

Universidad Técnica Federico Santa María  
Departamento de Diseño y Manufactura

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero(a)  
en Proyectos de Ingeniería y al grado académico de Licenciado en  
Ingeniería de Proyectos

Evaluación Técnico-Económica de  
Alternativas para el Mejoramiento Funcional  
de Sopladores del Sistema Aireación en  
Planta Aguas Servidas

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Trabajo presentado por: | Claudio Vidal Cañete |
| Profesor Guía:          | Mario Salinas        |
| Comisión:               | Caren Carmona        |
|                         | Eduardo Vidal        |
| Fecha:                  | 05 diciembre de 2025 |



## 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:** Evaluación Técnico-Económica de Alternativas para el Mejoramiento Funcional de Sopladores del Sistema Aireación en Planta Aguas Servidas

**Nombre del candidato(a):** Claudio Enrique Vidal Cañete

**Carrera / Grado:** Ingeniería de Proyectos de ingeniería

**Campus:** Sede Viña del Mar **Departamento:** Departamento de Diseño y Manufactura

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

Yo, Mario Salinas, 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:** 22 de diciembre del 2025 **Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 22 de diciembre del 2025 **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.*

## Resumen

## Índice de contenidos

### Tabla de contenido

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Diagnóstico y Planteamiento del Problema</b>            | <b>6</b>  |
| 1.1      | Contextualización del problema                             | 6         |
| 1.1.1    | Antecedentes                                               | 6         |
| 1.1.2    | Etapas del Tratamiento secundario                          | 7         |
| 1.2      | Identificación del problema                                | 11        |
| 1.2.1    | Situación Actual                                           | 11        |
| 1.2.2    | Situación con proyecto y metodología                       | 18        |
| 1.3      | Objetivos del proyecto                                     | 20        |
| 1.3.1    | Objetivo General                                           | 20        |
| 1.3.2    | Objetivos Específicos                                      | 20        |
| 1.4      | Supuestos de mejora del proyecto                           | 20        |
| 1.4.1    | Supuestos Técnicos y de Equipos                            | 20        |
| 1.4.2    | Supuestos operacionales                                    | 21        |
| 1.4.3    | Supuestos económicos                                       | 21        |
| <b>2</b> | <b>ESTUDIO TÉCNICO</b>                                     | <b>22</b> |
| 2.1      | ANÁLISIS técnico                                           | 22        |
| 2.1.1    | Alternativa 1: Mantenimiento Mayor de los Equipos Actuales | 22        |
| 2.2      | Evaluación Técnica                                         | 31        |
| 2.2.1    | Estudio Técnico: Eficiencia y Rendimiento                  | 31        |
| 2.2.2    | Evaluación Ambiental                                       | 32        |
| 2.2.3    | Evaluación Logística y Administrativa                      | 32        |
| 2.2.4    | Resumen de la Evaluación                                   | 32        |

|            |                                                                         |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.5      | Comparativo entre ambas alternativas plazos e impacto .....             | 33        |
| 2.2.6      | Costos de Inversión .....                                               | 33        |
| <b>3</b>   | <b>ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO.....</b>                              | <b>34</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Objetivo y Alcance.....</b>                                          | <b>34</b> |
| 3.1.1      | Metodología de Evaluación.....                                          | 34        |
| 3.1.2      | Método de Evaluación Económica.....                                     | 34        |
| <b>3.2</b> | <b>Inversión inicial.....</b>                                           | <b>35</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Proyección de flujos de caja.....</b>                                | <b>35</b> |
| 3.3.1      | Cálculo de flujos para cada alternativa.....                            | 35        |
| 3.3.2      | Cálculo del Valor Actual Neto Incremental (VAN incremental o VPNI)..... | 36        |
| 3.3.3      | Resultado obtenido del Análisis Incremental .....                       | 36        |
| <b>3.4</b> | <b>Tasa de descuento.....</b>                                           | <b>37</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Análisis de sensibilidad .....</b>                                   | <b>37</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Síntesis del Análisis Económico-Financiero.....</b>                  | <b>39</b> |
| <b>3.7</b> | <b>Conclusiones.....</b>                                                | <b>39</b> |
|            | <b>Referencias bibliográficas .....</b>                                 | <b>40</b> |

