	Baja	1

### 3.2.8. Calidad

La consecuencia en calidad se refiere al impacto que una falla puede tener sobre la

---

reputación corporativa de la empresa, considerando la percepción de los grupos de interés tales como clientes, accionistas, proveedores, autoridades y comunidades.

Este criterio contempla factores como:

- Calidad de los productos o servicios.
- Responsabilidad social corporativa.
- Imagen institucional.
- Ética empresarial.
- Gestión organizacional.

La percepción de estos grupos se basa en las acciones internas y externas que desarrolla la empresa, por lo que las fallas en los sistemas críticos pueden afectar directamente la confianza y credibilidad de AES Andes.

El nivel de consecuencia en calidad está definido por la Tabla 3.15, que presenta la escala de clasificación utilizada por AES Andes.

Tabla 3.15: Nivel de consecuencia en Calidad definido por AES Andes S.A.

Nivel de Consecuencia	Factor	Descripción de consecuencia Calidad
Very High	1000	Daño a la reputación.
High	500	Riesgo a la reputación
Medium	100	Riesgo temporal a la reputación
Low	1	Sin riesgo a la reputación

Para el desarrollo de este criterio se considera el impacto que las fallas de los equipos del sistema de abatimiento pueden tener sobre los grupos de interés mencionados, especialmente en lo relativo al daño reputacional de la empresa. Los resultados de esta evaluación se presentan en las Tablas 3.16 y 3.17.

Tabla 3.16: Cálculo de consecuencia de calidad para Nueva Ventanas

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Bolsas filtrantes	Medio	100
2	Transmisor de presión diferencial	Medio	100
3	Lampo entrada	Medio	100
4	Válvula poppet	Medio	100
5	Válvula pulsos de aire	Medio	100
6	Panel control local	Bajo	1
7	Estructura	Bajo	1
8	Conducto de salida	Bajo	1
9	Tubo de soplado	Bajo	1
10	Vibrador eléctrico de tolvas	Bajo	1
11	Air pad tolva	Bajo	1
12	Cabezal de aire comprimido	Bajo	1
13	Calentador de tolva	Bajo	1
14	Compartimiento	Bajo	1
15	Montacarga bolsas filtrantes	Bajo	1
16	Montacarga compresor	Bajo	1
17	Tolva (estructura)	Bajo	1
18	Válvula guillotina	Bajo	1

Tabla 3.17: Cálculo de consecuencia de calidad para Campiche

Ítem	Equipo	Nivel de consecuencia	Factor
1	Bolsas filtrantes	Medio	100
2	Transmisor de presión diferencial	Medio	100
3	Lampo entrada	Medio	100
4	Válvula poppet	Medio	100
5	Válvula pulsos de aire	Medio	100
6	Panel control local	Bajo	1
7	Estructura	Bajo	1
8	Cabezal de aire comprimido	Alto	1
9	Calentador de tolva	Bajo	1
10	Conducto de entrada	Bajo	1
11	Conducto de salida	Bajo	1
12	Tubo de soplado	Bajo	1
13	Montacarga bolsas filtrantes	Bajo	1
14	Tolva (estructura)	Bajo	1
15	Válvula guillotina	Bajo	1
16	Vibrador eléctrico de tolvas	Bajo	1

### 3.2.9. Cálculo de NTR

Una vez definidos los factores de evaluación para cada criterio, se procede al cálculo del Número Total de Riesgos (NTR), según la Ecuación N°3, para cada equipo

del sistema de abatimiento de material particulado. Este valor permite establecer el nivel de criticidad de cada componente, facilitando la priorización de recursos y la definición de estrategias de mantenimiento específicas.

En las Tablas 3.18 y 3.19 se presenta el cálculo del NTR para los equipos del sistema de Fabric Filter analizados, sobre la base del historial de fallas de las Unidades Nueva Ventanas y Campiche.

Tabla 3.18: Evaluación de criticidad de equipos para Nueva Ventanas

Ítem	Equipo	Historial de fallas						Ocurrencia	Seguridad y	Medio	Operacional	Calidad	Evaluación de criticidad	
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	Falla	Salud	Ambiente	Factor	Factor	NTR	Nivel de criticidad
1	Bolsas filtrantes	20	3	3	2	1	4	5	1	500	100	100	3505	A
2	Transmisor de presión diferencial	4	0	1	0	1	1	5	1	500	100	100	3505	A
3	Válvula poppet	3	4	4	1	4	1	5	1	500	1	100	3010	A
4	Válvula pulsos de aire	5	8	0	2	10	5	5	1	500	1	100	3010	A
5	Lampo entrada	1	2	2	0	0	0	1	100	500	1	100	701	A
6	Panel control local	1	0	2	3	2	0	1	1	100	1	1	103	B
7	Estructura	0	2	3	0	2	0	1	1	100	1	1	103	B
8	Conducto de salida	0	0	0	0	1	0	0,3	1	100	1	1	30,9	C
9	Tubo de soplado	2	0	0	0	0	0	0,3	1	100	1	1	30,9	C
10	Vibrador eléctrico de tolvas	1	1	0	0	4	0	1	1	1	1	1	4	D
11	Air pad tolva	0	1	0	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1,2	D
12	Cabezal de aire comprimido	0	2	0	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1,2	D
13	Calentador de tolva	0	0	0	0	1	0	0,3	1	1	1	1	1,2	D
14	Compartimiento	0	1	0	0	1	0	0,3	1	1	1	1	1,2	D
15	Montacarga bolsas filtrantes	0	0	2	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1,2	D
16	Montacarga compresor	0	0	1	0	1	0	0,3	1	1	1	1	1,2	D
17	Tolva (estructura)	0	0	0	0	0	2	0,3	1	1	1	1	1,2	D
18	Válvula guillotina	1	0	0	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1,2	D

Tabla 3.19: Evaluación de criticidad de equipos para Campiche

Ítem	Equipo	Historial de fallas					Ocurrencia	Seguridad y	Medio	Operacional	Calidad	Evaluación de criticidad	
		2019	2020	2021	2022	2023	Falla	Salud	Ambiente	Factor	Factor	NTR	Nivel de criticidad
1	Bolsas filtrantes	7	3	3	4	1	5	1	500	100	100	3505	A
2	Transmisor de presión diferencial	3	1	1	2	0	5	1	500	100	100	3505	A
3	Lampo entrada	2	4	5	1	1	5	100	500	1	100	3505	A
4	Válvula poppet	2	7	15	3	5	5	1	500	1	100	3010	A
5	Válvula pulsos de aire	17	9	14	8	11	5	1	500	1	100	3010	A
6	Panel control local	2	9	0	0	0	1	1	100	1	1	103	B
7	Estructura	1	0	1	0	1	1	1	100	1	1	103	B
8	Cabezal de aire comprimido	2	0	1	0	0	1	1	100	1	1	103	C
9	Calentador de tolva	0	0	3	1	0	1	1	100	1	1	103	C
10	Conducto de entrada	1	0	0	0	0	0,3	1	100	1	1	31	C
11	Conducto de salida	0	1	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1	D
12	Tubo de soplado	0	0	1	0	0	0,3	1	1	1	1	1	D
13	Montacarga bolsas filtrantes	0	1	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1	D
14	Tolva (estructura)	0	0	0	0	1	0,3	1	1	1	1	1	D
15	Válvula guillotina	1	0	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1	D
16	Vibrador eléctrico de tolvas	3	0	0	0	0	0,3	1	1	1	1	1	D

### 3.2.10. Elaboración de Matriz de Criticidad

De las Tablas de evaluación de criticidad 3.18 y 3.19, se obtienen los siguientes

resultados:

Tabla 3.20: Resumen análisis de criticidad para Nueva Ventanas

Nivel de criticidad	Descripción de criticidad	Activo
A	Alta Criticidad	Bolsas filtrantes
A	Alta Criticidad	Transmisor de presión diferencial
A	Alta Criticidad	Válvula poppet
A	Alta Criticidad	Válvula pulsos de aire
A	Alta Criticidad	Lampo entrada
<b>Total A</b>		<b>5</b>
B	Crítico	Panel control local
B	Crítico	Estructura
<b>Total B</b>		<b>2</b>
C	Importante	Conducto de salida
C	Importante	Tubo de soplado
<b>Total C</b>		<b>2</b>
D	No Crítico	Vibrador eléctrico de tolvas
D	No Crítico	Air pad tolva
D	No Crítico	Cabezal de aire comprimido
D	No Crítico	Calentador de tolva
D	No Crítico	Compartimiento
D	No Crítico	Montacarga bolsas filtrantes
D	No Crítico	Montacarga compresor
D	No Crítico	Tolva (estructura)
D	No Crítico	Válvula guillotina
<b>Total D</b>		<b>9</b>

Tabla 3.21: Resumen análisis de criticidad para Campiche

Nivel de criticidad	Descripción de criticidad	Activo
A	Alta Criticidad	Bolsas filtrantes
A	Alta Criticidad	Transmisor de presión diferencial
A	Alta Criticidad	Válvula poppet
A	Alta Criticidad	Válvula pulsos de aire
A	Alta Criticidad	Lampo entrada
<b>Total A</b>		<b>5</b>
B	Crítico	Panel control local
B	Crítico	Estructura
<b>Total B</b>		<b>2</b>
C	Importante	Conducto de entrada
C	Importante	Conducto de salida
C	Importante	Tubo de soplado
<b>Total C</b>		<b>3</b>
D	No Crítico	Vibrador eléctrico de tolvas
D	No Crítico	Cabezal de aire comprimido
D	No Crítico	Calentador de tolva
D	No Crítico	Montacarga bolsas filtrantes
D	No Crítico	Tolva (estructura)
D	No Crítico	Válvula guillotina
<b>Total D</b>		<b>6</b>

---

A partir del análisis de criticidad de las Tablas 3.20 y 3.21, se identificó que para los niveles de Alta Criticidad (A) y Críticos (B) las Unidades Nueva Ventanas y Campiche poseen los mismos equipos. Para los niveles Importantes (C) se observan los mismos equipos, con la diferencia en la inclusión del Conducto de entrada para Campiche. En el caso del nivel más bajo No Crítico (D) se identifican los mismos equipos, a excepción de la inclusión de los equipos Air Pad, Compartimiento y Montacarga de Compresor para Nueva Ventanas, lo que se infiere a fallas específicas en un momento determinado.

El objetivo de realizar los análisis anteriores por Unidad fue comparar si los resultados finales tenían influencia por la operación de cada Unidad, determinándose que los equipos analizados se encuentran en el mismo nivel de criticidad.

Para la elaboración de la Matriz de Criticidad se consolidaron los equipos y su nivel de criticidad en la Tabla 3.22, de manera de realizar un análisis más conservador, considerando que, si bien se poseen pequeñas diferencias, estas son en los niveles más bajos, mientras que los equipos de Alta Criticidad y Críticos son iguales para ambas Unidades. Sobre la base de estos resultados, se pone de manifiesto que el sistema tiende a fallar en los mismos activos, a pesar de las diferencias de operación que puedan existir en la generación.

Tabla 3.22: Resumen análisis de criticidad para las Unidades 3 y 4

Nivel de criticidad	Descripción de criticidad	Activo
A	Alta Criticidad	Bolsas filtrantes
A	Alta Criticidad	Transmisor de presión diferencial
A	Alta Criticidad	Válvula poppet
A	Alta Criticidad	Válvula pulsos de aire
A	Alta Criticidad	Lampo entrada
<b>Total A</b>		<b>5</b>
B	Crítico	Panel control local
B	Crítico	Estructura
<b>Total B</b>		<b>2</b>
C	Importante	Conducto de entrada
C	Importante	Conducto de salida
C	Importante	Tubo de soplado
<b>Total C</b>		<b>3</b>
D	No Crítico	Vibrador eléctrico de tolvas
D	No Crítico	Air pad tolva
D	No Crítico	Cabezal de aire comprimido
D	No Crítico	Calentador de tolva
D	No Crítico	Compartimiento
D	No Crítico	Montacarga bolsas filtrantes
D	No Crítico	Montacarga compresor
D	No Crítico	Tolva (estructura)
D	No Crítico	Válvula guillotina
<b>Total D</b>		<b>9</b>

A continuación, la Tabla 3.23 presenta la Matriz de Criticidad del Sistema de Abatimiento Fabric Filter para las Unidades 3 y 4:

Tabla 3.23: Matriz de Criticidad para el Sistema de Abatimiento Fabric Filter

			Nivel de consecuencia			
			Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
			1	100	500	1000
Nivel Probabilidad	Frecuente	5				Bolsas Filtrantes Lampos entrada Válvulas poppet Transmisor de PD Válvulas pulsos de aire
	Probable	1	Vibrador eléctrico tolvas Cabezal de aire comprimido Calentador tolva		Panel control local Estructura	
	Posible	0,3	Air Pad Compartimiento Montacarga bolsas filtrantes Montacarga compresor Tolva (estructura) Válvulas guillotinas	Conducto de entrada Conducto de salida Tubo soplado		
	Remoto	0,1				
	Improbable	0,05				

Se identificó que, para el sistema de abatimiento, el conjunto de mayor impacto significativo corresponde a los equipos que poseen la mayor participación en la operación de filtrado, que son:

- Medio filtrante (bolsas filtrantes).
- Dispositivos de apertura/cierre para la entrada y salida de los gases sucios y limpios (lampos de entrada y válvulas poppet).
- Instrumento de control e indicación de presión diferencial (transmisor de presión diferencial).
- Dispositivos encargados de la limpieza de los medios filtrantes (válvulas de pulsos de aire).

Las bolsas filtrantes son el medio de filtración de la operación del sistema, por ende, era de esperarse que su impacto fuera significativo en las consecuencias de fallas. Sin embargo, se observa una alta probabilidad de falla y, de acuerdo con los mantenimientos preventivos realizados actualmente al sistema, estos componentes no están siendo incluidos en dichos mantenimientos, por lo que su único modo de

---

mantenimiento es a la falla, es decir, el cambio solo se realiza al momento de la identificación de las bolsas filtrantes con fuga. Tampoco se poseen registros del control de parámetros para la identificación de la falla, solo se cuenta con el transmisor de presión diferencial que, tal como se observa del análisis realizado, también es un componente de alta tasa de falla e impacto para la operación. Estos precedentes tienen como consecuencia una alta amenaza a la seguridad y salud de las personas, así como al medio ambiente, pudiendo infringir las normativas ambientales del control de material particulado. En un caso crítico, esto podría tener consecuencias de multas e incluso la detención de la Unidad afectada.

En relación con las fallas de las bolsas filtrantes, es importante mencionar que si bien los Avisos de averías extraídos de SAP indicaban bolsas rotas, esto también puede ser consecuencia de fallos en las jaulas de las bolsas, ya que la mala instalación de estas puede ocasionar que en la operación de limpieza se golpeen contra las bolsas, generando la rotura de las telas.

Los dispositivos utilizados para el control del ingreso y salida de los gases de combustión y limpios, respectivamente, también poseen una criticidad elevada, además de contar con una alta probabilidad de falla. Estos componentes operan generalmente abiertos durante la operación, por lo que no tendrían un impacto importante si la operación de filtrado no presenta problemas. No obstante, debido a la alta frecuencia de fallas del sistema principal de filtración (bolsas filtrantes, válvulas de pulsos de aire) es de suma importancia contar con estos equipos en correcta operación. Adicionalmente, poseen una gran relevancia en las tareas de mantenimiento de los compartimientos, debido a que son los encargados de incomunicarlos (evitar la entrada de gases de combustión y salida de gases limpios). El no cierre puede provocar que, ante la falla de la operación de filtrado, el gas sucio no tratado fluya a la atmósfera y, por consiguiente, se produzca contaminación al medio ambiente. Al igual que para las bolsas filtrantes, tampoco están incluidos en rutas de mantenimientos preventivos, por lo que la identificación de las averías se realiza al momento de la falla.

---

Debido a la cantidad de válvulas de pulsos de aire y la frecuencia de operación en el sistema, era de prever una alta tasa de falla. Hasta cierto punto esto está siendo controlado a través de las rutas de mantenimiento preventivo ejecutadas, pero aun así persiste la alta probabilidad de falla, lo que refleja que la frecuencia en que se están realizando las tareas de mantenimiento, cada 6 meses, no está siendo adecuada y/o no se están inspeccionando los componentes correctos. Las averías impactan principalmente en la operación de filtrado de las bolsas, por lo que afectan significativamente la eficiencia de operación del sistema de abatimiento de material particulado.

Por último, se tienen los transmisores de presión diferencial, los cuales poseen un rol principal en la ejecución del limpiado de bolsas, debido a que se encargan del control de la presión en los compartimientos e indicación para el funcionamiento de la limpieza de las bolsas filtrantes a través de las válvulas de pulsos de aire, ya sea si están operando de manera automática o local. Por otro lado, su participación en el control de los parámetros de operación es vital, ya que la indicación del aumento de la presión diferencial es consecuencia de mangas rotas y/o otra avería en el compartimiento. Esta información es utilizada por los operadores (terreno o sala de control) para detener la operación de filtrado en el sector de aumento de presión diferencial, para posteriormente realizar las tareas de mantenimiento. La falla de los transmisores de presión tiene grandes impactos en la operación y control del sistema; en caso de que el transmisor no entregue la información real del compartimiento, impacta en el tiempo de detección de las fallas del sistema principal de soplado, que dependiendo del modo de falla puede incurrir en la liberación de gases de combustión sucios a la atmósfera por la errática operación de la limpieza de las válvulas de soplado y, por consiguiente, una nula filtración por las bolsas. Estos dispositivos están incluidos en las rutas de mantenimientos preventivos realizados, pero la alta tasa de ocurrencia de fallos indica que la frecuencia no está siendo la adecuada y/o que el método de revisión e inspección no está siendo el correcto.

---

### **3.3. Análisis de fallas**

A través de la elaboración de la matriz de riesgo presentada en la Tabla 3.23, se logró definir los equipos principales y más críticos del sistema Fabric Filter, para los cuales, debido a su gran impacto en la operación del sistema, se realizará el análisis de fallas correspondiente.

#### **3.3.1. Metodología RCM**

En el contexto del mantenimiento industrial, una de las metodologías más reconocidas y ampliamente utilizadas es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés). Su aplicación permite elaborar planes de mantenimiento que integran diversas estrategias, tales como mantenimiento preventivo, predictivo, búsqueda de fallas, entre otras.

El RCM se define como un proceso sistemático que busca determinar qué acciones deben realizarse para asegurar que un activo continúe cumpliendo con las funciones requeridas por sus usuarios, dentro de su contexto operacional. Esta definición se basa en los principios establecidos por Nowlan y Heap, y ha sido formalizada en la Norma SAE JA1011 [4], la cual establece los criterios mínimos que debe cumplir un proceso para ser considerado como RCM.

Según dicha norma, un proceso RCM válido debe seguir las siguientes etapas, en el orden indicado:

- i. Determinar el contexto operativo, las funciones y los estándares de rendimiento deseados asociados del activo (contexto operativo y funciones)
- ii. Determinar cómo el activo puede dejar de cumplir sus funciones (fallos funcionales)
- iii. Determinar las causas de cada fallo funcional (modos de fallo)
- iv. Determinar qué ocurre cuando se produce cada fallo (efectos del fallo)

- 
- v. Clasificar las consecuencias de los fallos (consecuencias de los fallos)
  - vi. Determinar qué debe hacerse para predecir o prevenir cada fallo (tarea e intervalos de tareas)
  - vii. Determinar si otras estrategias de gestión de fallos pueden ser más eficaces (cambios a tiempo)
  - viii. Actualmente, la metodología RCM se utiliza para:
    - Identificar tareas de mantenimiento efectivas.
    - Analizar riesgos asociados a los equipos.
    - Clasificar componentes según su criticidad.
    - Optimizar recursos y mejorar la disponibilidad de los activos

### **3.3.2. Contexto operacional, funciones y parámetros de operación**

La función principal del sistema de filtros de tela (Fabric Filter) es realizar la filtración del material particulado (MP) presente en los gases de combustión provenientes de las calderas. Específicamente, este sistema trata los gases que salen del Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA), para luego ser impulsados por los ventiladores de tiro inducido (IDF) hacia las chimeneas y finalmente liberados a la atmósfera.

A continuación, se presenta un resumen de los componentes del sistema y sus respectivas funciones, basado en la descripción técnica del punto 2.2 Filtros de tela.

- Compartimiento: Contiene los elementos esenciales del sistema de filtrado, incluyendo bolsas, jaulas, sistema de pulsos, tolvas y carcasa.
- Bolsas de filtros: Elemento básico para que se realice el proceso de filtración, ya que corresponden al medio filtrante por el cual fluye el gas de combustión y

---

se adhieren las partículas sólidas.