## Índice de figuras

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Esquema general de una Ptas. ....         | 6  |
| Figura 2 Esquema de funcionamiento de un SBR ..... | 8  |
| Figura 3 Diagrama de Ishikawa .....                | 16 |
| Figura 4 Despiece partes del Soplador Turbo .....  | 24 |

## Índice de tablas

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Tipos de fallas y su frecuencia .....                           | 12 |
| Tabla 2 Costos anuales por mantenimiento correctivo de sopladores ..... | 12 |
| Tabla 3 Mantenimiento Mayor año 2021 .....                              | 13 |
| Tabla 4 Gasto por equipo .....                                          | 13 |
| Tabla 5 Análisis 5 Por Qué? Falla de correas .....                      | 17 |
| Tabla 6 Análisis 5 Por Qué? Falla perdida de aceite .....               | 17 |
| Tabla 7 Ventajas y desventajas de propuestas .....                      | 19 |
| Tabla 8 características Soplador TNE .....                              | 24 |
| Tabla 9 características Soplador Nuevo .....                            | 25 |
| Tabla 10 Cuadro de rendimiento garantizado .....                        | 27 |
| Tabla 11 Despiece de Soplador Nuevo .....                               | 28 |
| Tabla 12 Piezas de mantenimiento preventivo .....                       | 28 |
| Tabla 13 Comparativo Eficiencia y rendimiento .....                     | 31 |
| Tabla 14 Comparativo evaluación ambiental .....                         | 32 |
| Tabla 15 Evaluación comparativa .....                                   | 32 |
| Tabla 16 Resumen de Evaluación.....                                     | 32 |

## Índice de Ilustraciones

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1 Dimensiones de Soplador Nuevo ..... | 29 |
| Ilustración 2 Descripción de Soplador nuevo ..... | 29 |
| Ilustración 3 Esquema del Panel SIGMA .....       | 30 |

## Índice de gráficos

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| Gráfico 1 Costos por Equipo.....        | 14 |
| Gráfico 2 Pareto Costos por equipo..... | 15 |

# 1 DIAGNÓSTICO Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 Contextualización del problema

### 1.1.1 Antecedentes

La Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) para la localidad de Buin Maipo fue diseñada para remover microorganismos patógenos y materia orgánica contaminante hasta alcanzar los niveles máximos exigidos por la normativa. La normativa vigente para estos efectos es el Decreto Supremo 90/2000 “Normas de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”, que establece las concentraciones máximas de contaminantes, sobre la base de la capacidad de dilución del cuerpo receptor. Para cumplir ese propósito el tratamiento implementado considera los siguientes procesos:

**Pretratamiento:** Las aguas servidas ingresan a un tratamiento primario que incluye la eliminación de sólidos y materiales grandes, como grava, arena, y materia orgánica no biodegradable.

**Tratamiento Secundario:** El objetivo principal es la remoción biológica de la materia orgánica, nitrógeno y fósforo presentes en las aguas servidas, de esta forma mejorar la calidad del efluente antes de su descarga o reutilización. En este proceso se utilizan microorganismos, como bacterias, para degradar los contaminantes orgánicos.

**Desinfección:** Remoción de los elementos patógenos, que pudiesen haber quedado en el agua luego del tratamiento secundario, mediante la adición de Cloro y tiempo de contacto no menor a 30 minutos, para alcanzar los niveles esperados de coliformes.

**Tratamiento de Lodos:** Espesamiento, deshidratación mecánica y encalado para su posterior disposición en vertedero.

Figura 1 Esquema general de una Ptas.

Figura 1. Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales



Fuente: Elaborado por Dr. Rolando Chamv

### 1.1.2 Etapa del Tratamiento secundario

La principal unidad operativa del **sistema de tratamiento secundario** es el Reactor Biológico Secuencial (SBR, por sus siglas en inglés). Este reactor corresponde a un estanque diseñado para ejecutar, de manera secuencial y en un mismo volumen, las principales fases del tratamiento biológico de lodos activados: reacción, sedimentación y descarga del efluente clarificado.

El diseño y operación del SBR permiten una alta flexibilidad frente a variaciones de carga y caudal, lo que lo convierte en una tecnología eficiente y compacta para el tratamiento de aguas residuales.

#### Terminología

|                         |                                                                                                                                                                           |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aguas Servidas</b>   | <b>Agua residual que proviene de actividades domésticas, industriales o comerciales. Contiene contaminantes físicos, químicos y biológicos</b>                            |
| <b>Materia Orgánica</b> | Sustancias derivadas de organismos vivos (como restos de alimentos, heces, etc.) que pueden descomponerse biológicamente                                                  |
| <b>Efluente</b>         | Agua tratada que sale de una planta de tratamiento. Puede ser reutilizada o descargada al medio ambiente.                                                                 |
| <b>Afluente</b>         | Agua residual que entra a una planta de tratamiento para ser procesada                                                                                                    |
| <b>Patógenos</b>        | Microorganismos (bacterias, virus, parásitos) que pueden causar enfermedades en humanos o animales                                                                        |
| <b>Coliformes</b>       | Grupo de bacterias indicadoras de contaminación fecal. Su presencia sugiere posibles patógenos en el agua                                                                 |
| <b>Lodo Espesado</b>    | Material semisólido resultante del tratamiento de aguas servidas, con menor contenido de agua que el lodo crudo. Se obtiene tras procesos de concentración                |
| <b>Lodos Activados</b>  | Método biológico de tratamiento de aguas servidas que utiliza microorganismos en suspensión para descomponer la materia orgánica. Se basa en aireación y mezcla constante |

#### 1.1.2.1 El Reactor Biológico Secuencial (SBR)

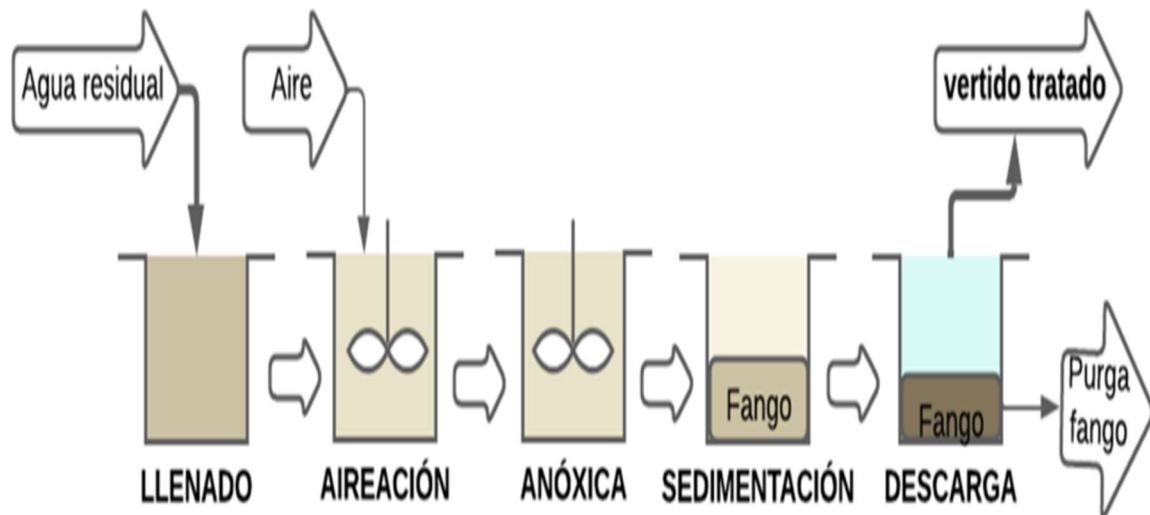
En un sistema biológico Reactor biológico secuencial (SBR) se desarrollan todas las etapas de un tratamiento biológico por lodos activos en un solo depósito. Además, cuando se dan las condiciones óptimas, permite eliminar contaminantes como el nitrógeno y el potasio. Un reactor biológico secuencial produce agua depurada de buena calidad, que puede ser recuperada o vertida al medio ambiente.

Los procesos biológicos SBR son empleados para tratar aguas residuales con un caudal y régimen de vertido discontinuo, que presenta variaciones importantes de carga contaminante. Un sistema SBR combina las

etapas de llenado, depurado y decantado de forma secuencial en un solo reactor. El diseño secuencial permite una selección natural de los microorganismos adaptados. Puede diseñarse un proceso SBR en un solo reactor, o con dos o más reactores trabajando en paralelo y alternativamente.

### Esquema tratamiento de aguas residuales por SBR

Figura 2 Esquema de funcionamiento de un SBR



El proceso del Reactor Biológico Secuencial se divide en cinco fases de operación:

#### Fase 1: Llenado

El agua residual se introduce en el reactor, cerca del fondo, sin mezcla ni aireación, atravesando la capa de fango y mezclándose homogéneamente con el contenido.