- Jaulas de bolsas filtrantes: Estructuras metálicas que mantienen la forma de las bolsas, evitando su colapso durante la operación y limpieza.
- Cabezal de aire comprimido: Cilindro de almacenamiento de aire comprimido conectado a cada válvula de diafragma. Proporciona aire a todas las válvulas del módulo para la limpieza de las bolsas.
- Válvulas de pulsos de aire: Válvulas tipo diafragma que inyectan aire comprimido en las bolsas para desprender la torta de polvo acumulada.
- Temporizador: Controla la frecuencia y duración de activación de las válvulas solenoides.
- Indicador de presión diferencial (manómetro): Mide la diferencia de presión en cada compartimiento del filtro de tela.
- Transmisor de presión diferencial: Mide la presión diferencial entre la entrada y salida de cada filtro, y controla el sistema de limpieza. Cuando la diferencia de presión entre el aire limpio y sucio es demasiado alta, envía una señal al sistema de limpieza para su operación. Esto indica que las bolsas filtrantes están obstruidas y necesitan limpieza. Activa la válvula poppet y el sistema de pulsos de aire.
- Tubo de soplado: Circula el aire comprimido inyectado por las válvulas diafragma hasta las boquillas ubicadas sobre las bolsas filtrantes, de manera que fluya el aire comprimido al centro de la abertura superior de cada bolsa.
- Placa tubular: Base metálica perforada donde se instalan las bolsas y sus jaulas. Permite el paso del aire de limpieza hacia las bolsas.
- Conducto de gas de combustión: Transporta el aire cargado de partículas de

---

polvo desde el SDA hacia los filtros, permitiendo que el volumen y la velocidad de alimentación sea la requerida.

- Conducto de gas limpio: Conduce el aire filtrado hacia los ventiladores de tiro inducido (IDF).
- Válvula de derivación de gas: En caso de que la temperatura del gas de combustión de entrada llegue a 91°C o más, esta válvula se activa automáticamente desviando el flujo de gas para proteger a las bolsas filtrantes.
- Lampos de entrada: Dispositivos que se encargan de bloquear el ingreso de gas sucio a las bolsas filtrantes.
- Válvulas poppet: Regula la salida de gas limpio al conducto de salida, y por ende, la atmósfera.
- Válvulas solenoides para válvulas: Se encargan de dar la señal de apertura a las válvulas diafragma, válvulas poppet y lampos de entrada.
- Tolvas recolectoras de polvo: Recogen el material particulado desprendido durante la limpieza de las bolsas para su correcta disposición en el sistema de tratamiento de cenizas.
- Air pad (almohadilla de aire): Inyecta aire en la tolva para evitar la aglomeración de polvo y facilitar su descarga.
- Vibrador eléctrico: Genera vibraciones en la superficie interna de la tolva para desprender el polvo acumulado en ella y facilitar la recogida de polvo.
- Calentadores eléctricos: Previenen el acumulamiento de condensación dentro de las tolvas, evitando corrosión y aglutinamiento de partículas sólidas.
- Compuerta deslizante: Controla el flujo de salida de partículas desde la tolva hacia el sistema de tratamiento de cenizas.

- Sensor de temperatura de entrada de gases: Mide y controla la temperatura del gas de combustión antes de ingresar al sistema de filtrado.
- Montacarga de compartimientos: Permite levantar o bajar las tapas de los compartimientos para realizar mantenimiento.
- Montacarga de compresores: Permite levantar o bajar los compresores del sistema.
- Panel de control local: Conjunto de componentes encargados del control, entrega de información para la operación remota (DSC), y en caso de fallas en la sala de control, para la operación desde terreno (local).

En la Tabla 3.24 se indican los principales parámetros de operación del sistema de filtros de tela.

Tabla 3.24: Parámetros de operación del sistema Filtros de Tela

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR OPERATIVO
Caudal de gas de entrada	m <sup>3</sup> /h	652.860
Caudal Ceniza volante entrada	kg/h	16.670
Concentración Ceniza volante (polvo) entrada	mg/Nm <sup>3</sup>	36.971,20
T° Entrada	°C	81
Presión entrada	mmH <sub>2</sub> O	-501,10
Caudal gas de salida	m <sup>3</sup> /h	664.340
Caudal Ceniza volante salida	kg/h	20
Concentración Ceniza volante (polvo) salida	mg/Nm <sup>3</sup>	44,60
T° Salida	°C	81
Presión salida	mmH <sub>2</sub> O	-671,10
Caída de presión en filtros	mmH <sub>2</sub> O	0-150
Consumo de aire de limpieza	Nm <sup>3</sup> /h	900
Presión de aire de limpieza	bar	45.081
Velocidad de filtrado (bolsa filtrante)	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> min	1.001

### 3.3.3. Fallas funcionales

Se entiende por falla funcional la condición en la que un equipo es incapaz de cumplir una o más de sus funciones requeridas dentro del sistema. Cada función puede

---

fallar de distintas maneras, por lo que un activo puede presentar diversos estados fallidos. En la metodología RCM, el término “falla funcional” se utiliza para describir estos estados, diferenciándolos del “modo de falla”, que corresponde al evento específico que causa dicho estado fallido [5].

Sobre la base del análisis presentado en el punto 3.2.2. Contexto operacional, funciones y parámetros de operación, se identifican las formas en que los equipos del sistema de filtros de tela no han logrado cumplir sus funciones. Dado el número de componentes involucrados, se prioriza el análisis de los equipos más críticos, según los resultados de la Matriz de Criticidad de la Tabla 3.23, los cuales son:

- Bolsas filtrantes
- Lamos de entrada
- Válvulas poppet
- Válvulas de pulsos de aire
- Transmisores de presión diferencial

En la Tabla 3.25 se presentan las fallas funcionales correspondientes a estos equipos críticos.

Tabla 3.25: Fallas funcionales de los equipos más críticos

EQUIPO	OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL
Bolsas Filtrantes	1. Recibir una carga de gas de combustión para filtrar las partículas sólidas	1.1 Deficiente o nula filtración de las partículas sólidas de los gases de combustión
Lampos de entrada	1. Regulación de gas de combustión que ingresa desde el conducto de entrada a cada compartimiento	1.1 Operación de apertura deficiente
Válvulas poppet	1. Regulación de gas limpio que sale desde los compartimientos al conducto de salida	1.1 Operación de apertura y cierre deficiente
Válvulas pulsos de aire	1. Operación de limpieza encargada de la eliminación de la torta de polvo de las bolsas filtrantes	1.1 En operación de apertura válvula se queda pegada 1.2 En operación de cierre válvula se queda pegada 1.3 Falta de presión del aire comprimido de limpieza 1.4 Operación errática de limpieza
Transmisor de presión diferencial	1. Medición de diferencia de presión entre los gases de entrada y salida del compartimiento de Filtros de Tela. Seteado para una caída de presión de 140-160 mmH2O	1.1 Falta de medición (Indicación errática/fija)
	2. Indicación de señales para válvulas poppet y válvulas pulsos de aire en caso de presión diferencial alta	2.1 Falta de señal

Una vez definidas las fallas funcionales, se procede con el análisis mediante la metodología AMFE (Análisis Modal de Fallas y Efectos), con el objetivo de identificar los modos de falla, sus causas y efectos, así como evaluar la criticidad de cada uno. Este análisis se desarrolla en la siguiente subsección.

### 3.3.4. Método AMFE

El Análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE) es un método cualitativo que permite identificar de forma sistemática los posibles modos de falla de un componente, junto con sus efectos y causas. Su aplicación está orientada a destacar los puntos críticos del sistema, con el fin de eliminarlos o establecer medidas preventivas que minimicen su ocurrencia o impacto [6].

El método AMFE es una herramienta fundamental dentro de la metodología RCM, ya que contribuye directamente a la identificación de modos de falla, sus causas y efectos, y a la categorización de su criticidad.

A continuación, se describen los pasos generales para la aplicación del método AMFE:

- 1) Denominación del componente e identificación: Se debe identificar el equipo,

---

incluyendo todos los subconjuntos y componentes que forman parte del sistema a analizar.

- 2) Parte del componente, operación o función: Se describe la operación o función que realiza el componente dentro del proceso.
- 3) Fallo o modo de falla: Se define como la forma en que una pieza o conjunto puede fallar potencialmente. Se describen en términos físicos o técnicos, y se recomienda numerarlos de forma correlativa.
- 4) Efecto del fallo: Corresponde al síntoma observable del modo de falla y su repercusión en el sistema. Busca describir las consecuencias no deseadas del fallo que se puede detectar u observar, siempre en términos de rendimiento o eficacia del producto o proceso deseado.
- 5) Causas del modo de falla: Se identifican las causas que originan el modo de falla, considerando debilidades de diseño, operación o mantenimiento. Se debe relacionar con la mayor amplitud posible en todas las causas del fallo concebibles que puedan asignarse a cada modo de fallo.
- 6) Medidas de ensayo y control: Se analizan las medidas de control y verificación existentes para asegurar la calidad de respuesta del componente o proceso.
- 7) Para cada modo de falla se deben considerar los siguientes conceptos:
  - a. Gravedad: Determina la importancia o severidad del efecto del modo de falla potencial y valora el nivel de consecuencias en la operación/función. Solo es posible mejorarlo con acciones en la fase de diseño, no viéndose afectado por controles derivados de la aplicación del método AMFE.
  - b. Frecuencia: Mide la repetitividad potencial u ocurrencia de una determinada falla. En términos de fiabilidad o de prevención se

- 
- identifica como aparición de la falla. Corresponde a la probabilidad de que una causa potencial de falla (causa específica) se produzca y de lugar al modo de fallo. Se trata de una evaluación subjetiva, por lo que se recomienda utilizar datos históricos cuando estén disponibles.
- c. Detectabilidad: Indica la probabilidad de que la causa y/o modo de falla sea detectado con antelación suficiente para evitar los daños, considerando los controles actuales.
  - d. Controles actuales: Indica todos los controles existentes para prevenir las causas del fallo y detectar el efecto resultante.
  - e. Índice de Prioridad de Riesgo (IPR): se compone del producto de los índices de frecuencia (F), gravedad (G) y detectabilidad (D), lo que da como resultado un código adimensional que permite priorizar la urgencia de intervención, así como el orden de las acciones correctoras. Se calcula de la siguiente manera:
  - f. Acción correctora: Concierne toda acción propuesta para la corrección. El objetivo es reducir la probabilidad de ocurrencia y la gravedad de los modos de falla. Generalmente, sigue los siguientes criterios:
  - g. Cambios en el diseño del equipo.
  - h. Modificaciones en el proceso de fabricación.
  - i. Incremento en el control o inspección.
  - j. Responsable y plazo: Se debe asignar un responsable para la implementación de cada acción correctora, junto con una fecha estimada de ejecución.

---

### 3.3.5. Aplicación del método AMFE

En base a los resultados obtenidos en la Matriz de Criticidad de la Tabla 3.23, las fallas funcionales definidas en la Tabla 3.25, y el historial de fallas extraído desde SAP, se procede a aplicar la metodología AMFE a los equipos clasificados con Alta Criticidad (A).

Los equipos seleccionados para este análisis son:

- Bolsas filtrantes
- Lampos de entrada
- Válvulas poppet
- Válvulas de pulsos de aire
- Transmisores de presión diferencial

Debido a la gran cantidad de datos implicados, el desarrollo completo del análisis se presenta en los anexos, con la siguiente distribución:

Tabla 3.26: Anexos AMFE

ANEXO	AMFE
B	Bolsas Filtrantes
C	Lampos de Entrada
D	Válvulas Poppet
E	Válvulas Pulsos de Aire
F	Transmisor de Presión Diferencial

### Resultados AMFE

En la Tabla 3.27 se presenta un resumen de los modos de falla más críticos, junto con sus respectivas causas y el valor de IPR calculado:

Tabla 3.27: Resultados IPR AMFE

EQUIPO FALLA	MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	IPR
Bolsas Filtrantes	Bolsa rota	Incorrecta instalación de la jaula de la bolsa filtrante	441
Bolsas Filtrantes	Bolsa rota	Incorrecta instalación de la jaula de la bolsa filtrante	441
Bolsas Filtrantes	Bolsa rota	Incorrecta instalación de la jaula de la bolsa filtrante	441
Bolsas Filtrantes	Bolsa rota	Jaula con bordes afilados en soldaduras de alambres	270
Bolsas Filtrantes	Obstrucción de tela	Falta de operación de limpieza	240
Bolsas Filtrantes	Obstrucción de tela	Falta de operación de limpieza	240
Bolsas Filtrantes	Obstrucción de tela	Falta de operación de limpieza	240
Bolsas Filtrantes	Obstrucción de tela	Falta de operación de limpieza	240
Bolsas Filtrantes	Obstrucción de tela	Falta de operación de limpieza	240
Válvulas Pulsos Aire	Filtración en sistema de accionamiento	Mangueras y conectores de aire comprimido sueltas o dañadas	210
Válvulas Pulsos Aire	Filtración en sistema de accionamiento	Mangueras y conectores de aire comprimido sueltas o dañadas	210
Válvulas Pulsos Aire	Filtración de aire por membrana	Rotura del diafragma y/o daños en el resorte de la válvula	196
Válvulas Pulsos Aire	Baja presión del cabezal de aire comprimido	Componentes de conexiones de aire comprimido desconectados/dañados	196
Válvulas Pulsos Aire	Filtración de aire por membrana	Rotura del diafragma y/o daños en el resorte de la válvula	196
Válvulas Pulsos Aire	Filtración de aire por membrana	Rotura del diafragma y/o daños en el resorte de la válvula	196
Válvulas Pulsos Aire	Falla en electroválvula	Filtración de aire en componentes de conexión	192
Válvulas Pulsos Aire	Falla en electroválvula	Filtración de aire en componentes de conexión	192
Transmisor PD	Falla del transmisor	Mal funcionamiento del circuito eléctrico	180
Válvulas Poppet	Falla en electroválvula	Filtración de aire	168
Válvulas Pulsos Aire	Obstrucción línea de soplado	Tubo de aire comprimido desconectado/dañado	168
Válvulas Pulsos Aire	Falla en electroválvula	Desgaste en sellos y juntas	168
Válvulas Poppet	Falla en electroválvula	Filtración de aire	168
Válvulas Pulsos Aire	Obstrucción línea de soplado	Tubo de aire comprimido desconectado/dañado	168
Válvulas Pulsos Aire	Falla en electroválvula	Desgaste en sellos y juntas	168
Transmisor PD	Falla del transmisor	Daño mecánico (impactos, vibraciones)	144
Transmisor PD	Falla del transmisor	Mal funcionamiento del circuito eléctrico	144
Bolsas Filtrantes	Disminución de vida útil de bolsa filtrante	Altos volúmenes de aire de entrada de gas de combustión	140
Válvulas Pulsos Aire	Operación temporizador deficiente	Frecuencia de pulso desajustada	140
Bolsas Filtrantes	Disminución de vida útil de bolsa filtrante	Altos volúmenes de aire de entrada de gas de combustión	140
Bolsas Filtrantes	Disminución de vida útil de bolsa filtrante	Altos volúmenes de aire de entrada de gas de combustión	140

El ordenamiento numérico de las causas de los modos de falla, según el IPR, permite identificar una primera aproximación a los puntos críticos de los equipos y componentes analizados, facilitando la priorización de las intervenciones correctivas.

La Tabla 3.27 permite identificar las fallas más críticas del sistema, siendo la rotura de las bolsas filtrantes la que genera mayor impacto y riesgo. Este resultado es coherente con la alta frecuencia de ocurrencia de este tipo de falla, además de las consecuencias graves que implica para la operación del sistema de captación de partículas sólidas y, por ende, para el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes [10].

Un aspecto relevante por considerar es que la correcta instalación de las jaulas en las bolsas filtrantes representa la causa de falla con mayor IPR. Tal como se indica en las acciones de prevención, la capacitación del personal y el registro detallado de las tareas de mantenimiento son fundamentales para lograr una operación confiable y

---

prolongar la vida útil del sistema.

Otro resultado destacado del análisis es la frecuencia de fallas en las electroválvulas (válvulas solenoides). La deficiente operación de estos componentes genera repercusiones significativas en tres de los equipos principales del sistema de filtrado: lampos de entrada, válvulas poppet y válvulas de pulsos de aire. Las causas de estas fallas están principalmente asociadas a filtraciones en el sistema de aire comprimido, lo que evidencia la necesidad de aumentar el nivel de criticidad asignado a estos componentes.

Si bien las válvulas solenoides presentan un bajo costo unitario, sus efectos sobre la operación tienen un alto impacto negativo en la eficiencia y disponibilidad del sistema. Por lo tanto, se recomienda revisar su inclusión en las estrategias de mantenimiento preventivo y considerar su reemplazo por componentes de mayor calidad o doble diafragma, que permitan una operación más rápida y controlada.

Los parámetros de operación previos al sistema de filtros de tela, es decir, los del Absorbedor de Secado por Pulverización (SDA), desempeñan un papel fundamental en la vida útil de los equipos y componentes del sistema de abatimiento. Tanto las operaciones previas a la puesta en servicio (como el precoating y el precalentamiento) como el control de parámetros durante el funcionamiento (temperatura de salida del SDA, concentración de gases ácidos, volumen de aire de entrada, entre otros) influyen directamente en el nivel y tiempo de exposición de los activos a sus condiciones máximas de diseño.

Un mayor control sobre estos parámetros puede traducirse en una mejora de la eficiencia del sistema, reflejada en la reducción del desgaste, la disminución de fallas y la optimización del uso de repuestos y recursos de mantenimiento.

Considerando el impacto y la cantidad de fallas identificadas en los equipos críticos que actualmente no cuentan con una estrategia de mantenimiento definida, se recomienda prestar especial atención a los resultados obtenidos. El enfoque debe

---

centrarse en optimizar los recursos disponibles, el tiempo de intervención y la priorización de tareas, orientando los esfuerzos hacia los equipos que representan un mayor riesgo para la disponibilidad y eficiencia del sistema de abatimiento.

### **3.3.6. Aplicación del método RCM**

Una vez aplicado el método AMFE para el análisis de los modos de falla razonablemente probables, con sus respectivos efectos identificados, acciones a realizar y responsables definidos, se continúa con la metodología RCM (Reliability-Centered Maintenance). Esta etapa contempla la evaluación de las consecuencias de cada modo de falla, el desarrollo de las tareas preventivas propuestas (acción primaria), los intervalos de ejecución, los responsables asignados y los tiempos estimados de realización.

Con el objetivo de obtener resultados más completos para la posterior elaboración del plan de mantenimiento, se determinó incorporar, además de las tareas preventivas, acciones correctivas (acción secundaria). Estas permiten establecer de forma anticipada cómo intervenir el modo de falla correspondiente en caso de que las tareas preventivas no sean suficientes o hayan fallado.

#### **Consecuencias de los modos de fallas**

Las consecuencias de los modos de falla, según la metodología RCM, pueden clasificarse en dos grandes categorías: nivel de percepción y tipo de consecuencia. Esta clasificación permite establecer el impacto que tiene cada modo de falla sobre la operación del sistema, la seguridad de las personas, el medio ambiente y la calidad del servicio.

- Nivel de percepción (H)
  - Fallas ocultas (N): Modos de falla que pueden ocurrir sin ser detectados por el personal operativo, lo que implica un riesgo elevado si no se cuenta con mecanismos de monitoreo adecuados.

- 
- Fallas evidentes (S): Modos de falla cuyos efectos son perceptibles por el personal operativo, ya sea en terreno o desde la sala de control. Estas fallas suelen generar alertas o síntomas visibles que permiten su identificación y una reacción más rápida, aunque no necesariamente reduce el impacto de la falla.
  - Tipos de consecuencias
    - Seguridad (S): Fallas que presentan una probabilidad intolerable de provocar daños a personas, ya sean trabajadores o terceros.
    - Ambientales (E): Fallas que pueden generar incumplimientos de normativas o regulaciones ambientales, como el Decreto Supremo N°13 [10], que establece límites de emisión para centrales termoeléctricas.
    - Operativas (O): Fallas que afectan directamente las funciones principales de los activos analizados, impactando la capacidad de generación eléctrica y, por ende, los ingresos de la organización.
    - No operativas (NO): Fallas que no tienen efectos directos sobre la operación, seguridad o medio ambiente, pero que implican costos indirectos asociados a la reparación, reposición o pérdida de eficiencia.

Es importante destacar que, para la identificación de las consecuencias de los modos de falla, se asume que no se está llevando a cabo ningún mantenimiento proactivo sobre el activo. Esta condición permite evaluar el impacto real de cada falla en ausencia de medidas de mitigación.

### **Selección de la estrategia a realizar**

La estrategia de mantenimiento a aplicar para cada modo de falla corresponde a la acción correctora determinada en el análisis AMFE (mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, inspecciones periódicas, reemplazo programado, etc.). Estas

---

acciones tienen como objetivo prevenir la ocurrencia de la falla, reducir su impacto o anticiparla mediante tareas de inspección, monitoreo o reemplazo programado.

Para apoyar esta selección, se utilizó el Diagrama de Decisión RCM, el cual se encuentra en el Anexo O. Este diagrama permite determinar la estrategia más adecuada para cada modo de falla, en función de la criticidad, su detectabilidad y las consecuencias asociadas.

El diagrama establece una secuencia lógica de preguntas que orientan la decisión hacia una estrategia específica. Por ejemplo, si el modo de falla tiene consecuencias graves para la seguridad o el medio ambiente, se prioriza el mantenimiento preventivo o el rediseño del componente. Si la falla es detectable y tiene consecuencias moderadas, puede optarse por inspecciones periódicas o mantenimiento predictivo.

### **Definición de la tarea a realizar**

La definición de la tarea a realizar corresponde a la descripción detallada de las actividades de mantenimiento asociadas a cada modo de falla identificado en el análisis AMFE y evaluado mediante la metodología RCM. Esta etapa es fundamental para establecer un plan de mantenimiento efectivo, ya que permite traducir los resultados del análisis en acciones concretas que pueden ser programadas, ejecutadas y controladas.

Una vez definidas las tareas a ejecutar, se procede a determinar el intervalo de ejecución de cada una. Este intervalo se establece en función del tipo de tarea (preventiva, predictiva o correctiva), la criticidad del modo de falla, la frecuencia de ocurrencia observada en el historial de fallas, y las recomendaciones del fabricante o expertos técnicos.

Posteriormente, se debe designar un responsable para la ejecución de cada tarea. Este responsable puede pertenecer al área de mantenimiento mecánico, instrumentación, operaciones u otra unidad técnica, dependiendo de la naturaleza de la

---

actividad. Es esencial que el personal asignado cuente con las competencias, herramientas y experiencia necesarias para llevar a cabo el mantenimiento de forma segura y eficiente.

Para finalizar, se debe determinar el tiempo estimado que tomará realizar cada tarea. Este tiempo se calcula utilizando datos históricos de actividades similares, experiencia del personal de mantenimiento, información técnica proporcionada por el fabricante y condiciones operacionales del sistema.

Es importante considerar que el tiempo real de ejecución puede variar, ya que en la operación diaria los factores humanos (personal, experiencia), las condiciones de trabajo, las condiciones externas (coordinación con otras áreas, disponibilidad de herramientas), entre otros, no son constantes.

Por lo tanto, si bien el tiempo estimado es una referencia útil para la planificación, se recomienda mantener cierta flexibilidad en la programación, especialmente en tareas de alta complejidad o que involucren múltiples equipos.

### **Resultados RCM**

El método AMFE permitió identificar los modos de falla potenciales de los equipos más críticos del sistema Fabric Filter, así como sus efectos, causas y acciones correctivas. Este análisis entregó una primera aproximación a las tareas preventivas necesarias, junto con los responsables asignados (áreas técnicas o departamentos especializados), información de gran utilidad para enfocar los esfuerzos de mantenimiento en los componentes o equipos con mayor probabilidad de falla.

Sobre la base de este análisis, la aplicación del método RCM permitió elaborar un estudio más detallado de los modos de falla y evaluar la necesidad de efectuar tareas para prevenirlos. Para ello, no solo se consideraron los efectos de cada falla, sino también las consecuencias e impactos que estas pueden generar para la empresa. Este enfoque permite determinar si es factible realizar esfuerzos para prevenir el modo de

---

falla o, al menos, anticiparlo mediante tareas de monitoreo o inspección.

Dado lo crítico que resulta el sistema de abatimiento para la Central, especialmente en lo que respecta al cumplimiento de las normas ambientales y al impacto en la salud de la población y de los trabajadores, era previsible que, independientemente del tipo de consecuencia del modo de falla, el nivel de atención y gestión requerido debiese considerar un aumento en el control de parámetros operacionales y en las acciones de mantenimiento.

Los resultados de los análisis realizados mediante la metodología RCM permiten establecer una relación directa entre las funciones principales de los activos y sus parámetros de operación, con las fallas funcionales, los modos de falla correspondientes, sus causas, efectos y consecuencias. Esta información permite estudiar las tareas preventivas propuestas por el AMFE y elaborar un plan de mantenimiento efectivo y eficiente, estimando la frecuencia y duración de las acciones de mantenimiento.

Para realizar un análisis más integral, se agregaron tareas de tipo correctivas (mantenimiento correctivo), cuyo objetivo es determinar las acciones a tomar en caso de que ocurra la falla y se hayan pasado por alto, o no hayan sido suficientes, las acciones de prevención del fallo.

En las Tablas 3.28 a 3.34 se presentan los resultados de la metodología RCM aplicada a los equipos más críticos del sistema:

Tabla 3.28: Metodología RCM para Bolsas Filtrantes

MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	N P R	EVALUACIÓN CONSECUENCIAS				TIPO TAREA	ACCIÓN PRIMARIO (PREVENCIÓN DE FALLA)				
			H	S	E	O		TAREA	LÍMITE ACEPTABLE	ESPECIALIDAD	FRECUENCIA	DURACIÓN
1.1.1 Bolsa Rota	Temperatura de entrada de los gases de combustión mayor a la permitida de diseño de las bolsas (103°C)	72	S	N	S	-	1	Verificación de temperatura de operación de Caldera y/o SDA	No superar el límite de operación de 91°C. Temperatura máxima de diseño de bolsas 103°C. Cómo máximo llegar a los 110 °C por un periodo de 30 minutos máximo	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	S	-	1	Inspección de funcionamiento de válvula de derivación de gas	Debe abrirse de manera automática cuando la T° del gas de combustión de entrada llegue a 91°C	MEC	90 d	1 h
	Incorrecta instalación de la jaula de la bolsa filtrante	441	S	N	S	-	4	Capacitar a personal encargado de la instalación	La suspensión del conjunto bolsa más jaula debe formar un sello sin fugas para asegurar el aislamiento	MEC	180 d	3 h
			S	N	S	-	1	Inspección visual de bolsas y jaulas (venturi y cuerpo)	No debe existir presencia de polvo en la parte superior del conjunto de bolsa más jaula	MEC	90 d	5 h
			S	N	S	-	1	Mantener un registro y control de las bolsas y jaulas instaladas	No se deben cambiar bolsas y jaulas filtrantes que no presentan indicios de fallas	MEC	90 d	0,5 h
	Jaula con bordes afilados en soldaduras de alambres	270	S	N	S	-	1	Verificar que no existan bordes afilados/dañados en las jaulas a instalar, ya sean nuevas o antiguas	La superficie del alambre de la jaula debe tener la menor rebaba posible y ser lisa	MEC	90 d	8 h
	1.1.2 Obstrucción de tela	Falta de operación de limpieza	240	S	N	S	-	2	Limpieza e inspecciones rutinarias al sistema de válvulas de pulsos de aire y electroválvulas de accionamiento	No debe existir exceso de contaminación externa	INST	7 d
S				N	S	-	1	Verificación de la correcta instalación del tubing de válvula selenoide a válvula diafragma de pulsos de aire	La conexión del tubing no debe presentar fugas o indicios de mala instalación	INST	7 d	0,5 H
S				N	S	-	1	Verificación de que cabezal de aire comprimido no tenga fugas	No deben existir fugas en los componentes del cabezal de aire (válvula de purga y temporizador)	INST	7 d	2 h
S				N	S	-	1	Verificar la frecuencia del temporizador (frecuencia del ciclo de soplado)	Tiempo de frecuencia de 2 seg (no ajustar en 10 seg)	INST	7 d	0,5 H
S				N	S	-	1	Verificar funcionamiento de fusible de tablero de temporizador	Se debe tener especial cuidado en las sobretensiones	INST	7 d	1 h
Acumulación excesiva de polvo filtrado en tolva		24	S	N	S	-	2	Verificación de funcionamiento del calentador eléctrico	Mantener la temperatura interna de tolva en 175 °C. No debe estar expuesto a menos de 3°C	INST	90 d	1 h
			S	N	S	-	2	Verificación de funcionamiento de almohadilla de aire (AIR PAD)	Consumo de aire de 3 litros por secuencia	INST	90 d	1 h
			S	N	S	-	2	Verificación de funcionamiento de válvula guillotina	Debe operar correctamente en el cierre y apertura manual	MEC	90 d	1 h
			S	N	S	-	2	Verificación de funcionamiento del vibrador rotatorio	La temperatura del motor no debe superar los 80°C	MEC	90 d	1 h
Alto porcentaje de humedad en gases de combustión		105	S	N	S	-	1	Verificación de temperatura de operación de Caldera y/o SDA	Mantener temperatura de entrada de gases no menor a 81°C y no mayor a 91°C. Temperatura máxima de diseño de bolsas 103°C. Cómo máximo llegar a los 110 °C por un periodo de 30 minutos máximo	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	S	-	2	Activar el ventilador ID y temporizador durante 10 a 20 minutos antes de realizar la operación de Filtrado	Mantener la velocidad de filtración del filtro a 1.116 m3/m2*min	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	S	-	1	Verificación de humedad de la secadora de aire comprimido	Mantener la disminución del punto de rocío del agua en el aire comprimido aproximadamente -40°C	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	S	-	1	Si el sistema está operando posterior a la puesta en marcha luego de una larga detención, verificar que se haya realizado la etapa de precalentamiento del sistema	El sistema debe precalentarse para elevar la T° interior de los compartimientos por encima del punto de rocío del gas	OPER	1 d	0,5 h

Tabla 3.29: Metodología RCM para Bolsas Filtrantes (continuación)

MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	N P R	EVALUACIÓN CONSECUENCIAS				ACCIÓN PRIMARIO (PREVENCIÓN DE FALLA)					
			H	S	E	O	TIPO TAREA	TAREA	LÍMITE ACEPTABLE	ESPECIALIDAD	FRECUENCIA	DURACIÓN
1.1.3 Corrosión en la bolsa filtrante	Aumento de niveles de gases ácidos	105	S	N	S	-	1	Verificación de temperatura de operación de salida de SDA	Mantener concentraciones de óxido de azufre (SO3) menor a 1 mg/Nm3	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	S	-	2	Si el sistema está operando posterior a la puesta en marcha luego de una larga detención, verificar que se haya realizado la operación de recubrimiento supreficial previo (pre-coating)	Espesor adecuado de capa de recubrimiento con Ca(OH)2 debe ser de 2 [mm] de cada bolsa, lo mismo que 200-300 [g/m2]. La calidad de cal utilizada debe ser ajustada a las características de diseño	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	S	-	1	Verificar que el compartimiento se encuentre correctamente aislado	No deben existir fugas en la tapa superior del compartimiento	OPER	1 d	0,5 h
1.1.4 Disminución de vida útil de bolsa filtrante	Altos volúmenes de aire de entrada de gas de combustión	140	N	-	-	-	1	Verificar que el caudal de entrada de gas sea el correcto	El caudal de entrada de los Filtros de Tela no debe ser mayor que el de diseño de 10.881 [m3/min]	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	2	Verificación del control de apertura y cierre de lampos de entrada	Lampos de entrada deben tener una apertura y cierre del 100% (automatización)	INST	90 d	3 h
			N	-	-	-	2	Revisar ajuste de compuerta de ventilador ID (prestando atención al amperaje)	La presión de succión del ventilador debe bordear los -200 mmH2O	MEC	90 d	0,5 h
	Limpieza excesiva	63	N	-	-	-	1	Inspeccionar que la tarjeta del temporizador está funcionando correctamente, comprobando el indicador luminoso	Se necesitan 14 pulsos para limpiar un compartimiento completo. Normalmente se configura en 0,2 segundos por válvula	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	1	Verificar la frecuencia del temporizador (frecuencia del ciclo de soplado)	Tiempo de frecuencia de 2 seg normalmente (no ajustar en 10 seg)	INST	7 d	0,5 h
			N	-	-	-	1	Verificar duración del temporizador (tiempo en que permanece abierta la válvula de diafragma)	Entre 0,1 y 0,2 segundos por parámetros de diseño de válvula diafragma	INST	7 d	0,5 h
N	-	-	-	1	Verificar la presión del aire comprimido de limpieza	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	INST	90 d	1 h			

Tabla 3.30: Metodología RCM para Lampos de Entrada

MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	N P R	EVALUACIÓN CONSECUENCIAS				ACCIÓN PRIMARIO (PREVENCIÓN DE FALLA)					
			H	S	E	O	TIPO TAREA	TAREA	LÍMITE ACEPTABLE	ESPECIALIDAD	FRECUENCIA	DURACIÓN
1.1.1 Sensores de posicionamiento dañados	Sensores sueltos o mal ajustados	126	S	N	S	-	2	Asegurar una correcta instalación e implementación del sensor	Deben formar un ángulo recto entre si (Open - Close). Sentido debe ser en contra de giro de damper (compuerta)	INST	90 d	2 h
			S	N	S	-	1	Inspeccionar soporte de sensor para asegurar que no este dañado	Soporte no debe presentar problemas en la soldadura a la base	INST	90 d	2 h
			S	N	S	-	1	Verificar que la fuerza de apertura y cierre se encuentre dentro de los parámetros	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	INST	90 d	1 h
1.1.2 Desajuste en damper (compuerta)	Falta de apriete mecánico en brazo palanca de damper	36	N	-	-	-	2	Realizar revisión de ajuste de apriete de manera periodica	No debe existir juego en el apriete del brazo palanca al damper y al sistema de accionamiento	MEC	90 d	3 h
	Desgaste en componentes		18	N	-	-	-	2	Lubricar componentes	Utilizar tipo de grasa y cantidades de acuerdo a fabricante	MEC	90 d
1.1.3 Falla en electroválvula	Filtración de aire	30	N	-	-	-	1	Inspecciones visuales de electroválvula y sistema de accionamiento	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	OPER	1 d	0,5 h
	Fuga en cilindro de aire		15	N	-	-	-	3	Realizar cambio periodico de los componentes de conexión (manguera, conectores)	No deben existir fugas	INST	90 d
				N	-	-	-	1	Inspecciones visuales de cilindro de aire	No deben existir fugas	INST	90 d
1.1.4 Corrosión en componentes	Aumento de niveles de gases ácidos	70	N	-	-	-	1	Verificación de concentración de gases ácidos de Caldera y/o SDA	Mantener concentraciones de óxido de azufre (SO3) menor a 1 mg/Nm3	OPER	1 d	0,5 h

Tabla 3.31: Metodología RCM para Válvulas Poppet (dispositivo de salida)

MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	N P R	EVALUACIÓN CONSECUENCIAS				TIPO TAREA	ACCIÓN PRIMARIO (PREVENCIÓN DE FALLA)				
			H	S	E	O		TAREA	LÍMITE ACEPTABLE	ESPECIALIDAD	FRECUENCIA	DURACIÓN
1.1.1 Sensores de posicionamiento dañados	Sensores sueltos o mal ajustados	105	S	N	S	-	2	Asegurar una correcta instalación e implementación del sensor	Deben ubicarse paralelamente entre sí (Open - Close), con una distancia entre centros de 600 [mm]	INST	90 d	2 h
			S	N	S	-	1	Inspeccionar soporte de sensor para asegurar que no este dañado	Soporte no debe presentar problemas en la soldadura a la base	INST	90 d	2 h
			S	N	S	-	1	Verificar que la fuerza de apertura y cierre se encuentre dentro de los parámetros	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	INST	90 d	1 h
1.1.2 Desajuste en plato de cierre	Falta de apriete mecánico en brazo palanca de damper	30	N	-	-	-	2	Realizar revisión de ajuste de apriete de manera periodica	No debe existir juego en el apriete del vástago al plato y al sistema de accionamiento	MEC	90 d	3 h
	Falta de lubricación de vástago	30	N	-	-	-	2	Lubricar componentes	Utilizar tipo de grasa y cantidades de acuerdo a fabricante	MEC	90 d	2h
	Desgaste en componentes	30	N	-	-	-	1	Realizar inspecciones del vástago, disco (compuerta) y sistema de accionamiento (cilindro de aire comprimido, válvula selenoide, conexiones)	No deben existir componentes dañados, tanto mecánicos, instrumentación y eléctrico	MEC	90 d	3 h
1.1.3 Falla en electroválvula	Filtración de aire	168	N	-	-	-	1	Inspecciones visuales de electroválvula y sistema de accionamiento	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	3	Realizar cambio periodico de los componentes de conexión (mangueras, conectores)	No deben existir fugas	INST	90 d	2 h
	Fuga en cilindro de aire	24	N	-	-	-	1	Inspecciones visuales de cilindro de aire	No deben existir fugas	INST	90 d	0,5 h
1.1.4 Corrosión en componentes	Aumento de niveles de gases ácidos	70	N	-	-	-	1	Verificación de concentración de gases ácidos de salida de SDA	Mantener concentraciones de óxido de azufre (SO3) menor a 1 mg/Nm3	OPER	1 d	0,5 h

Tabla 3.32: Metodología RCM para Válvula Pulsos de Aire

MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	N P R	EVALUACIÓN CONSECUENCIAS				TIPO TAREA	ACCIÓN PRIMARIO (PREVENCIÓN DE FALLA)				
			H	S	E	O		TAREA	LÍMITE ACEPTABLE	ESPECIALIDAD	FRECUENCIA	DURACIÓN
1.1.1 Filtración de aire por membrana	Rotura del diafragma y/o daños en el resorte de la válvula	196	S	N	N	S	1	Inspecciones visuales cuerpo válvula	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	N	S	1	Verificar la presión del aire comprimido de limpieza	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	MEC	90 d	1 h
			S	N	N	S	1	Verificar que el aire comprimido de trabajo se encuentre limpio	Aire comprimido de trabajo debe estar filtrado	INST	7 d	0,5 h
	Desgaste en sellos y juntas	120	S	N	N	S	1	Inspecciones visuales sellos y juntas	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h
S			N	N	S	3	Realizar cambio periodico de los componentes de conexión dañados	No deben existir fugas	MEC	90 d	1 h	
1.1.2 Obstrucción línea de soplado	Aire comprimido de trabajo mal filtrado	15	N	-	-	-	1	Verificar que el aire comprimido de trabajo se encuentre limpio	Aire comprimido de trabajo debe estar filtrado	INST	90 d	0,5 h
	Tubo de aire comprimido desconectado/dañado	168	N	-	-	-	1	Inspecciones visuales de conexión aire comprimido	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	1	Verificar que los conectores utilizados son los correctos	Debe ser NPT 1/8" x 3/8" (según el utilizado actualmente)	INST	90 d	1 h
1.2.1 Falla en electroválvula	Filtración de aire en componentes de conexión (mangueras y conectores)		N	-	-	-	1	Inspecciones visuales de conexión aire comprimido	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	3	Realizar cambio periodico de los componentes de conexión	No deben existir fugas	INST	90 d	2 h
			N	-	-	-	1	Inspecciones visuales sellos y juntas	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h
	Desgaste en sellos y juntas		N	-	-	-	3	Realizar cambio periodico de los componentes de conexión	No deben existir fugas	INST	90 d	2 h
			N	-	-	-	1	Inspecciones visuales tapa electroválvula	Tapa debe quedar cerrada herméticamente para evitar contaminación	INST	90 d	0,5 h
	Tapa no logra cerrar herméticamente		N	-	-	-	2	Verificar que pernos no se encuentren con desgaste	Tapa debe quedar cerrada herméticamente para evitar contaminación	INST	90 d	0,5 h
Bobina quemada		N	-	-	-	2	Pruebas de funcionamiento de válvula diafragma y electroválvula en conjunto	Voltaje de entrada de 24V DC	INST	7 d	1 h	
1.3.1 Baja presión del cabezal de aire comprimido	Fuga en cabezal de aire comprimido	112	N	-	-	-	1	Revisar que drenajes no posean fugas	Válvulas de drenajes no deben poseer fugas	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	1	Inspección visual cuerpo cabezal de aire comprimido	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar. Capacidad máxima de cabezal de 0,25 [m3] No deben existir fugas en los componentes del cabezal de aire (válvula de purga y temporizador)	INST	7 d	0,5 h
	Componentes de conexiones de aire comprimido desconectados/dañados	196	N	-	-	-	2	Verificar estado de conexiones de aire comprimido de todo el sistema (mangueras, conectores)	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	OPER	1 d	0,5 h
1.3.2 Fugas en tubo de soplado	Junta de expansión suelta o dañada	72	N	-	-	-	1	Inspección visual de junta de expansión en tubos de soplado	No deben existir fugas	MEC	90 d	1 h
1.3.3 Filtración en sistema de accionamiento	Mangueras y conectores de aire comprimido sueltas o dañadas	210	S	N	N	S	1	Inspección visual de mangueras, conectores, electroválvulas	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h
			S	N	N	S	2	Verificar funcionamiento de sistema de accionamiento (señal)	No deben existir fugas	INST	7 d	0,5 h
1.3.4 Presión de aire de limpieza menor a la de operación normal	Parámetros de operación deficientes	100	N	-	-	-	1	Inspección de conexión a cabezal de aire	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	1	Verificar parámetros de operación de aire comprimido inyectado	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	2	Verificar si existe taponamiento en las líneas de aire comprimido	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	INST	7 d	1 h