#### Fase 2: Aireación

Es el tratamiento biológico aerobio donde se suministra aire para que las bacterias aerobias eliminen la materia orgánica biodegradable en períodos Bach. La duración de esta fase, que depende de la composición del agua residual y los niveles de eliminación requeridos, se calcula y diseña para cada caso específico y se controla mediante la concentración de oxígeno y el potencial redox.

#### Fase 3: Anóxica

Durante esta etapa del tratamiento, se lleva a cabo la desnitrificación del efluente mediante agitación y la supresión del suministro de aire, creando un medio anóxico.

#### **Fase 4: Sedimentación**

Es la equivalencia a un proceso de decantación convencional. Tanto la aireación como la agitación se detienen para facilitar la separación del fango activo en el fondo del tanque.

#### **Fase 5: Descarga**

Consiste en evacuar por bombeo la parte superior del efluente clarificado hasta el volumen mínimo de reserva diseñado para el reactor.

El fango en exceso se extrae del fondo del depósito. Este fango contiene una elevada concentración de sólidos. No es necesaria su recirculación, ya que la concentración de biomasa dentro del reactor permite mantener la edad del fango deseada con los ciclos de operación – extracción.

#### **1.1.2.2 Sistema de Aireación y Control de Sopladores**

La planta de tratamiento cuenta con cuatro **reactores biológicos secuenciales (SBR)**, los cuales operan de forma cíclica bajo una lógica de control automatizada. Cada ciclo de operación incluye fases de llenado, reacción (aeración), sedimentación, decantación y purga. Dentro de estas, la fase de aireación es crítica, ya que garantiza el suministro de oxígeno necesario para la actividad de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica y la nitrificación del nitrógeno amoniacal.

El **sistema de aireación** está compuesto por cinco sopladores de desplazamiento positivo, los cuales están disponibles para suministrar aire a los reactores mediante válvulas individuales instaladas en cada estanque. Esta configuración permite una distribución controlada y flexible del aire según las necesidades de cada reactor.

Cada soplador puede operar en modo manual o automático, de acuerdo con la lógica de control del sistema. La velocidad de operación se regula mediante un sistema de control basado en la medición de Oxígeno Disuelto (OD). En modo automático, la señal de Oxígeno Disuelto es utilizada como variable de referencia para ajustar la velocidad del soplador, optimizando así el consumo energético y asegurando una aireación eficiente. En modo manual, la señal de Oxígeno Disuelto es ignorada, y el operador establece directamente un valor porcentual de velocidad, siempre que la válvula de aire del estanque correspondiente se encuentre abierta.

Actualmente, los cinco sopladores en servicio no operan dentro de los parámetros esperados de disponibilidad y mantenimiento, presentando una alta frecuencia de fallas, disminución en su confiabilidad y periodos de funcionamiento. Esta situación ha generado un aumento en los costos de mantenimiento y provoca un riesgo latente en la operación del sistema, para el cumplimiento de los estándares normativos de calidad del efluente.

### **1.1.2.3 Función y Aplicación del Soplador**

Un soplador es una máquina mecánica diseñada para generar una corriente de aire a presión, con el objetivo de mover grandes volúmenes de aire a presiones medias. Su función principal en sistemas de tratamiento de aguas es suministrar el oxígeno necesario para los procesos biológicos, como la degradación de materia orgánica y la nitrificación. Los sopladores se clasifican según su principio de funcionamiento.

La elección del tipo de soplador depende de factores como el caudal requerido, la presión de operación, la eficiencia energética y las condiciones del proceso.

#### **1.1.2.3.1 Tipos de sopladores**

##### **Desplazamiento positivo:**

Toman un volumen fijo de aire del ambiente y lo desplazan, con esto generan un flujo constante a una presión que puede ser variada. Lóbulos rotativos (Roots), de tornillo,

##### **Centrífugos:**

Estos equipos usan un impulsor rotatorio para desplazar el aire radialmente, logran aumentar la velocidad del aire y convertirla en presión.

#### **1.1.2.3.2 Función del Soplador en el proceso del Reactor Biológico Secuencial**

El Soplador es muy importante en el proceso de aireación de un Reactor Biológico Secuencial (SBR), la función principal es suministrar el oxígeno necesario para los microorganismos aerobios los cuales están encargados de la degradación de la materia orgánica y eliminación de nutrientes en las aguas servidas.