Tabla 3.33: Metodología RCM para Válvula Pulsos de Aire (continuación)

MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	EVALUACIÓN CONSECUENCIAS				ACCIÓN PRIMARIO (PREVENCIÓN DE FALLA)						
		N P R	H	S	E	O	TIPO TAREA	TAREA	LÍMITE ACEPTABLE	ESPECIALIDAD	FRECUENCIA	DURACIÓN
1.4.1 Operación temporizador deficiente	Frecuencia de pulso desajustada (frecuencia de activación de las válvulas)	140	N	-	-	-	1	Verificar la frecuencia de pulso del temporizador	No mayor a 10 segundos	INST	7 d	0,5 h
	Duración de pulso desajustada (duración de válvula abierta durante limpieza)	112	N	-	-	-	1	Verificar duración del temporizador (tiempo en que permanece abierta la válvula de diafragma)	Entre 0,1 y 0,2 segundos por parámetros de diseño de válvula diafragma	INST	7 d	0,5 h
	Tarjeta de soplado sin energía	105	N	-	-	-	1	Verificar que la alimentación eléctrica sea la permitida por el equipo	Alimentación eléctrica igual a DC 24V	INST	7 d	1 h
			N	-	-	-	1	Verificar estado de fusible (protección de sobretensiones)	Fusible no debe indicar indicios de daños Parámetros de fusible 25V/3A	INST	7 d	0,5 h
1.4.2 Obstrucción en líneas de circulación de aire comprimido	Exceso de contaminación (polvo) en sistema y ambiente	60	N	-	-	-	2	Realizar limpieza en componentes del sistema de aire comprimido del sistema de accionamiento	No deben existir fugas	INST	90 d	0,5 h
			N	-	-	-	1	Verificar que no existan fugas en la tapa superior del compartimiento	No deben existir fugas	OPER	1 d	0,5 h

Tabla 3.34: Metodología RCM para Transmisor de Presión Diferencial

MODO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	EVALUACIÓN CONSECUENCIAS				ACCIÓN PRIMARIO (PREVENCIÓN DE FALLA)						
		N P R	H	S	E	O	TIPO TAREA	TAREA	LÍMITE ACEPTABLE	ESPECIALIDAD	FRECUENCIA	DURACIÓN
1.1.1 Falla en el sensor	Acumulación de contaminantes en el sensor	42	N	-	-	-	2	Realizar limpieza periódica al transmisor	No debe haber exceso de contaminación	INST	15 d	1 h
			N	-	-	-	1	Inspecciones visuales al componente	No debe haber exceso de contaminación	OPER	1 d	0,5 h
	Daño mecánico (impactos, vibraciones)	32	N	-	-	-	1	Verificar que las vibraciones del sistema sean las permisibles	No debe existir un nivel alto de vibraciones	MEC	180 d	4 h
N			-	-	-	1	Asegurar que no se posean componentes alrededor que puedan causar daños por golpes	No debe estar expuesto a golpes	INST	15 d	1 h	
Mal funcionamiento del circuito eléctrico	180	N	-	-	-	2	Verificar funcionamiento del circuito eléctrico	Voltaje de entrada de 24V DC de transmisor	INST	15 d	0,5 h	
		N	-	-	-	2	Calibración	Rango de diseño -400 y 400 mmH2O. Diferencial de presión seteado para operación 150 mmH2O	INST	180 d	4 h	
Daño mecánico (impactos, vibraciones)	144	N	-	-	-	1	Inspecciones visuales al componente	No debe presentar daños	OPER	1 d	0,5 h	
1.1.3 Fuga en junta/sellos	Daño mecánico (impactos, vibraciones)	30	S	N	N	S	1	Inspecciones visuales al componente	No debe tener golpes por impacto, puede producir fugas	OPER	1 d	0,5 h
1.1.4 Línea de toma obstruida	Contaminación del flujo	126	N	-	-	-	2	Verificar estado de funcionamiento de lampos de entrada	El caudal de entrada de los gases de combustión no debe ser mayor que el de diseño de 10.881 [m3/min]	INST	90 d	3 h
			N	-	-	-	2	Verificar obstrucción en tomas	No debe existir contaminación en tomas	INST	15 d	1 h
2.1.1 Fallas en cableado eléctrico	Cableado desgastados/dañado	54	N	-	-	-	1	Inspección visual del circuito eléctrico del transmisor	No deben haber cables desgastados o dañados	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	2	Verificar funcionamiento de manera periódica	Caída de presión de 150 mmH2o	INST	15 d	0,5 h
2.1.2 Falla en conectores y sellos	Conectores y/o sellos desgastados/dañados	72	N	-	-	-	1	Inspección visual del circuito eléctrico del transmisor	No debe existir fugas por sello y juntas	OPER	1 d	0,5 h
			N	-	-	-	2	Verificar funcionamiento de manera periódica	Caída de presión de 150 mmH2o	INST	15 d	0,5 h

---

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE REPUESTOS CRÍTICOS

Previo al diseño del plan de mantenimiento, se elaboró un listado de repuestos críticos con el objetivo de asegurar una operación confiable del sistema Fabric Filter. Este análisis se fundamenta en el consumo histórico de materiales, extraído a partir de las reservas realizadas para los avisos ejecutados entre los años 2018 y 2023.

Dado el volumen de datos por año, se utilizó la herramienta de Diagrama de Pareto, con el fin de identificar los materiales que representan el 80 % del gasto total en cada período.

- El año 2018 se realizó un gasto total de CLP 104.503.890

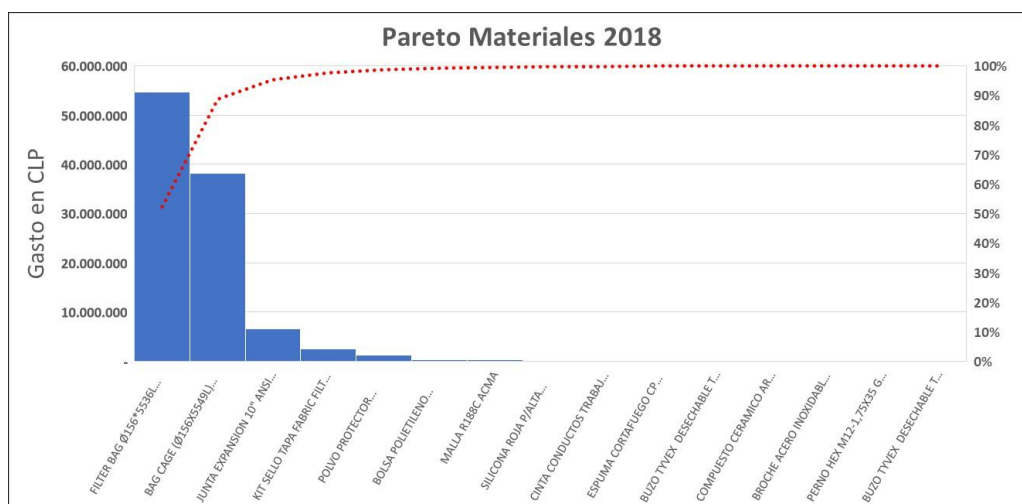


Figura 4.1: Diagrama de Pareto para Materiales 2018

- El año 2019 se realizó un gasto total de CLP 46.987.60

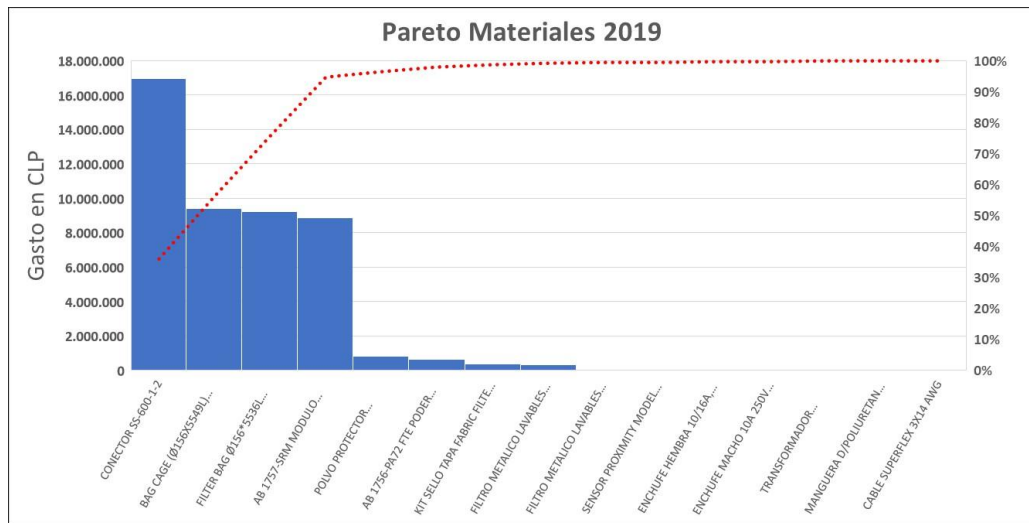


Figura 4.2: Diagrama de Pareto para Materiales 2019

- El año 2020 se realizó un gasto total de CLP 64.055.817

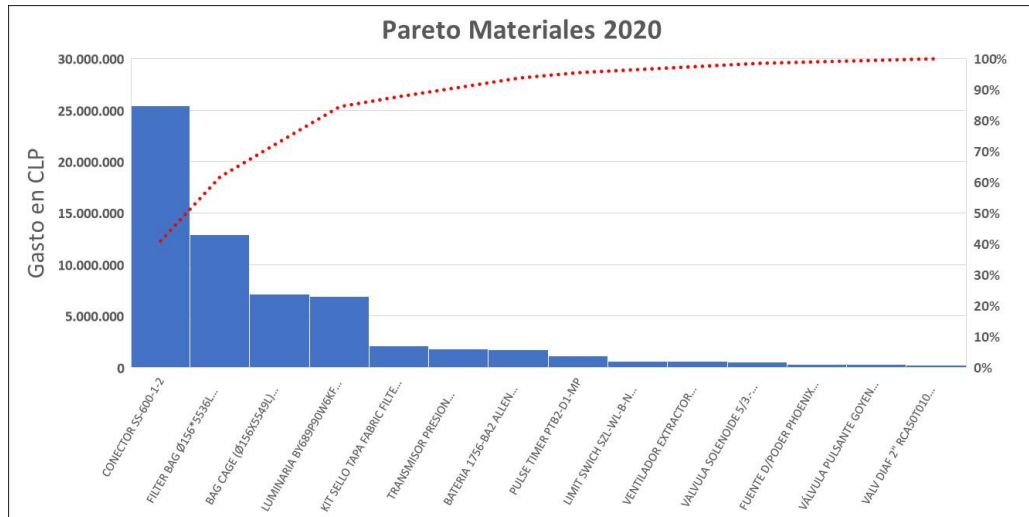


Figura 4.3: Diagrama de Pareto para Materiales 2020

- El año 2021 se realizó un gasto total de CLP 39.961.905

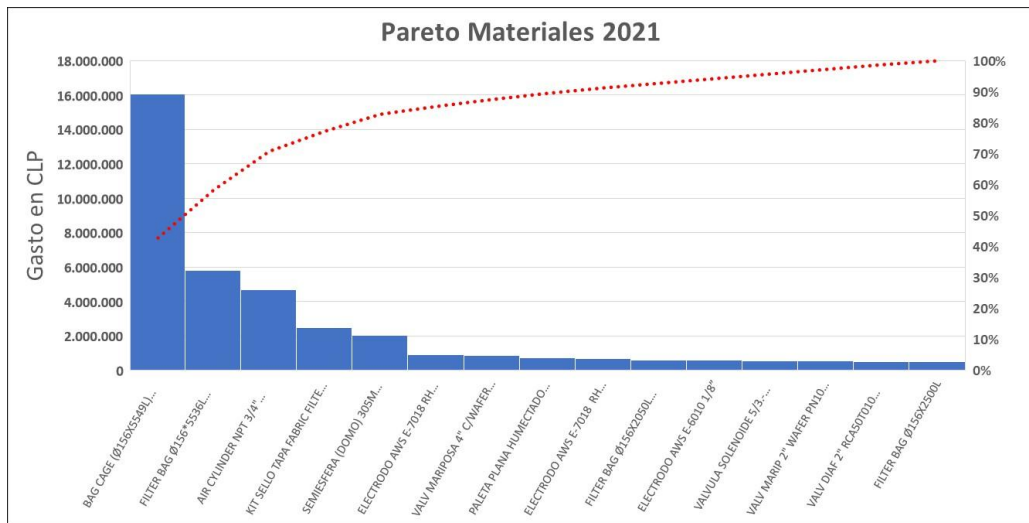


Figura 4.4: Diagrama de Pareto para Materiales 2021

- El año 2022 se realizó un gasto total de CLP 11.715.823

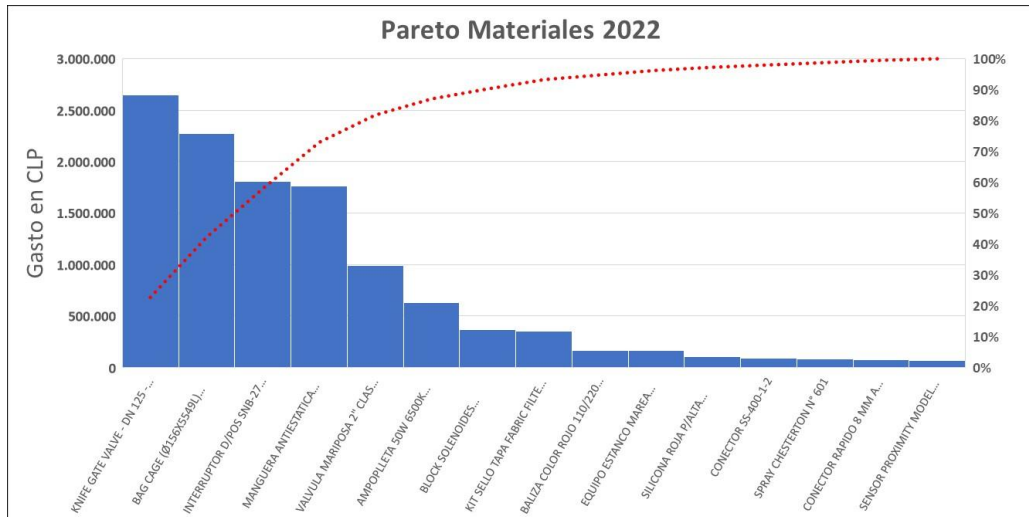


Figura 4.5: Diagrama de Pareto para Materiales 2022

- El año 2023 se realizó un gasto total de CLP 71.536.318

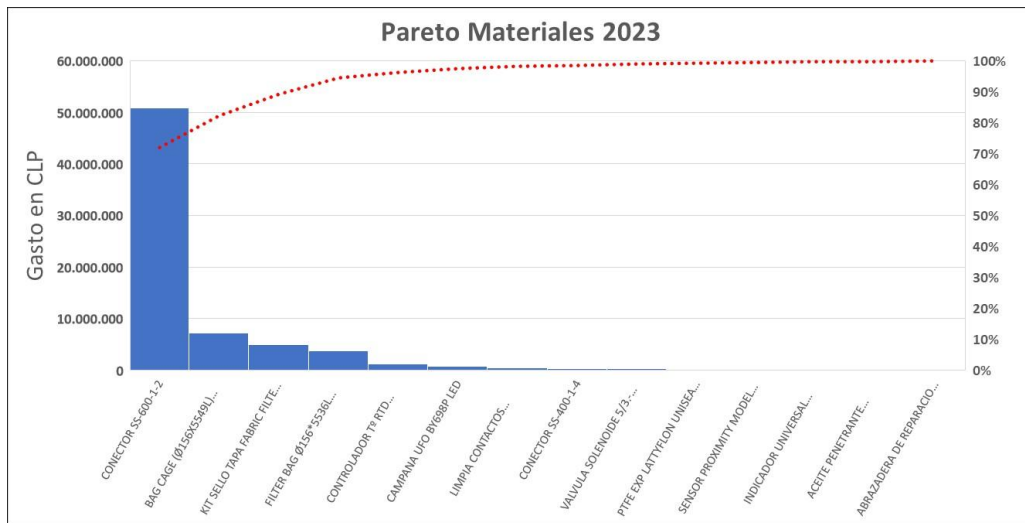


Figura 4.6: Diagrama de Pareto para Materiales 2023

A partir del análisis anterior, se identificó que los materiales que representan el mayor costo para la empresa son:

- Bolsas Filtrantes (FILTER BAG Ø156\*5536L)
- Jaula de bolsas filtrantes (BAG CAGE (Ø156X5549L))
- Conector para válvula de pulso (CONECTOR SS-600-1-2)

Para validar la criticidad de estos materiales, se analizó su comportamiento anual de consumo, como se muestra en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9:

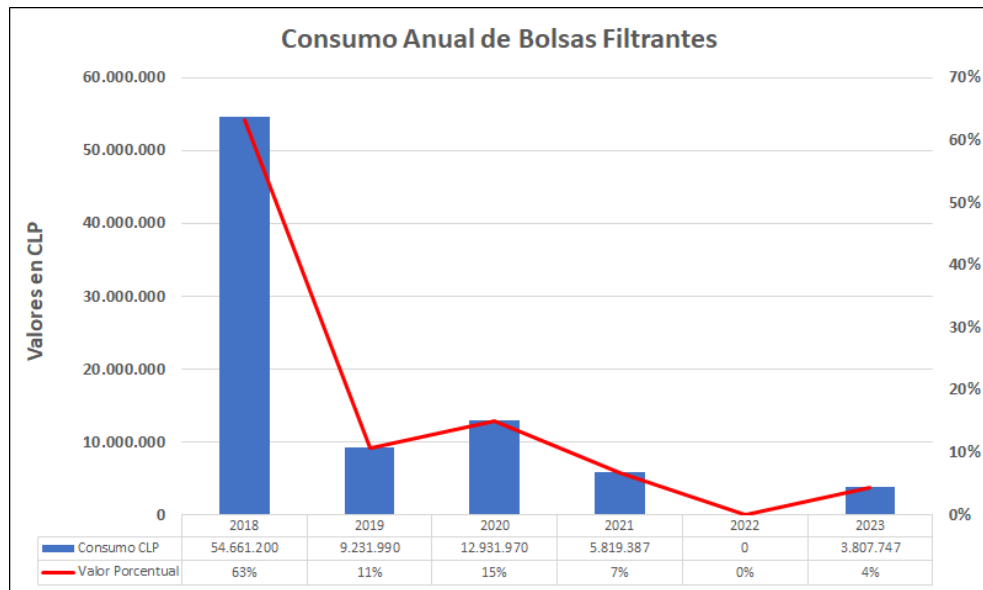


Figura 4.7: Consumo anual para Bolsas Filtrantes en CLP

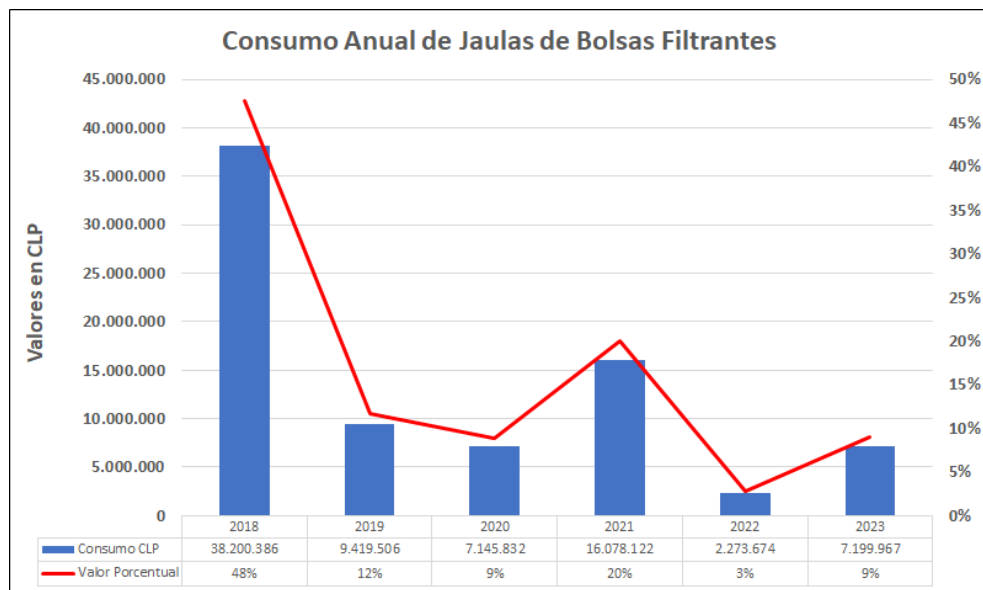


Figura 4.8: Consumo anual para Jaulas de Bolsas Filtrantes en CLP

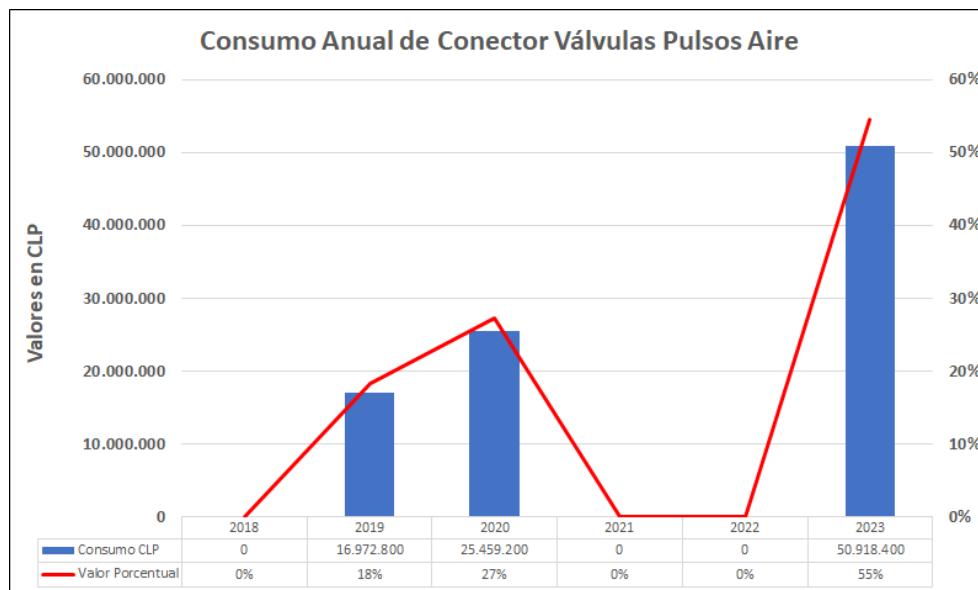


Figura 4.9: Consumo anual para Conector para válvula de pulso de aire en CLP

Con base en el análisis de consumo, se concluye que las bolsas filtrantes, jaulas y conectores para válvulas de pulsos de aire deben ser considerados como repuestos críticos para el sistema de abatimiento de las unidades Nueva Ventanas y Campiche.

Esta conclusión se refuerza con los resultados de la Matriz de Criticidad de la Tabla 3.23, en la cual los equipos asociados a estos componentes (bolsas filtrantes y válvulas de pulsos de aire) se encuentran clasificados como de alta criticidad.

Se recomienda contar con un set completo de bolsas filtrantes y sus respectivas jaulas para cubrir un compartimiento de cada sistema de filtro de tela. Esto implica disponer de 252 unidades de bolsas filtrantes y jaulas por cada unidad de la Central.

Para los conectores de válvulas de pulsos de aire, se sugiere aplicar la misma lógica, considerando 28 unidades por compartimiento.

Además del análisis basado en el historial de consumo y costos, se consideró el historial de fallas extraído desde SAP y el listado de repuestos recomendados por el proveedor, según los manuales de operación.

---

El listado consolidado de repuestos críticos para el sistema de filtros de tela (por unidad) se presenta en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Listado de repuestos críticos para Sistema Filtros de Tela

EQUIPO	MATERIAL	CANT X FILTRO DE TELA
Bolsas Filtrantes	Bolsa Filtrante Ø156 x 5.536 L [mm]	252 [u]
Jaulas de Bolsas Filtrantes	Jaula de Bolsa Filtrante Ø156 x 5.549 L [mm]	252 [u]
Válvulas de Pulso de Aire	Conector SS-600-1-2 NPT 1/8" x 3/8"	28 [u]
Válvulas de Pulso de Aire	Kit Reparación Válvula Diafragma	1 [u]
Válvulas de Pulso de Aire	Kit Reparación Válvula Selenoide	1 [u]
Tapa Superior Compartimiento	Sello para Tapa Superior	160 [m]

---

## **CAPÍTULO 5: ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO**

El Plan de Mantenimiento consiste en el conjunto de actividades que se realizarán con una frecuencia determinada, con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento del sistema Fabric Filter, en base a los análisis realizados en los capítulos anteriores.

Para efectos de implementación en la Central Ventanas, el plan de mantenimiento será compatible tanto para la Unidad Nueva Ventanas como para la Unidad Campiche, ya que los equipos que presentan fallas corresponden a los mismos, y sus condiciones operacionales son equivalentes.

Este plan se fundamenta en los resultados obtenidos mediante la aplicación de las metodologías RCM y AMFE, así como en el análisis de criticidad, historial de fallas, consumo de repuestos y consecuencias operacionales, ambientales y de seguridad. La propuesta busca optimizar los recursos disponibles, reducir la probabilidad de fallas y mejorar la disponibilidad del sistema, en línea con las políticas de mejora continua de la empresa.

### **5.1. Programación de intervención del Mantenimiento**

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación de las metodologías RCM y AMFE, se determinaron un total de 94 tareas orientadas a la prevención de los modos de falla de los equipos más críticos del sistema Fabric Filter.

Durante el proceso de consolidación de actividades, se identificaron 21 tareas duplicadas, las cuales estaban cubiertas por otras acciones preventivas que abordaban causas de falla distintas, pero pertenecientes al mismo equipo. Estas tareas fueron eliminadas para evitar duplicidad de esfuerzos y optimizar la ejecución del mantenimiento.

Como resultado, se obtuvo un total de 73 tareas únicas con propuestas específicas de intervención.

---

Para generar pautas de trabajos efectivas y enfocadas según las necesidades y frecuencias de cada conjunto de actividades, las tareas fueron agrupadas en dos categorías principales, según el tipo de responsable:

- 1) Programas realizados por operadores: Estas actividades son ejecutadas por el personal de operaciones y, en general, corresponden a tareas de alta frecuencia, que deben realizarse de forma diaria o incluso varias veces por turno. Estas tareas constituyen la columna vertebral del mantenimiento de rutina, y su correcta ejecución es esencial para garantizar la confiabilidad del sistema.
- 2) Programas realizados por personal de mantenimiento: Estas actividades son ejecutadas por el área de mantenimiento, y se subdividen en dos grupos según su frecuencia:
  - a. Alta frecuencia: tareas con intervalo menor a 1 mes
  - b. Baja frecuencia: tareas con intervalo mayor a 1 mes

En las Tablas 5.1 y 5.2 se presenta la cantidad de tareas definidas por equipo, junto con el total de horas anuales estimadas para su ejecución, diferenciadas por tipo de responsable.

Tabla 5.1: Total de tareas propuestas para ser realizadas por operadores del sistema

EQUIPO	CANT TAREAS
Bolsas Filtrantes	1
Válvulas Pulsos de Aire	9
Lampos de Entrada	1
Válvulas Poppet	1
Transmisor de PD	2
Parámetros Operación	6
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>

Tabla 5.2: Total de tareas propuestas para ser realizadas por personal de mantenimiento

EQUIPO	MEC		INST		TOTAL INST+MEC	
	CANT TAREAS	TOTAL HH ANUAL	CANT TAREAS	TOTAL HORAS	CANT TAREAS	TOTAL HORAS
Bolsas Filtrantes	11	86	0	0	11	86
Válvulas Pulsos de Aire	0	0	19	362	19	362
Lampos de Entrada	3	32	5	30	8	62
Válvulas Poppet	3	32	5	30	8	62
Transmisor de PD	1	8	6	104	7	112
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>158</b>	<b>35</b>	<b>526</b>	<b>53</b>	<b>684</b>

Las tareas asignadas al área de operaciones serán consolidadas en una única ruta de inspección, ya que deben ser ejecutadas en cada turno. Por esta razón, no serán consideradas dentro de la programación de actividades del plan de mantenimiento formal, sino que se gestionarán como parte de las rutinas operacionales estándar.

Para facilitar la programación de las actividades propuestas para el área de mantenimiento, estas se compactaron en paquetes de trabajo, organizados bajo los criterios de:

- Equipo por intervenir o inspeccionar
- Área responsable
- Frecuencia de mantenimiento

Este enfoque permite una presentación más ordenada y clara para el personal encargado de ejecutar las tareas.




Este resumen permite visualizar de forma clara la periodicidad de las intervenciones y facilita la integración del plan en el sistema de gestión SAP.

## 5.2. Actividades propuestas para los equipos críticos

Las actividades correspondientes para los equipos críticos del sistema Filtros de Tela, propuestas para los operadores, se indican en la Tabla 5.5:

Tabla 5.5: Pauta de Recorrido para Operadores del Sistema Filtros de Tela

PAUTA DE RECORRIDO							
DESCRIPCIÓN:	RUTA INSPECCIÓN DIARIA FABRIC FILTER			ÁREA RESPONSABLE:	OPERACIONES		
UNIDAD:				OT:			
Nº FABRIC FILTER (L/2):				FECHA:			
FRECUENCIA:	1 DÍA			HORA INICIO:			
EFECTUADA POR:				HORA FIN:			
							
ACTIVIDADES PREVIAS				EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN		
COORDINAR CON JEFE DE TURNO INICIO DE INSPECCIÓN				SI / NO			
COORDINAR CON JEFE DE TURNO FIN DE INSPECCIÓN				SI / NO			
Nº	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Parámetros de operación	Verificación de temperatura de operación de salida de SDA	0,5 h	Equipo operando	Mantener temperatura de entrada de gases no menor a 81°C	SI / NO	
2	Parámetros de operación	Si el sistema está operando posterior a la puesta en marcha luego de una larga detención, verificar que se haya realizado la etapa de precalentamiento del sistema	0,5 h	Equipo operando	El sistema debe precalentarse para elevar la T° interior de los compartimentos por encima del punto de rocío del gas	SI / NO	
3	Parámetros de operación	Verificación de temperatura de operación de salida de SDA	0,5 h	Equipo operando	Mantener concentraciones de óxido de azufre (SO3) menor a 1 mg/Nm3	SI / NO	
4	Parámetros de operación	Si el sistema está operando posterior a la puesta en marcha luego de una larga detención, verificar que se haya realizado la operación de recubrimiento supreficial previo (pre-coating)	0,5 h	Equipo operando	Espesor adecuado de capa de recubrimiento con Ca(OH)2 debe ser de 2 [mm] de cada bolsa, lo mismo que 200-300 [g/m2]. La calidad de cal utilizada debe ser ajustada a las características de diseño	SI / NO	
5	Parámetros de operación	Verificar que el caudal de entrada de gas sea el correcto	0,5 h	Equipo operando	El caudal de entrada de los Filtros de Tela no debe ser mayor que el de diseño de 10.881 [m3/min]	SI / NO	
6	Parámetros de operación	Activar el ventilador ID y temporizador durante 10 a 20 minutos antes de realizar la operación de Filtrado	0,5 h	Equipo operando	Mantener la velocidad de filtración del filtro a 1.116 m3/m2*min	SI / NO	
7	Bolsas Filtrantes	Verificar que el compartimento se encuentre correctamente aislado	0,5 h	Equipo operando	No deben existir fugas en la tapa superior del compartimento	SI / NO	
8	Válvulas pulsos de aire	Inspecciones visuales cuerpo válvula	0,5 h	Equipo operando	No deben existir fugas	SI / NO	
9	Válvulas pulsos de aire	Inspecciones visuales de conexión aire comprimido	0,5 h	Equipo operando	No deben existir fugas	SI / NO	
10	Válvulas pulsos de aire	Verificar estado de conexiones de aire comprimido de todo el sistema (mangueras, conectores)	0,5 h	Equipo operando	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
11	Válvulas pulsos de aire	Inspección visual de mangueras, conectores, electroválvulas	0,5 h	Equipo operando	No deben existir fugas	SI / NO	
12	Válvulas pulsos de aire	Inspeccionar que la tarjeta del temporizador está funcionando correctamente, comprobando el indicador luminoso	0,5 h	Equipo operando	Se necesitan 14 pulsos para limpiar un compartimento completo. Normalmente se configura en 0,2 segundos por válvula	SI / NO	
13	Válvulas pulsos de aire	Verificar parámetros de operación de aire comprimido inyectado	0,5 h	Equipo operando	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
14	Válvulas pulsos de aire	Revisar que drenajes no posean fugas	0,5 h	Equipo operando	Válvulas de drenajes no deben poseer fugas	SI / NO	
15	Válvulas pulsos de aire	Inspección de conexión a cabezal de aire	0,5 h	Equipo operando	No deben existir fugas	SI / NO	
16	Válvulas pulsos de aire	Verificación de humedad de la secadora de aire comprimido	0,5 h	Equipo operando	Mantener la disminución del punto de rocío del agua en el aire comprimido aproximadamente -40°C	SI / NO	
17	Lampos de entrada	Inspecciones visuales de electroválvula y sistema de accionamiento	0,5 h	Equipo operando	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
18	Válvulas poppet	Inspecciones visuales de electroválvula y sistema de accionamiento	0,5 h	Equipo operando	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
19	Transmisor de presión diferencial	Inspecciones visuales al componente	0,5 h	Equipo operando	No debe presentar daños	SI / NO	
20	Transmisor de presión diferencial	Inspección visual del circuito eléctrico del transmisor	0,5 h	Equipo operando	No debe existir fugas por sello y juntas	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							

Estas tareas están diseñadas para ser ejecutadas en cada turno, por lo que se consolidan en una única pauta de inspección. Su correcta ejecución permite detectar condiciones anómalas en los equipos, anticipar fallas y mantener la eficiencia del sistema de abatimiento.

Las actividades correspondientes para las Bolsas Filtrantes, a ser ejecutadas por el personal de mantenimiento mecánico, se indican en la Tabla 5.6:

Tabla 5.6: Pauta de Mantenimiento para Bolsas Filtrantes MEC 3M

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP MEC 3M BOLSAS FILTRANTES			ÁREA RESPONSABLE:	MECÁNICO		
UNIDAD:				OT:			
FABRIC FILTER (A/B):				KKS:			
FRECUENCIA:	3 MESES			FECHA / HORA INICIO:			
EFFECTUADA POR:				FECHA / HORA FIN:			
							
ACTIVIDADES PREVIAS				EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN		
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES				SI / NO			
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS				SI / NO			
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS				SI / NO			
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES				SI / NO			
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Compartimiento	Inspección visual de compartimento para verificar posibles puntos de fugas en sellado	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	La evidencia de polvo en la tapa superior del compartimiento indica posible fuga en el sellado y/o bolsas rotas	SI / NO	
2	Compartimiento	Levantar tapa superior de compartimento para realizar inspecciones y mantenimiento	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	La evidencia de polvo en el compartimento indica posible manga rota	SI / NO	
3	Tubo de soplado	Inspección visual de junta de expansión en tubos de soplado	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	No deben existir fugas o daños en la junta	SI / NO	
4	Bolsas filtrantes	Inspección visual de bolsas y jaulas (venturi y cuerpo)	4 h	Incomunicar Compartimiento	No debe existir presencia de polvo en la parte superior del conjunto de bolsa más jaula	SI / NO	
5	Jaulas	Verificar que no existan bordes afilados/dañados en las jaulas a instalar, ya sean nuevas o antiguas	4 h	Incomunicar Compartimiento	La superficie del alambre de la jaula debe tener la menor rebaba posible y ser lisa	SI / NO	
6	Bolsas filtrantes	Verificar que no exista exceso de humedad en bolsas y jaulas	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	La presencia de humedad indica problemas en los parámetros de operación de entrada del Filtro de Tela	SI / NO	
7	Bolsas filtrantes	Cambio de bolsas y jaulas dañadas y/o con exceso de humedad	4 h	Incomunicar Compartimiento	Bolsas y jaulas no deben presentar desgaste y daños	SI / NO	
8	Bolsas filtrantes	Mantener un registro y control de las bolsas y jaulas instaladas	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	No se deben cambiar bolsas y jaulas filtrantes que no presentan indicios de fallas	SI / NO	
9	Válvula derivación de gas	Inspección de funcionamiento de válvula de derivación de gas	1 h	Equipo operando	Debe abrirse de manera automática cuando la T° del gas de combustión de entrada llegue a 91°C	SI / NO	
10	Air Pad	Verificación de funcionamiento de almohadilla de aire (AIR PAD)	1 h	Equipo operando	Consumo de aire de 3 litros por secuencia	SI / NO	
11	Calentador	Verificación de funcionamiento del calentador eléctrico	1 h	Equipo operando	Mantener la temperatura interna de tolva en 175 °C. No debe estar expuesto a menos de 3°C	SI / NO	
12	Vibrador rotatorio	Verificación de funcionamiento del vibrador rotatorio	1 h	Equipo operando	La temperatura del motor no debe superar los 80°C	SI / NO	
13	Válvula guillotina	Verificación de funcionamiento de válvula guillotina	1 h	Equipo operando	Debe operar correctamente en el cierre y apertura manual	SI / NO	
14	Ventilado ID	Revisar ajuste de compuerta de ventilador ID (prestando atención al amperaje)	0,5 h	Equipo operando	La presión de succión del ventilador debe bordear los -200 mmH2O	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							

Estas tareas se programan con una frecuencia de 3 meses, y están orientadas a verificar el estado físico de las bolsas, su correcta instalación, la condición de las jaulas, y la presencia de desgaste o roturas que puedan comprometer la operación del sistema.

El resto de las actividades correspondientes para los equipos críticos del sistema Filtros de Tela, a ser ejecutadas por el personal de mantenimiento, se encuentran

---

detalladas en los Anexos H a N, con la distribución presentada en la Tabla 5.7:

Tabla 5.7: Distribución Anexos Pautas de Mantenimiento

ANEXO	PAUTA DE MANTENIMIENTO
H	Válvulas de Pulso de Aire INST 1S
I	Válvulas de Pulso de Aire INST 3M
J	Lampos de Entrada INST 3M
K	Lampos de Entrada MEC 3M
L	Válvulas Poppet INST 3M
M	Válvulas Poppet MEC 3M
N	Transmisor de Presión Diferencial INST 2S

Cada pauta incluye:

- Descripción técnica de la tarea
- Frecuencia de ejecución
- Área responsable
- Herramientas requeridas
- Criterios de aceptación y rechazo
- Observaciones de seguridad

Estas pautas fueron elaboradas en base a los resultados del análisis de fallas (AMFE), la evaluación de consecuencias (RCM), y la experiencia operativa del personal técnico de la Central Ventanas.

---

## CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PRUPUESTA

### 6.1. Costos actuales de mantenimiento

Para definir el presupuesto anual del plan de mantenimiento propuesto para el sistema de abatimiento Filtros de Tela, se realizó un estudio inicial del presupuesto correspondiente a un año de referencia específico. Para este análisis se trabajó con los registros de valores y horas hombre del año 2022, correspondientes a las unidades Nueva Ventanas (Unidad 3) y Campiche (Unidad 4) de la Central Ventanas.