## 1.2 Identificación del problema

### 1.2.1 Situación Actual

#### 1.2.1.1 Definición del problema

Los equipos sopladores actualmente instalados en el sistema de tratamiento del lodo llevan funcionando 12 años de operación continua. Esto, con el paso de los años, ha generado que las fallas hayan aumentado, estas fallas han sido más recurrentes entre los años 2021 y 2022, comprometiendo la confiabilidad del sistema.

Las principales fallas registradas incluyen:

- Pérdidas de aceite
- Obstrucción de filtros
- Corte de correas
- Ruidos excesivos durante el arranque y sobrecalentamiento de motores
- Falla de rodamientos en los motores

El aumento de las fallas ha provocado un aumento considerable de los costos de mantenimiento correctivo, alcanzando un promedio anual de \$86,9 millones durante el período 2021–2022, en comparación con los \$3,2 millones anuales registrados durante los primeros nueve años de operación, (ver tabla N.º 2).

Los costos incluyen repuestos, mano de obra especializada (interna y externa) y gastos asociados a soluciones de emergencia.

#### 1.2.1.2 Consecuencia operativa

La falla de un soplador afecta directamente la operación del sistema SBR, ya que interrumpe el suministro de oxígeno necesario para los procesos biológicos.

Cuando el suministro de oxígeno se ve comprometido, se generan los siguientes efectos:

- Disminución de la eficiencia en la remoción de DBO y DQO, lo que puede resultar en efluentes fuera de norma.
- Interrupción del proceso de nitrificación, provocando acumulación de amonio en el efluente.
- Necesidad de aplicar tratamientos químicos adicionales, como hipoclorito, para cumplir con los estándares de descarga.

#### 1.2.1.3 Tipos de fallas y su frecuencia

De acuerdo con la revisión y levantamiento de las Ordenes de Trabajo (OT) por servicio correctivo, los tipos de fallas presentados se desglosan de la siguiente forma:

**Tabla 1 Tipos de fallas y su frecuencia**

| Tipo de Falla                     | Frecuencia                            | Observaciones Técnicas                                              |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Rotura de correas                 | 4 veces al año                        | Asociado a problemas mecánicos, eléctricos y de lubricación         |
| Filtración de aceite              | 2 veces al mes                        | Fugas en sistemas de lubricación, desgaste de sellos o sobrepresión |
| Obstrucción de filtros            | Cada 3 meses<br>(reemplazo semestral) | Acumulación de partículas, reduce eficiencia y sobrecarga motores   |
| Calentamiento de motores          | Monitoreo mensual                     | Posible ventilación deficiente, sobrecarga o desgaste interno       |
| Falla de variadores de frecuencia | 2 veces al mes                        | Asociado a problemas eléctricos y sobrecargas                       |

Estos problemas afectan el Costo de Mantenimiento Correctivo, lo que hace necesario implementar soluciones para mejorar la eficiencia del sistema.

#### 1.2.1.4 Análisis de Datos Históricos de Fallas

##### Recopilación y Organización de Datos:

Se realiza una recopilación de datos considerando el listado de ordenes de mantenimiento correctivo generadas y ejecutadas por el área de emergencias de la Gerencia de Gestión de Activos, en el periodo desde el año 2012 al año 2023. Para visualizar los datos se elaboró la tabla N°2 y el Gráfico N°4 que muestra los gastos de mantenimiento correctivo por años.

**Tabla 2 Costos anuales por mantenimiento correctivo de sopladores**

| Costos anuales por Mantenimiento Correctivo de Sopladores |           |                    |
|-----------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
| Año                                                       | Costos    |                    |
| 2012                                                      | \$        | 6.209.190          |
| 2013                                                      | \$        | 946.719            |
| 2014                                                      | \$        | 3.006.579          |
| 2015                                                      | \$        | 2.498.324          |
| 2016                                                      | \$        | 2.450.065          |
| 2017                                                      | \$        | 2.054.832          |
| 2018                                                      | \$        | 6.072.449          |
| 2019                                                      | \$        | 974.194            |
| 2020                                                      | \$        | 4.740.577          |
| 2021                                                      | \$        | 130.223.159        |
| 2022                                                      | \$        | 43.722.989         |
| 2023                                                      | \$        | 1.296.506          |
| <b>Total, general</b>                                     | <b>\$</b> | <b>204.195.583</b> |

### Análisis de Costos de Mantenimiento

Durante el período comprendido entre los años 2012 y 2023 los costos totales de mantenimiento alcanzaron aproximadamente los 204 millones. (Ver tabla N°2)

Analizando la tabla se puede observar que en el año 2021 hay un elevado costo por mantenimiento correctivo, este aumento significativo fue producto de la ejecución de mantenimiento mayor a tres de los equipos sopladores.