El gasto económico atribuido al mantenimiento de los Filtros de Tela, según los registros de intervenciones realizadas durante el año 2022, se presenta en la Tabla 6.1:

Tabla 6.1: Gastos correspondientes al mantenimiento de Filtros de Tela 2022

UNIDAD	COSTO TOTAL MATERIALES [CLP]	CANT HH [h]	COSTO UNITARIO HH [CLP]	COSTO TOTAL HH [CLP]	COSTO TOTAL SISTEMA [CLP]
Nueva Ventanas	\$57.428.216	2.423,30	\$81.606	\$197.755.912	\$255.184.128
Campiche	\$29.087.560	2.568,50	\$83.316	\$213.996.081	\$243.083.641
Promedio	\$43.257.888	2.495,90	\$82.461	\$205.875.996	\$249.133.884

Este análisis permite establecer una línea base de costos reales, sobre la cual se puede comparar la propuesta de mantenimiento desarrollada en este trabajo. Los valores considerados incluyen:

- Horas hombre (HH) ejecutadas por el personal técnico
- Costos de repuestos utilizados durante las intervenciones
- Gastos asociados a tareas correctivas y preventivas

Cabe destacar que los registros utilizados fueron extraídos desde el sistema SAP, herramienta de gestión integrada utilizada por AES Andes para la planificación, ejecución y control de actividades de mantenimiento.

---

## 6.2. Propuesta de presupuesto anual

Tomando como base los valores presentados en la Tabla 6.1 (costos actuales de mantenimiento), y considerando la variación de la moneda en el tiempo, se determinó una estimación del Costo Unitario en CLP para las Horas Hombre (HH) del sistema Filtros de Tela, equivalente a \$90.000 CLP por hora.

Debido a la falta de información específica respecto a los gastos asociados a las actividades realizadas por los operadores del sistema, y considerando que dichas tareas están destinadas a ser ejecutadas en cada turno como parte de la operación estándar, no se contabilizaron las horas hombre de operadores en los cálculos de presupuesto de este trabajo de titulación.

Para el cálculo monetario de las actividades de mantenimiento, se estableció considerar un porcentaje adicional del 20 % sobre el total de horas efectivas de trabajo propuestas en la Tabla 5.2, correspondiente a:

- Actividades administrativas
- Bloqueos de equipos
- Búsqueda de herramientas
- Desplazamientos
- Tiempos no productivos asociados a la ejecución

Este ajuste permite obtener una estimación más realista del esfuerzo requerido para implementar el plan de mantenimiento propuesto.

Tabla 6.2: Costo Anual de HH del Plan de Mantenimiento propuesto

EQUIPO	HH MEC [h]	HH INST [h]	TOTAL (100%) [h]	TOTAL (120%) [h]	COSTO UNITARIO HH [CLP]	COSTO TOTAL HH [CLP]
Bolsas Filtrantes	86	0	86	103	\$90.000	\$9.288.000
Válvulas Pulsos de Aire	0	362	362	434	\$90.000	\$39.096.000
Lampos de Entrada	32	30	62	74	\$90.000	\$6.696.000
Válvulas Poppet	32	30	62	74	\$90.000	\$6.696.000
Transmisor de PD	8	104	112	134	\$90.000	\$12.096.000
<b>TOTAL</b>	<b>158</b>	<b>526</b>	<b>684</b>	<b>821</b>	<b>\$450.000</b>	<b>\$73.872.000</b>

El presupuesto destinado para la compra de los repuestos críticos recomendados (según la Tabla 4.1) se calculó utilizando los valores unitarios de las últimas compras realizadas, según registros disponibles en el sistema SAP.

Tabla 6.3: Costos de Repuestos Críticos del Plan de Mantenimiento propuesto

EQUIPO	MATERIAL	CANT X FILTRO DE TELA	VALOR UNITARIO [CLP]	VALOR TOTAL [CLP]
Bolsas Filtrantes	Bolsa Filtrante Ø156 x 5.536 L [mm]	252 [u]	\$18.000	\$4.536.000
Jaulas de Bolsas Filtrantes	Jaula de Bolsa Filtrante Ø156 x 5.549 L [mm]	252 [u]	\$28.000	\$7.056.000
Válvulas de Pulso de Aire	Conector SS-600-1-2 NPT 1/8" x 3/8"	28 [u]	\$850.000	\$23.800.000
Válvulas de Pulso de Aire	Kit Reparación Válvula Diafragma	1 [u]	\$200.000	\$200.000
Válvulas de Pulso de Aire	Kit Reparación Válvula Selenoide	1 [u]	\$200.000	\$200.000
Tapa Superior Compartimiento	Sello para Tapa Superior	160 [m]	\$350.000	\$2.800.000
	<b>TOTAL</b>			<b>\$38.592.000</b>

Finalmente, consolidando los valores obtenidos en las Tablas 6.2 y 6.3, se presenta la siguiente propuesta de presupuesto anual para el Plan de Mantenimiento del sistema de abatimiento Filtros de Tela, por cada unidad de la Central Ventanas:

Tabla 6.4: Presupuesto anual para el Plan de Mantenimiento propuesto para el Sistema de Filtros de Tela de cada Unidad

PLAN DE MANT FABRIC FILTER CENTRAL VENTANAS	VALOR [CLP]
COSTOS HH ANUAL	\$73.872.000
COSTOS REPUESTOS CRÍTICOS	\$38.592.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$112.464.000</b>

El presupuesto total estimado asciende a CLP \$112.464.000 por Unidad, considerando tanto los costos de mano de obra como los repuestos críticos necesarios

---

para asegurar la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Las políticas de mejora continua de la empresa, junto con la planificación estratégica de sus activos, orientan sus objetivos hacia la protección no solo del ámbito operacional, sino también desde una perspectiva integral que abarca todas las relaciones, impactos y consecuencias a las que se ve expuesta la Central. En este contexto, la entrega de soluciones medioambientales eficientes, de calidad y con alta disponibilidad operativa se convierte en uno de los objetivos principales de la organización.

Además, el contexto mundial respecto a la generación de electricidad mediante combustibles fósiles ha derivado en normativas y regulaciones cada vez más estrictas, lo que otorga mayor valor a la eficiencia, confiabilidad y disponibilidad de los sistemas de mitigación ambiental implementados.

Los análisis realizados al sistema de abatimiento Filtros de Tela de la Central permitieron identificar que los equipos más críticos, y con mayor probabilidad de falla, corresponden a los subsistemas encargados de la operación de limpieza, tales como:

- Bolsas filtrantes
- Válvulas de pulsos de aire
- Lampos de entrada
- Válvulas poppet
- Transmisores de presión diferencial

Si bien se identificó una gran cantidad de causas de modos de falla, se determinó que existe una interdependencia operativa entre los subsistemas del sistema de filtrado. La falla de un equipo tiene consecuencias directas en el aumento de la tasa de falla de

---

otro componente, ya sea aguas arriba o aguas abajo. Esto implica que, aunque se estén cubriendo ciertos equipos críticos mediante planes de mantenimiento preventivo, la falta de intervención en los sistemas colindantes genera pérdida de eficiencia y disponibilidad.

El análisis de la situación actual del mantenimiento permitió concluir que los planes ejecutados no están completamente alineados con los requerimientos operacionales ni con el historial de fallas. Por ejemplo:

- Las válvulas de pulsos de aire, aunque incluidas en rutas de mantenimiento, presentan una frecuencia de intervención insuficiente considerando su alta tasa de falla y criticidad.
- Las bolsas filtrantes y sus respectivas jaulas, componentes de mayor impacto ambiental, son atendidas principalmente bajo estrategias correctivas, es decir, solo se intervienen cuando se detecta una rotura o durante mantenimientos prolongados.
- Los transmisores de presión diferencial, si bien cuentan con mantenimiento frecuente (cada 2 semanas), requieren inspecciones adicionales por parte de los operadores, ya que una simple fuga o taponamiento puede provocar lecturas erráticas que, si no se detectan a tiempo, pueden derivar en rotura de bolsas y exposición de material particulado al medio ambiente.

La evaluación de los principales equipos del sistema permitió establecer su jerarquización bajo criterios de impacto ambiental, seguridad, calidad, operación y probabilidad de ocurrencia de fallas, lo que dio como resultado la Matriz de Criticidad (Tabla 3.23). A partir de ella, se identificaron cinco equipos de Alta Criticidad, para los cuales se aplicaron las metodologías RCM y AMFE, logrando determinar los modos de falla más relevantes y sus respectivas acciones preventivas y correctivas.

Entre los hallazgos más relevantes se destacan:

- 
- Las bolsas filtrantes fallan principalmente por instalación incorrecta o falta de conocimiento técnico sobre el procedimiento de montaje. La capacitación del personal y el control de calidad en la instalación son fundamentales para mejorar la confiabilidad del sistema.
  - Las válvulas de pulsos de aire presentan fallas recurrentes en el sistema de conexión neumática hacia la válvula solenoide. Se identificó que el uso de mangueras de baja calidad contribuye a estas fallas, por lo que se recomienda evaluar el cambio por componentes de mayor resistencia.
  - Los lampos de entrada poseen modos de falla críticos relacionados con los sensores de posicionamiento. La falla de estos dispositivos impide la correcta aislación de los compartimientos, lo que afecta directamente la posibilidad de realizar mantenimiento seguro.
  - Las válvulas poppet, encargadas de regular la salida de gas limpio, presentan modos de falla con alto impacto ambiental. Una fuga en el cierre puede provocar la emisión de material particulado no tratado a la atmósfera.
  - Los transmisores de presión diferencial, aunque incluidos en rutas de mantenimiento, requieren inspecciones complementarias por parte de los operadores para asegurar su correcto funcionamiento.

Posterior al análisis de fallas, se continuó con la metodología RCM para determinar y comparar el nivel de consecuencias de cada modo de falla, lo que permitió tomar decisiones respecto a las tareas a realizar. Como resultado, se definieron 8 rutas de mantenimiento para los equipos más críticos del sistema:

- i. Válvulas de pulsos de aire – Instrumentación – Frecuencia: 1 semana
- ii. Transmisor de presión diferencial – Instrumentación – Frecuencia: 2 semanas
- iii. Bolsas filtrantes – Mecánica – Frecuencia: 3 meses

- 
- iv. Válvulas de pulsos de aire – Instrumentación – Frecuencia: 3 meses
  - v. Lamos de entrada – Instrumentación – Frecuencia: 3 meses
  - vi. Lamos de entrada – Mecánica – Frecuencia: 3 meses
  - vii. Válvulas poppet – Instrumentación – Frecuencia: 3 meses
  - viii. Válvulas poppet – Mecánica – Frecuencia: 3 meses

Para cada ruta se elaboraron las correspondientes Pautas de Mantenimiento y Rutas de Inspección para operadores (ver Anexos H a N).

Como resultado de los análisis y metodologías aplicadas, se generó el Plan Maestro de Mantenimiento para el sistema de abatimiento Filtros de Tela, con un total de 821 horas hombre anuales, lo que representa un presupuesto estimado de:

- CLP \$74.000.000 por concepto de mano de obra (Tabla 6.2)
- CLP \$40.000.000 por concepto de repuestos críticos recomendados (Tabla 6.3)
- CLP \$112.464.000 como presupuesto total por unidad (Tabla 6.4)

Aunque no se realizó un análisis directo del impacto en la disponibilidad de generación eléctrica, se concluye que la correcta operación del sistema de abatimiento es vital para el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. El incumplimiento de estas normativas podría generar consecuencias significativas para la reputación corporativa, además de sanciones económicas y restricciones operativas.

El desarrollo del presente trabajo de titulación permitió cumplir el objetivo principal: elaborar una propuesta de plan de mantenimiento para el sistema de Filtros de Tela, con el fin de mejorar su disponibilidad y optimizar el uso de recursos. Esto se logró mediante el cumplimiento de los objetivos específicos, que incluyeron:

- Levantamiento técnico del sistema

- 
- Jerarquización de componentes mediante matriz de criticidad
  - Aplicación de análisis de fallas (AMFE)
  - Implementación de metodología RCM
  - Definición de pautas y rutas de mantenimiento
  - Estimación de presupuesto anual

---

## Recomendaciones

- Fortalecer la capacitación técnica del personal

Durante el análisis de los avisos asociados a cada equipo del sistema Filtros de Tela, se identificó que tanto operadores como mantenedores, en algunos casos, no conocen la nomenclatura técnica correcta de los componentes. Esto dificulta el control de información y la ejecución adecuada de las tareas de mantenimiento. Se recomienda implementar capacitaciones específicas sobre identificación de equipos, especialmente en el caso de las válvulas de pulso de aire (diafragma), que en muchos registros SAP fueron confundidas con válvulas poppet, pese a pertenecer a sistemas distintos.

- Mejorar el monitoreo de válvulas de pulso de aire

Uno de los modos de falla más recurrentes está asociado al sistema de conexión de aire comprimido entre las válvulas diafragma y las electroválvulas. La dificultad para detectar fugas o fallas en esta conexión afecta el tiempo de reacción ante averías. Se recomienda evaluar la viabilidad técnica y económica de instalar transductores de presión en los cabezales de aire comprimido, de modo que se pueda detectar variaciones de presión fuera de los rangos establecidos. Esto permitiría al sistema de control identificar que válvula de diafragma está en condición de falla, mejorando la eficiencia operativa.

- Evaluar el reemplazo de válvulas diafragma por modelos de doble diafragma

Se sugiere revisar la posibilidad de reemplazar las válvulas actuales por versiones de doble diafragma de mayor tamaño, que permitan una operación de limpieza más rápida, controlada y confiable. Esta mejora podría reducir la frecuencia de fallas y optimizar el consumo de aire comprimido.

- Elaborar un manual técnico de instalación de bolsas filtrantes y jaulas

Se recomienda desarrollar un documento técnico que detalle el procedimiento de

---

instalación de bolsas filtrantes y sus respectivas jaulas, basado en las especificaciones del fabricante y en buenas prácticas de mantenimiento. Este manual no fue incluido en el presente trabajo por razones de extensión, pero se considera fundamental para asegurar una correcta ejecución de las tareas y evitar fallas por instalación deficiente.

- Revisar y ajustar las frecuencias de mantenimiento preventivo

A partir del análisis de fallas y criticidad, se concluye que las frecuencias actuales de mantenimiento preventivo no son suficientes para algunos equipos, especialmente las válvulas de pulso de aire y los transmisores de presión diferencial. Se recomienda revisar estas frecuencias y ajustarlas en función de los datos históricos de fallas, la criticidad del equipo y las condiciones operacionales.

- Incorporar inspecciones visuales periódicas por parte de operadores:

Para equipos como los transmisores de presión diferencial, cuya falla puede tener consecuencias graves en la operación del sistema, se recomienda que los operadores realicen inspecciones visuales periódicas, complementando las tareas programadas por el área de mantenimiento. Esto permitiría detectar condiciones anómalas de forma temprana y evitar fallas mayores.

---

## REFERENCIAS

- [1] MUKHOPADHYAY, Arunangshu. Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution. Part I: Theory, selection and design of pulse-jet filter. *Textile Progress*, 41(4):195–315, 2009.
- [2] MUKHOPADHYAY, Arunangshu. Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution. Part II: Process characterization and evaluation of filter media. *Textile Progress*, 42(1):1–97, 2010.
- [3] CAMPOS-LÓPEZ, Omar; TOLENTINO-ESLAVA, Guilibaldo; TOLEDO-VELÁZQUEZ, Miguel; TOLENTINO-ESLAVA, René. Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Científica [en línea]*. 2019, 23(1):51–59. ISSN: 1665-0654. [Consulta: 16 diciembre 2023].
- [4] SAE JA1011. Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes. Society for Automotive Engineers, 2009.
- [5] SAE JA1012. A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard. The Engineering Society for Advancing Mobility Land, Sea, Air, and Space. Warrendale, PA, 2002.
- [6] INSTITUTO Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Análisis modal de fallos y efectos AMFE. NPT 679. Madrid, 2004.
- [7] NORMA Española UNE-EN 13306. Mantenimiento. Terminología. Comité Técnico CEN/TC 319, Mantenimiento, 2018.
- [8] MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Gran Bretaña: Aladon Ltda, 2004.
- [9] ANDERSEN, B.O.; NIELSEN, N.F.; WALTHER, J.H. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters. *Powder Technology*, 291:284–298, 2016.

---

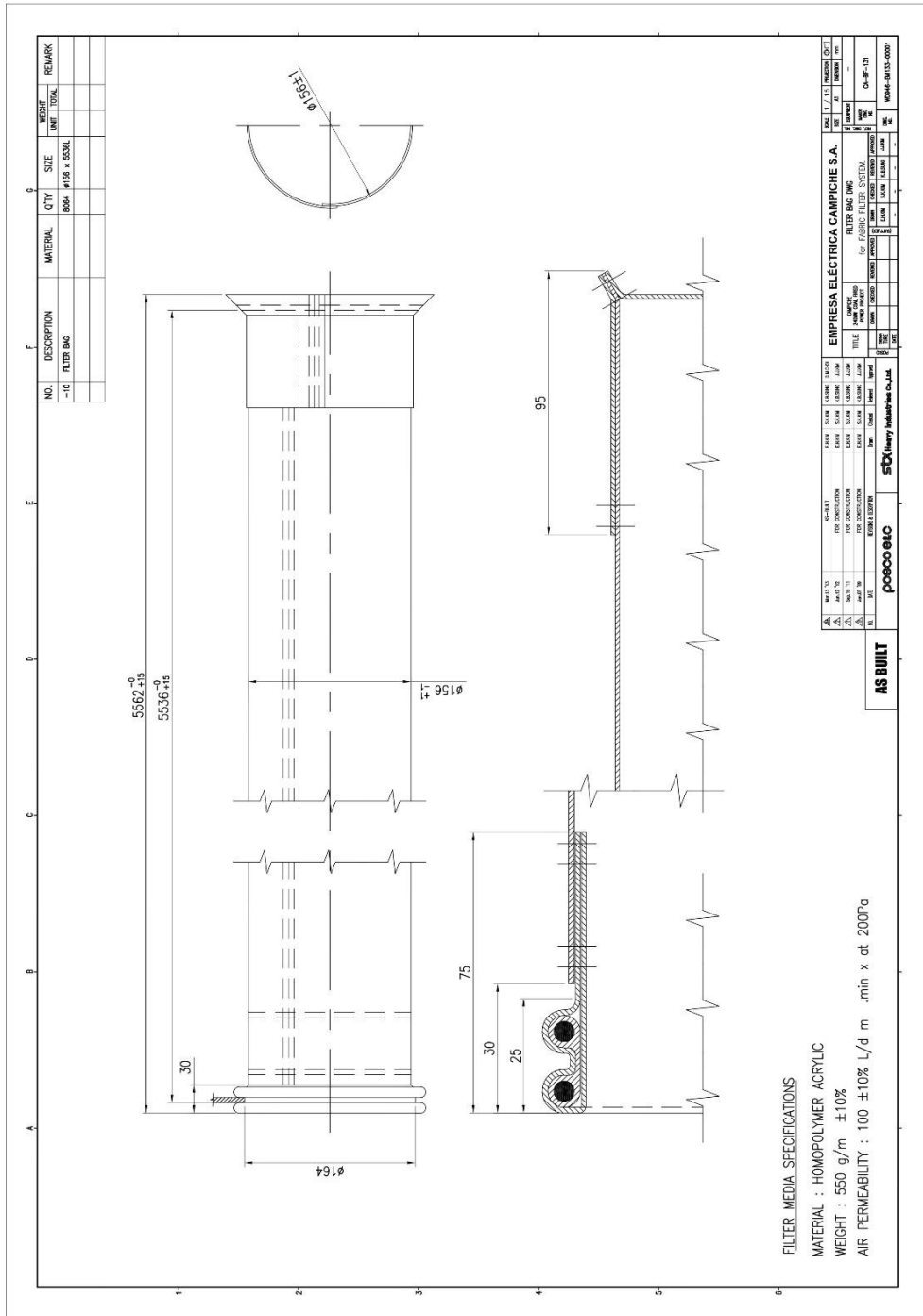
ISSN: 0032-5910.

- [10] MINISTERIO del Medio Ambiente. Decreto Supremo N°13. Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas. Santiago, Chile, 2015.
- [11] MORRIS, W.J. Cleaning mechanisms in pulse jet fabric filters. *Filtration & Separation*, 21(1):50–54, 1984.
- [12] AES Corporation. Acerca de AES [en línea]. Disponible en: <<https://www.aes.com/es/conoce-aes>>. [Consulta: 16 diciembre 2023].

# ANEXOS

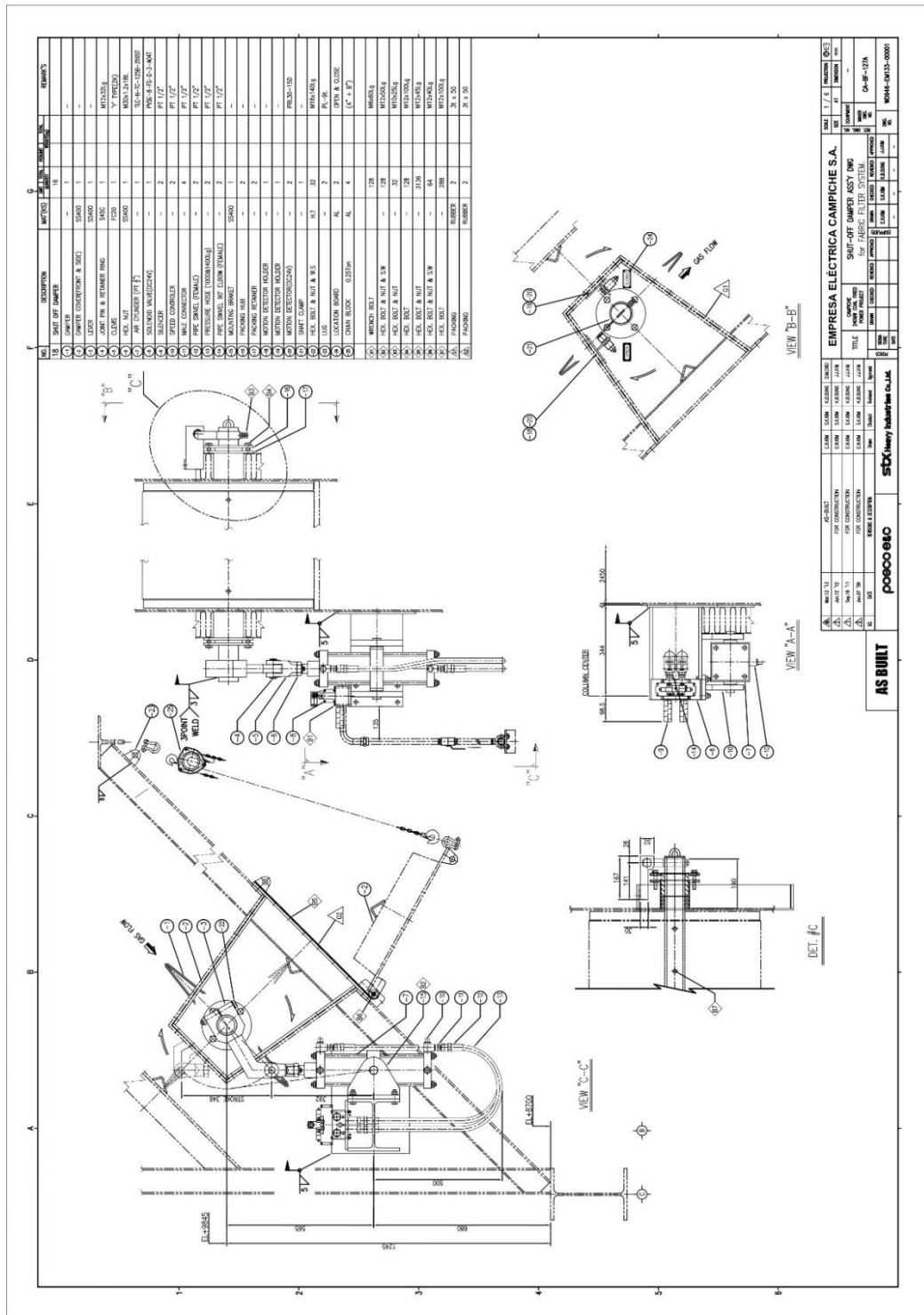
## Anexo A: Planos

### Bolsa filtrante

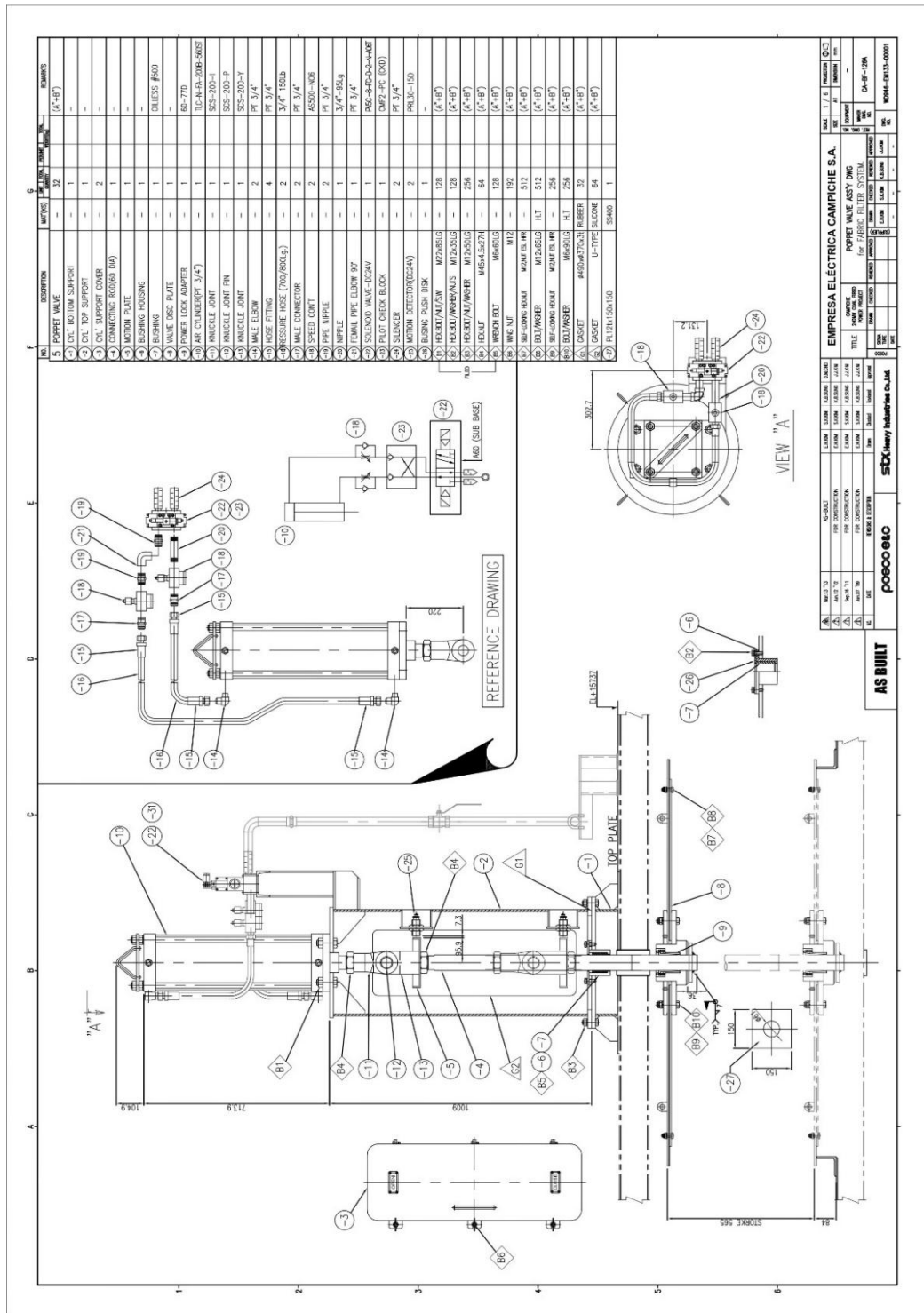




# Lampo de entrada



# Válvula poppet





## Anexo C: AMFE Bolsas Filtrante

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)											
DENOMINACIÓN EQUIPO/COMPONENTE:		BOLSAS FILTRANTES		ELABORADO POR:		EDUARDO SAAVEDRA ROJAS		FECHA INICIO:			
UBICACIÓN TÉCNICA:		FALLOS POTENCIAL		REVISADO POR:		ESTADO ACTUAL		FECHA REVISIÓN:			
OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTO DE LA FALLA	CAUSA DE FALLA	MEDIDAS DE ENSAYO Y CONTROL	ESTADO ACTUAL			ACCIÓN DE PREVENCIÓN DE FALLA	RESPONSABLE	
						F	G	D			IPR
1. Recibir una carga de gas de combustión para filtrar las partículas sólidas	1.1 Deficiente o nula filtración de las partículas sólidas de los gases de combustión	1.1.1 Bolsa rota	El gas de combustión que ingresa no es filtrado, provocando proyección de material particulado a la atmosfera. Disminuye la eficiencia del Filtro de Tela, ya que se debe incomunicar el/los compartimento/s en caso de filtración.	Temperatura de entrada de los gases de combustión mayor a la permitida de diseño de las bolsas	Sensor de T° en la entrada de los gases de combustión Válvula derivación de gas de combustión	4	9	2	72	1. Verificación de temperatura de operación de Caldera y/o SDA 2.1 Inspección de funcionamiento de válvula de derivación de gas	OPER MEC
				Incorrecta instalación de la jaula de la bolsa filtrante	No existen	7	9	7	441	1. Capacitar a personal encargado de la instalación 2. Mantener un registro y control de las bolsas y jaulas instaladas 3. Inspección visual de bolsas y jaulas (venturi y cuerpo)	MEC
				Jaula con bordes afilados en soldaduras de alambres	No existen	5	9	6	270	1. Verificar que no existan bordes afilados/dañados en las jaulas a instalar, ya sea nuevas o antiguas	MEC
		1.1.2 Obstrucción de la tela	Disminuye la eficiencia de filtrado del compartimiento y la vida útil de las bolsas	Falta de operación de limpieza	Temporizador de válvulas de pulsos	6	8	5	240	1. Limpieza e inspecciones rutinarias a las válvulas de pulsos de aire 2. Verificación de la correcta instalación del tubing de válvula selenoide a válvula diafragma de pulsos de aire 3. Verificación de que cabezal de aire comprimido no tenga fugas 4. Verificar la frecuencia del temporizador (frecuencia del ciclo de soplado) 5. Verificar funcionamiento de fusible de tablero de temporizador	INST
				Acumulación excesiva de polvo filtrado en tolva	Calentador eléctrico Air PAD Vibrador rotatorio	2	6	2	24	1. Verificación de funcionamiento del calentador eléctrico 2. Verificación de funcionamiento de almohadilla de aire (AIR PAD) 3. Verificación de funcionamiento de válvula guillotina 4. 2. Verificación de funcionamiento de vibrador rotatorio	INST MEC
				Alto porcentaje de humedad en gases de combustión	Control operacional	3	7	5		1. Aumento en el control de los parámetros de operación de la caldera y/o SDA 2. Activar el ventilador ID y temporizador durante 10 a 20 minutos antes de realizar la operación de Filtrado 3. Verificación de humedad la secadora de aire comprimido 4. Si el sistema está operando posterior a la puesta en marcha luego de una larga detención, verificar que se haya realizado la etapa de precalentamiento del sistema	OPER
		1.1.3 Corrosión en la tela	Causará fallas prematuras en la bolsa y jaula	Aumento de niveles de gases ácidos	Control operacional	3	7	5		Verificación de concentración de gases ácidos de Caldera y/o SDA 2. Si el sistema está operando posterior a la puesta en marcha luego de una larga detención, verificar que se haya realizado la operación de recubrimiento supreficial previo (pre-coating) 3. Verificar que el compartimiento se encuentre correctamente aislado	OPER
		1.1.4 Mala vida útil de la bolsa	Aumenta la frecuencia del cambio de bolsas	Altos volúmenes de aire de entrada de gas de combustión	Lamos de entrada	5	7	4	140	1. Verificar que el caudal de entrada de gas sea el correcto 2. Verificación del control de apertura y cierre de dispositivos de entrada de gases (lamos de entrada) 3. Revisar ajuste de compuerta de ventilador ID (prestando atención al amperaje)	OPER MEC INST
				Limpieza excesiva	Temporizador de válvulas de pulsos	3	7	3	63	1. Inspeccionar que la tarjeta del temporizador está funcionando correctamente, comprobando el indicador luminoso 2. Verificar la frecuencia del temporizador (frecuencia del ciclo de soplado) 3. Verificar duración del temporizador (tiempo en que permanece abierta la válvula de diafragma) 4. Verificar la presión de de aire de pulsado (limpieza)	OPER INST

## Anexo D: AMFE Lamos de Entrada

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)											
DENOMINACIÓN EQUIPO/COMPONENTE:		LAMPOS DE ENTRADA			ELABORADO POR:		EDUARDO SAAVEDRA ROJAS			FECHA INICIO:	
UBICACIÓN TÉCNICA:		FALLOS POTENCIAL			REVISADO POR:		ESTADO ACTUAL			FECHA REVISIÓN:	
OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTO DE LA FALLA	CAUSA DE FALLA	MEDIDAS DE ENSAYO Y CONTROL	F	G	D	IPR	ACCIÓN DE PREVENCIÓN DE FALLA	RESPONSABLE
1. Regulación de gas de combustión que ingresa desde el conducto de entrada a cada compartimento	1.1 Operación de apertura y cierre deficiente	1.1.1 Sensores de posicionamiento dañados	No permite tener el control de apertura o cierre, impidiendo las actividades de limpieza y mantenimiento del compartimento, como la incomunicación en caso de falla. Esto genera el riesgo de proyección de material particulado a la atmosfera	Sensores sueltos o mal ajustados	Control operacional	7	6	3	136	1. Asegurar una correcta instalación e implementación del sensor 2. Inspeccionar soporte de sensor para asegurar que no este dañado 3. Verificar que la fuerza de apertura y cierre se encuentre dentro de los parámetros	INST
		1.1.2 Desajuste en damper (compuerta)	Disminución en el porcentaje de apertura o cierre. Riesgo de proyección de material particulado a la atmosfera	Falta de apriete mecánico en brazo palanca de damper	No existen	2	6	3	16	1. Realizar revisión de ajuste de apriete de manera periodica 2. Lubricar componentes	MEC
		1.1.3 Falla en electroválvula	No permite accionar la compuerta para la apertura y cierre, impidiendo el flujo de gas junto con las actividades de limpieza y mantenimiento del compartimento. Esto genera el riesgo de proyección de material particulado a la atmosfera	Filtración de aire	Control operacional	2	5	3	30	1. Inspecciones visuales de electroválvula y sistema de accionamiento 2. Realizar cambio periodico de los componentes de conexión (manguera, conectores)	OPER INST
				Fuga en cilindro de aire	No existen	1	5	3	15	1. Inspecciones visuales de cilindro de aire	INST
		1.1.4 Corrosión en componentes	Disminuye la vida útil de los componentes	Aumento de niveles de gases ácidos	No existen	2	7	5	70	1. Verificación de concentración de gases ácidos de Caldera y/o SDA	OPER

## Anexo E: AMFE Válvulas Poppet

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)											
DENOMINACIÓN EQUIPO/COMPONENTE:		VÁLVULAS POPPET		ELABORADO POR:		EDUARDO SAAVEDRA ROJAS				FECHA INICIO:	
UBICACIÓN TÉCNICA:		FALLOS POTENCIAL		REVISADO POR:		ESTADO ACTUAL				FECHA REVISIÓN:	
OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTO DE LA FALLA	CAUSA DE FALLA	MEDIDAS DE ENSAYO Y CONTROL	ESTADO ACTUAL				ACCIÓN DE PREVENCIÓN DE FALLA	RESPONSABLE
						F	G	D	IPR		
1. Regulación de gas limpio que sale desde los compartimentos al conducto de salida	1.1 Operación de apertura y cierre deficiente	1.1.1 Sensores de posicionamiento dañados	No permite tener el control de apertura o cierre, impidiendo las actividades de limpieza y mantenimiento del compartimiento, como la incomunicación en caso de falla. Esto genera el riesgo de proyección de material particulado a la atmosfera	Sensores sueltos o mal ajustados	Control operacional	5	7	3		1. Asegurar una correcta instalación e implementación 2. Inspeccionar soporte de sensor para asegurar que no este dañado 3. Verificar que la fuerza de apertura y cierre se encuentre dentro de los parámetros	INST
		1.1.2 Desajuste en plato de cierre	Disminuye el porcentaje de apertura y/o cierre del disco del plato, por lo que no se logra un cierre hermético para el compartimiento	Brazo desajustado a plato de cierre Falta de lubricación de vástago	No existen No existen	2	5	3	30	1. Realizar revisión de ajuste de apriete de manera periódica 2. Lubricar componentes	MEC MEC
		1.1.3 Falla en electroválvula	Impide la entrada o bloqueo del gas de combustión. En caso de quedar cerrada disminuirá la eficiencia del Filtro de Tela. En caso de quedar abierta, no se tendrá el control del flujo del gas sucio, ya sea para normalizar los parámetros de operación o realizar actividades de mantenimiento en el compartimiento. Esto podría provocar la proyección de material particulado a la atmosfera	Filtración de aire en componentes de conexión	Control operacional	7	8	3	168	1. Inspecciones visuales de electroválvula y sistema de accionamiento 2. Realizar cambio periodico de los componentes de conexión (mangueras, conectores)	OPER INST
				Fuga en cilindro de aire	No existen	1	8	3	24	1. Inspecciones visuales de cilindro de aire	INST
		1.1.4 Corrosión en componentes	Disminuye la vida útil de los componentes, aumentando la probabilidad de falla y por ende indisponibilidad del equipo	Aumento de niveles de gases ácidos	No existen	2	7	5	70	Verificación de concentración de gases ácidos de Caldera y/o SDA	OPER


## Anexo F: AMFE Válvulas Pulsos de Aire

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)												
DENOMINACIÓN EQUIPO/COMPONENTE:		VÁLVULAS PULSOS DE AIRE			ELABORADO POR: EDUARDO SAAVEDRA ROJAS		FECHA INICIO:					
UBICACIÓN TÉCNICA:		FALLOS POTENCIAL			REVISADO POR:		FECHA REVISIÓN:					
OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTO DE LA FALLA	CAUSA DE FALLA	ESTADO ACTUAL MEDIDAS DE ENSAYO Y CONTROL	FECHA REVISIÓN:			ACCIÓN DE PREVENCIÓN DE FALLA	RESPONSABLE		
						F	G	D			IPR	
Operación de limpieza encargada de la eliminación de la torta de polvo de las bolsas filtrantes	1.1 En operación de apertura válvula se queda pegada	1.1.1 Filtración de aire por membrana	Produce fugas del aire comprimido y un mal control del caudal de limpieza. Esto conlleva a la rotura del diafragma y/o resorte, encargado del cierre automático de la válvula	Rotura del diafragma y/o daños en el resorte de la válvula	Inspección visual	7	7	4	196	1. Inspecciones visuales cuerpo válvula 2. Verificar la presión del aire comprimido de limpieza 3. Verificar que el aire comprimido de trabajo se encuentre limpio	OPER MEC INST	
		1.1.2 Obstrucción línea de soplado	Impide el paso de aire comprimido que ayuda al cierre de la válvula de diafragma	Desgaste en sellos y juntas	No existe	5	6	4	120	1. Inspecciones visuales sellos y juntas 2. Realizar cambio periódico de los componentes de conexión	OPER MEC	
		1.1.2 Obstrucción línea de soplado	Impide el paso de aire comprimido que ayuda al cierre de la válvula de diafragma	Aire comprimido de trabajo mal filtrado	Inspección visual	1	3	5	15	1. Verificar que el aire comprimido de trabajo se encuentre limpio	INST	
	1.2 En operación de cierre válvula se queda pegada	1.2.1 Falla en electroválvula	No permite la apertura de la válvula diafragma, imposibilitando la operación de limpieza de la línea de bolsas filtrantes	-	Filtración de aire en componentes de conexión (mangueras y conectores)	Inspección visual	8	6	4	192	1. Inspecciones visuales de conexión aire comprimido 2. Realizar cambio periódico de los componentes de conexión	OPER INST
					Desgaste en sellos y juntas	No existe	6	7	4	168	1. Inspecciones visuales sellos y juntas 2. Realizar cambio periódico de los componentes de conexión	OPER INST
					Tapa de electroválvula no logra cerrar herméticamente	Inspección visual	2	4	2	36	1. Inspecciones visuales tapa electroválvula 2. Verificar que pernos no se encuentren con desgaste	INST
					Bobina quemada	No existe	4	7	4	11	1. Pruebas de funcionamiento	INST
	1.3 Falta de presión de aire comprimido de limpieza	1.3.1 Baja presión del cabezal de aire comprimido	Aumento de presión diferencial a través de la placa del tubo	Fuga en cabezal de aire	Inspección visual	4	7	4	117	1. Revisar que drenajes no posean fugas 2. Inspección visual cuerpo cabezal de aire comprimido	OPER INST	
				Tubos de conexiones de aire comprimido desconectados/dañados	Inspección visual	7	7	4	196	1. Verificar estado de conexiones de aire comprimido de todo el sistema (mangueras, conectores)	OPER	
		1.3.2 Fugas en tubo de soplado	Falta de aire de limpieza, disminuyendo la eficiencia de la operación	Junta de expansión suelta o dañada	No existe	2	6	6	72	1. Inspección visual de junta de expansión	MEC	
		1.3.3 Filtración en sistema de accionamiento	Operación deficiente de la apertura y cierre de la válvula de diafragma	Mangueras y conectores de aire comprimido sueltos o dañados	Inspección visual	7	6	5	210	1. Inspección visual de mangueras, conectores, electroválvulas 2. Realizar cambio periódico de los componentes de conexión	OPER INST	
	1.3.4 Presión de aire de limpieza menor a la de operación normal	Falta de aire de limpieza, disminuyendo la eficiencia de la operación	Parámetros de operación deficientes	No existe	5	5	4	180	1. Inspección de conexión a cabezal de aire 2. Verificar parámetros de operación de aire comprimido inyectado 3. Verificar si existe taponamiento en las líneas de aire comprimido	OPER INST		
	1.4 Operación errática de limpieza	1.4.1 Fallas en temporizador	Aumenta la contaminación en las bolsas, y por consecuencia la presión diferencial en el sistema	Frecuencia de pulso desajustada (frecuencia de activación de las válvulas)	Transmisor de presión diferencial	5	7	4	140	1. Verificar la frecuencia del temporizador	INST	
				Duración de pulso desajustada (duración de válvula abierta durante limpieza)	Transmisor de presión diferencial	4	7	4	111	1. Verificar la duración del temporizador	INST	
Tarjeta de soplado sin energía		Control operacional	5	7	3	108	1. Verificar que la alimentación eléctrica sea la permitida por el equipo 2. Verificar estado de fusible (protección de sobretensiones) 3. Verificar que compuertas de tablero de temporizador permitan un cierre hermético	INST				
1.4.2 Obstrucción en líneas de circulación de aire comprimido	Aumento de probabilidad de taponamiento en líneas de aire comprimido de trabajo	Exceso de contaminación (polvo) en sistema y ambiente	Inspección visual	3	5	4	60	1. Realizar limpieza en componentes del sistema de aire comprimido del sistema de accionamiento 2. Verificar que no existan fugas en la tapa superior del compartimento	OPER INST			