Este mantenimiento mayor considero el reemplazo de piezas internas, tales como sellos mecánicos, rodamientos y lóbulos o impulsores. Además, se realizó el reemplazo de un variador de frecuencia y dos Breaker. Estos mantenimientos mayores consideraron un costo aproximado de 114 millones

La siguiente tabla muestra los costos asociados a estos mantenimientos mayores

**Tabla 3 Mantenimiento Mayor año 2021**

| Mantenimiento Mayor                           | Equipo     | Costo |             |
|-----------------------------------------------|------------|-------|-------------|
| Reemplazo de Breaker                          | Soplador 4 | \$    | 12.525.299  |
| Suministro y Montaje lóbulos o impulsores     | Soplador 1 | \$    | 24.501.753  |
| Suministro y Montaje lóbulos o impulsores     | Soplador 4 | \$    | 20.800.382  |
| Suministro y Montaje lóbulos o impulsores     | Soplador 2 | \$    | 23.911.105  |
| Reemplazo de Breaker y variador de frecuencia | Soplador 2 | \$    | 32.596.348  |
| Total                                         |            | \$    | 114.334.887 |

#### 1.2.1.5 Distribución y Análisis de Costos por equipo Soplador

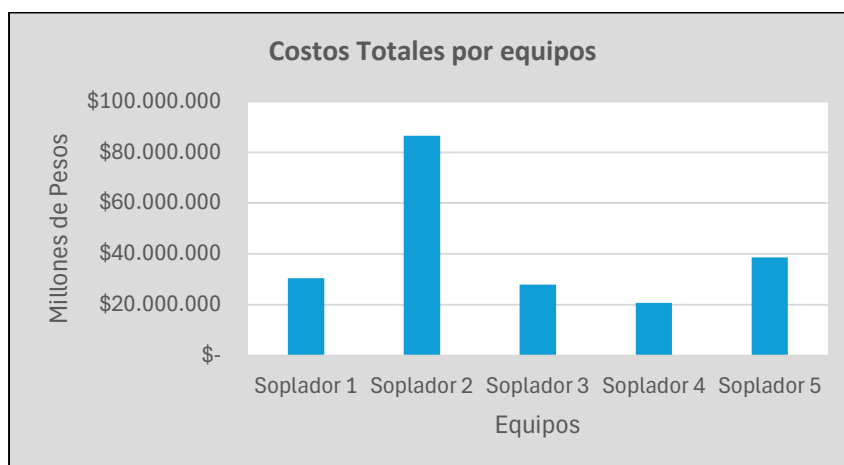
A partir de los datos recopilados en la planilla de órdenes de trabajo, se elaboró la Tabla N°5, la cual muestra la distribución de los costos de mantenimiento asociados a cada uno de los sopladores en operación. Esta información es importante para identificar qué equipos tienen los mayores niveles de gasto, permitiendo así priorizar acciones correctivas y preventivas.

**Tabla 4 Gasto por equipo**

| Costos Mantenimiento Correctivo por Equipos |                |             |
|---------------------------------------------|----------------|-------------|
| Equipos                                     | Costos Totales |             |
| Soplador 1                                  | \$             | 30.489.406  |
| Soplador 2                                  | \$             | 86.490.625  |
| Soplador 3                                  | \$             | 27.877.673  |
| Soplador 4                                  | \$             | 20.739.116  |
| Soplador 5                                  | \$             | 38.598.763  |
| Total, general                              | \$             | 204.195.583 |

Con los datos de la tabla se realiza el gráfico de barras N.º 3 para visualizar la información.

**Gráfico 1 Costos por Equipo**



El análisis de esta distribución permite orientar los recursos técnicos y financieros hacia los equipos más críticos, con el objetivo de investigar las causas raíz de sus fallas recurrentes y establecer estrategias de mejora que permitan optimizar el sistema.