## Anexo G: AMFE Transmisor de Presión Diferencial

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (A.M.F.E.)											
DENOMINACIÓN EQUIPO/COMPONENTE:		TRANSMISOR PRESIÓN DIFERENCIAL		ELABORADO POR:		EDUARDO SAAVEDRA ROJAS		FECHA INICIO:			
UBICACIÓN TÉCNICA:				REVISADO POR:				FECHA REVISIÓN:			
OPERACIÓN O FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	FALLOS POTENCIAL			ESTADO ACTUAL			ACCIÓN DE PREVENCIÓN DE FALLA	RESPONSABLE		
		MODO DE FALLA	EFECTO DE LA FALLA	CAUSA DE FALLA	MEDIDAS DE ENSAYO Y CONTROL	F	G			D	IPR
1. Medición de diferencia de presión entre los gases de entrada y salida de los Filtros de Tela. Seteado para una caída de presión de 150 mmH2O	1.1 Falla de medición (Indicación errática/fija)	1.1.1 Falla en el sensor	Pérdida de señal de la condición de medida del transmisor, y por ende lecturas inexactas	Acumulación de contaminantes en el sensor	Inpección Visual	2	7	3	42	1. Realizar limpieza periódica al transmisor 2. Inspecciones visuales al componente	INST
		1.1.2 Falla del transmisor	Operacional: Pérdida de datos de presión	Mal funcionamiento del circuito eléctrico	No existe	2	8	2	32	1. Verificar que las vibraciones del sistema sean las permisibles 2. Asegurar que no se posean componentes alrededor que puedan causar daños por golpes	MEC INST
		1.1.3 Fuga en junta/sellos	Operacional: Ingreso de contaminación al sistema	Daño mecánico (impactos, vibraciones)	Control operacional	5	9	4	189	1. Pruebas periódicas de funcionamiento 2. Calibración	INST
		1.1.4 Línea de toma obstruida	Operacional: Falta de datos para la lectura del transmisor	Daño mecánico (impactos, vibraciones)	Control operacional	4	9	4	184	1. Inspecciones visuales al componente y presión diferencial indicada	OPER
			Operación: Falta de datos para la lectura del transmisor	Contaminación del flujo	Inpección Visual	3	5	2	30	1. Inspecciones visuales al componente	OPER
2. Indicación de señales para válvulas poppet y válvulas pulsos de aire en caso de presión diferencial alta	2.1 Falla de señal	2.1.1 Fallas en cableado eléctrico	Operacional: sistema de control actúa incorrectamente debido a que las señales enviadas son incorrectas o nulas	Cableado dañado	No existe	3	6	3	54	1. Inspección visual del circuito eléctrico del transmisor 2. Verificar funcionamiento de manera periódica	OPER INST
		2.1.2 Falla en conectores y sellos	Operacional: sistema de control actúa incorrectamente debido a que las señales enviadas son incorrectas o nulas	Conectores y sellos dañados	No existe	3	6	4	72	1. Inspección visual del circuito eléctrico del transmisor 2. Verificar funcionamiento de manera periódica	OPER INST

## Anexo H: Pauta de Mantenimiento Válvulas de Pulso de Aire INST 1S

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP INST 1S VV PULSE JET	ÁREA RESPONSABLE:	INSTRUMENTACIÓN				
UNIDAD:		OT:					
FABRIC FILTER (A/B):		KKS:					
FRECUENCIA:	1 DÍA	FECHA / HORA INICIO:					
EFECTUADA POR:		FECHA / HORA FIN:					
ACTIVIDADES PREVIAS		EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN				
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES		SI / NO					
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS		SI / NO					
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS		SI / NO					
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES		SI / NO					
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Válvula diafragma	Inspección visual y limpieza de válvula de diafragma	0,25 h	Incomunicar Compartiment o	No debe existir exceso de contaminación externa	SI / NO	
2	Electroválvula	Inspección visual y limpieza de electroválvula	0,25 h	Incomunicar Compartiment o	No debe existir exceso de contaminación externa	SI / NO	
2	Sistema conexión aire comprimido	Verificación de la correcta instalación del tubing de electroválvula a válvula diafragma de pulsos de aire	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	La conexión del tubing no debe presentar fugas o indicios de mala instalación	SI / NO	
3	Cabezal de aire comprimido	Inspección visual de cuerpo y componentes de cabezal de aire comprimido	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	No deben existir fugas en el los componentes del cabezal de aire (válvula de purga y temporizador). Capacidad máxima de cabezal de 0,25 [m3]	SI / NO	
4	Cabezal de aire comprimido	Verificar que el aire comprimido de trabajo se encuentre limpio	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	Aire comprimido de trabajo debe estar filtrado	SI / NO	
5	Temporizador	Verificar estado de fusible (protección de sobretensiones) de temporizador	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	Fusible no debe indicar indicios de daños parámetros de fusible 25V/3A	SI / NO	
6	Temporizador	Verificar estado de tarjeta de soplado	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	No debe presentar daños o indicios de mala instalación	SI / NO	
7	Temporizador	Verificar que la alimentación eléctrica de tarjeta de soplado sea la permitida por el equipo	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	Voltaje de entrada de 24V DC	SI / NO	
8	Temporizador	Verificar la frecuencia del temporizador (frecuencia del ciclo de soplado)	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	Tiempo de frecuencia de 2 seg generalmente (no ajustar en 10 seg)	SI / NO	
9	Temporizador	Verificar la duración del temporizador (duración de válvula abierta durante limpieza)	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	Entre 0,1 y 0,2 segundos por parámetros de diseño de válvula diafragma	SI / NO	
10	Sistema conexión aire comprimido	Verificar si existe taponamiento en las líneas de aire comprimido	1 h	Incomunicar Compartiment o	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
11	Electroválvula	Verificar funcionamiento de sistema de accionamiento (señal)	0,5 h	Incomunicar Compartiment o	No deben existir fugas	SI / NO	
12	Válvula diafragma	Pruebas de funcionamiento de válvula diafragma y electroválvula en conjunto	1 h	Incomunicar Compartiment o	No deben existir fugas	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							


## Anexo I: Pauta de Mantenimiento Válvulas de Pulso de Aire INST 3M

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP INST 3M VV PULSE JET	ÁREA RESPONSABLE:	INSTRUMENTACIÓN				
UNIDAD:		OT:					
FABRIC FILTER (A/B):		KKS:					
FRECUENCIA:	3 MESES	FECHA / HORA INICIO:					
EFFECTUADA POR:		FECHA / HORA FIN:					
ACTIVIDADES PREVIAS		EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN				
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES		SI / NO					
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS		SI / NO					
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS		SI / NO					
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES		SI / NO					
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Sistema conexión aire comprimido	Realizar limpieza en componentes del sistema de aire comprimido del sistema de accionamiento	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
2	Sistema conexión aire comprimido	Verificar que los conectores de aire comprimido utilizados son los correctos (válvula diafragma y electroválvula)	2 h	Incomunicar Compartimiento	Debe ser NPT 1/8" x 3/8" (según el utilizado actualmente)	SI / NO	
3	Sistema conexión aire comprimido	Realizar cambio periodico de los componentes de conexión con desgaste	1 h	Incomunicar Compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
4	Electroválvula	Inspecciones visuales tapa electroválvula	1 h	Incomunicar Compartimiento	Tapa debe quedar cerrada herméticamente para evitar contaminación	SI / NO	
5	Temporizador	Verificar que compuertas de tablero de temporizador permitan un cierre hermético	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
6	Temporizador	Verificar que pernos de tapa no se encuentren con desgaste	1 h	Incomunicar Compartimiento	Tapa debe quedar cerrada herméticamente para evitar contaminación	SI / NO	
7	Sistema conexión aire comprimido	Verificar que el aire comprimido de trabajo se encuentre limpio	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	Aire comprimido de trabajo debe estar filtrado	SI / NO	
8	Sistema conexión aire comprimido	Verificar la presión del aire comprimido de limpieza	1 h	Incomunicar Compartimiento	Presión de aire comprimido debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
9	Electroválvula	Verificar funcionamiento de sistema de accionamiento (señal)	0,5 h	Incomunicar Compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
10	Válvula diafragma	Pruebas de funcionamiento de válvula diafragma y electroválvula en conjunto	1 h	Incomunicar Compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							

## Anexo J: Pauta de Mantenimiento Lamos de Entrada INST 3M

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP INST 3M LAMPOS ENTRADA	ÁREA RESPONSABLE:	INSTRUMENTACIÓN				
UNIDAD:		OT:					
FABRIC FILTER (A/B):		KKS:					
FRECUENCIA:	3 MESES	FECHA / HORA INICIO:					
EFFECTUADA POR:		FECHA / HORA FIN:					
ACTIVIDADES PREVIAS			EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN			
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES			SI / NO				
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS			SI / NO				
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS			SI / NO				
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES			SI / NO				
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Sensor posicionamiento	Inspeccionar y asegurar una correcta instalación e implementación del sensor	2 h	Incomunicar compartimiento	Deben formar un ángulo recto entre si (Open - Close). Sentido debe ser en contra de giro de damper (compuerta)	SI / NO	
3	Sensor posicionamiento	Inspeccionar soporte de sensor para asegurar que no este dañado	2 h	Incomunicar compartimiento	Soporte no debe presentar problemas en la soldadura de la base	SI / NO	
2	Sistema accionamiento	Verificar que la fuerza de apertura y cierre se encuentre dentro de los parámetros	1 h	Incomunicar compartimiento	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
4	Sistema accionamiento	Inspecciones visuales de cilindro de aire	0,5 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
5	Electroválvula	Realizar cambio de los componentes de conexión con desgaste (manguera, conectores)	2 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
6	Lampo entrada	Verificar funcionamiento del sistema	0,5 h	Incomunicar compartimiento	La apertura y cierre debe ser del 100% en la operación. No deben existir fugas	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							


## Anexo K: Pauta de Mantenimiento Lamos de Entrada MEC 3M

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP MEC 3M LAMPOS ENTRADA	ÁREA RESPONSABLE:	MECÁNICO				
UNIDAD:		OT:					
FABRIC FILTER (A/B):		KKS:					
FRECUENCIA:	3 MESES	FECHA / HORA INICIO:					
EFFECTUADA POR:		FECHA / HORA FIN:					
ACTIVIDADES PREVIAS		EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN				
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES		SI / NO					
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS		SI / NO					
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS		SI / NO					
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES		SI / NO					
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Sistema accionamiento	Inspección visual de sistema de accionamiento (cilindro de aire comprimido, electroválvula y conexiones)	1 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir componentes dañados, tanto mecánicos, instrumentación y eléctrico	SI / NO	
2	Brazo palanca	Inspección visual de brazo palanca	1 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir componentes dañados, tanto mecánicos, instrumentación y eléctrico	SI / NO	
3	Compuerta (damper)	Inspección visual de compuerta (damper)	1 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir componentes dañados, tanto mecánicos, instrumentación y eléctrico	SI / NO	
4	Lampo entrada	Realizar revisión de ajuste de apriete de todo el sistema	3 h	Incomunicar compartimiento	No debe existir juego en el apriete del brazo palanca al damper y al sistema de accionamiento	SI / NO	
5	Sistema accionamiento	Lubricar vástago de cilindro de aire	2 h	Incomunicar compartimiento	Utilizar tipo de grasa y cantidades de acuerdo a fabricante	SI / NO	
6	Lampo entrada	Verificar funcionamiento del sistema	0,5 h	Incomunicar compartimiento	La apertura y cierre debe ser del 100% en la operación. No deben existir fugas	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							


## Anexo L: Pauta de Mantenimiento Válvulas Poppet INST 3M

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP INST 3M VV POPPET	ÁREA RESPONSABLE:	INSTRUMENTACIÓN				
UNIDAD:		OT:					
FABRIC FILTER (A/B):		KKS:					
FRECUENCIA:	3 MESES	FECHA / HORA INICIO:					
EFFECTUADA POR:		FECHA / HORA FIN:					
ACTIVIDADES PREVIAS			EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN			
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES			SI / NO				
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS			SI / NO				
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS			SI / NO				
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES			SI / NO				
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Sensor posicionamiento	Inspeccionar y asegurar una correcta instalación e implementación del sensor	2 h	Incomunicar compartimiento	Deben formar un ángulo recto entre si (Open - Close). Sentido debe ser en contra de giro de damper (compuerta)	SI / NO	
3	Sensor posicionamiento	Inspeccionar soporte de sensor para asegurar que no este dañado	2 h	Incomunicar compartimiento	Soporte no debe presentar problemas en la soldadura de la base	SI / NO	
2	Sistema accionamiento	Verificar que la fuerza de apertura y cierre se encuentre dentro de los parámetros	1 h	Incomunicar compartimiento	Presión de aire comprimido de sistema de accionamiento debe operar entre 4-6 bar	SI / NO	
4	Sistema accionamiento	Inspecciones visuales de cilindro de aire	0,5 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
5	Electroválvula	Realizar cambio de los componentes de conexión con desgaste (manguera, conectores)	2 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir fugas	SI / NO	
6	Válvula poppet	Verificar funcionamiento del sistema	0,5 h	Incomunicar compartimiento	La apertura y cierre debe ser del 100% en la operación. No deben existir fugas	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							

## Anexo M: Pauta de Mantenimiento Válvulas Poppet MEC 3M

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP MEC 3M VV POPPET	ÁREA RESPONSABLE:	MECÁNICO				
UNIDAD:		OT:					
FABRIC FILTER (A/B):		KKS:					
FRECUENCIA:	3 MESES	FECHA / HORA INICIO:					
EFFECTUADA POR:		FECHA / HORA FIN:					
ACTIVIDADES PREVIAS		EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN				
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES		SI / NO					
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS		SI / NO					
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS		SI / NO					
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES		SI / NO					
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Sistema accionamiento	Inspección visual de sistema de accionamiento (cilindro de aire comprimido, electroválvula y conexiones)	1 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir componentes dañados, tanto mecánicos, instrumentación y eléctrico	SI / NO	
2	Brazo palanca	Inspección visual de vástago	1 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir componentes dañados, tanto mecánicos, instrumentación y eléctrico	SI / NO	
3	Compuerta (damper)	Inspección visual de disco (compuerta)	1 h	Incomunicar compartimiento	No deben existir componentes dañados, tanto mecánicos, instrumentación y eléctrico	SI / NO	
4	Lampo entrada	Realizar revisión de ajuste de apriete de todo el sistema	3 h	Incomunicar compartimiento	No debe existir juego en el apriete del brazo palanca al damper y al sistema de accionamiento	SI / NO	
5	Sistema accionamiento	Lubricar vástago de cilindro de aire	2 h	Incomunicar compartimiento	Utilizar tipo de grasa y cantidades de acuerdo a fabricante	SI / NO	
6	Válvula poppet	Verificar funcionamiento del sistema	0,5 h	Incomunicar compartimiento	La apertura y cierre debe ser del 100% en la operación. No deben existir fugas	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							

## Anexo N: Pauta de Mantenimiento Transmisor PD INST 2S

PAUTA DE MANTENIMIENTO							
DESCRIPCIÓN:	MP INST 2S TPD	ÁREA RESPONSABLE:	INSTRUMENTACIÓN				
UNIDAD:		OT:					
FABRIC FILTER (A/B):		KKS:					
FRECUENCIA:	3 MESES	FECHA / HORA INICIO:					
EFFECTUADA POR:		FECHA / HORA FIN:					
ACTIVIDADES PREVIAS			EJECUTADO	INDICACIÓN DE NO REALIZACIÓN			
COORDINACIÓN DE INTERVENCIÓN CON OPERACIONES			SI / NO				
VERIFICAR BLOQUEO DE EQUIPOS			SI / NO				
PREPARAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS			SI / NO				
COORDINACIÓN DE ENTREGA DE SISTEMA / EQUIPO A OPERACIONES			SI / NO				
N°	EQUIPO / COMPONENTE	DESCRIPCIÓN TAREA	DURACIÓN TAREA	ESTADO EQUIPO	LÍMITES TOLERABLES	EJECUCIÓN	OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS
1	Transmisor	Inspección visual del estado físico del transmisor	0,5 h	Equipo operando	No debe haber exceso de contaminación	SI / NO	
2	Transmisor	Limpieza de transmisor y componentes	0,5 h	Equipo operando	No debe haber exceso de contaminación	SI / NO	
3	Circuito eléctrico	Verificar funcionamiento del circuito eléctrico	1 h	Equipo operando	Voltaje de entrada de 24V DC de transmisor	SI / NO	
4	Sistema de aire comprimido	Verificar funcionamiento del circuito de aire comprimido	0,5h	Equipo operando	Caída de presión de 150 mmH2o	SI / NO	
5	Sistema de toma	Verificar obstrucción en tomas	1 h	Equipo operando	No debe existir contaminación en tomas	SI / NO	
6	Transmisor	Verificar funcionamiento del sistema en conjunto	0,5 h	Equipo operando	Rango de diseño -400 y 400 mmH2O. Diferencial de presión seteado para operación 150 mmH2O	SI / NO	
7	Transmisor	Verificar que operación se encuentre en los ragos de diseño	1 h	Equipo operando	Rango de diseño -400 y 400 mmH2O. Diferencial de presión seteado para operación 150 mmH2O	SI / NO	
8	Transmisor	Asegurar que no se posean componentes alrededor que puedan causar daños por golpes al transmisor	0,5 h	Equipo operando	No debe estar expuesto a golpes	SI / NO	
9	Transmisor	Verificar fecha de última calibración (se realiza cada 6 meses por Mantenimiento INST)	4 h*	Equipo operando	Rango de diseño -400 y 400 mmH2O. Diferencial de presión seteado para operación 150 mmH2O	SI / NO	
10	Transmisor	Verificar fecha de última toma de vibraciones (se realiza cada 6 meses por Mantenimiento MEC)	4 h*	Equipo operando	No debe existir un nivel alto de vibraciones Informar a Mantenimiento Mecánico si se encuentra pendiente	SI / NO	
Indicación de tareas no realizadas:							