#### **1.2.1.6 Aplicación de herramientas para Análisis Estratégico**

Con el objetivo de identificar las posibles causas de fallas y/o problemas en los equipos, se aplicarán herramientas de mejora continua tales como el Diagrama de Pareto, Diagrama de Causa Efecto (Diagrama de Ishikawa) y la técnica de Causa-Efecto los 5 Porqués. A partir de la planilla que contiene el listado de Órdenes de Trabajo (OT) por mantenimiento correctivo, se realizará un análisis que permitirá establecer relaciones entre las causas de falla y los eventos registrados.

#### **Herramientas de Mejora Continua Aplicadas**

Para lograr este objetivo, se emplearán herramientas de mejora continua tales como:

**Diagrama de Pareto:** Permitirá identificar y priorizar las causas más significativas de los problemas, basándose en el principio de que un pequeño número de causas suele ser responsable de la mayoría de los efectos.

**Diagrama de Causa-Efecto (Ishikawa):** El Diagrama de Causa-Efecto es una herramienta de análisis utilizada para identificar, organizar y visualizar las posibles causas de un problema específico (efecto). Su estructura se asemeja a una espina de pescado, donde el problema se ubica en la “cabeza” y las causas principales se ramifican como “espinas”.

Estas causas suelen agruparse en categorías como: Método, Máquina, Mano de obra, Materiales, Medio ambiente y Medición. Esta herramienta facilita el análisis sistemático de fallas o desviaciones, ayudando a equipos técnicos a encontrar las raíces del problema y proponer soluciones efectivas.

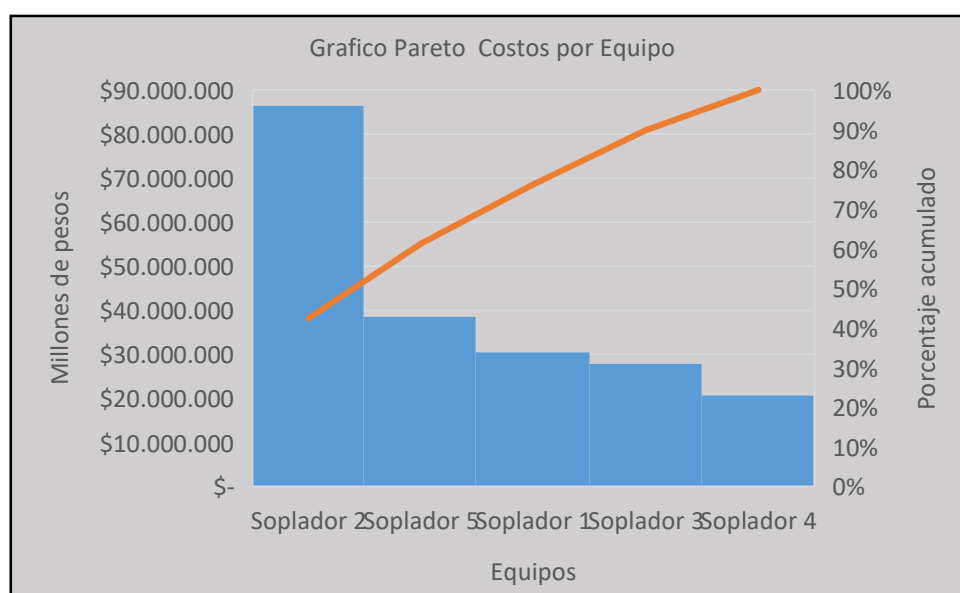
**Los 5 Porqués:** Se utilizará para profundizar en la causa raíz de cada problema, mediante una serie de preguntas iterativas que buscan el origen de la falla.

La aplicación de estas herramientas facilitará la toma de decisiones orientadas a optimizar la confiabilidad operativa y mejorar la eficiencia en los procesos de mantenimiento.

### 1.2.1.7 Aplicación de herramienta Diagrama de Pareto

Con la información obtenida de la tabla N°5, se aplicó un Diagrama de Pareto, esta herramienta permite visualizar de forma clara y cuantitativa qué sopladores representan el mayor gasto. Esta visualización facilita la toma de decisiones basada en datos, enfocando los esfuerzos en el 20% de los equipos que generan aproximadamente el 80% de los costos, de acuerdo con el principio de Pareto.

**Gráfico 2 Pareto Costos por equipo**



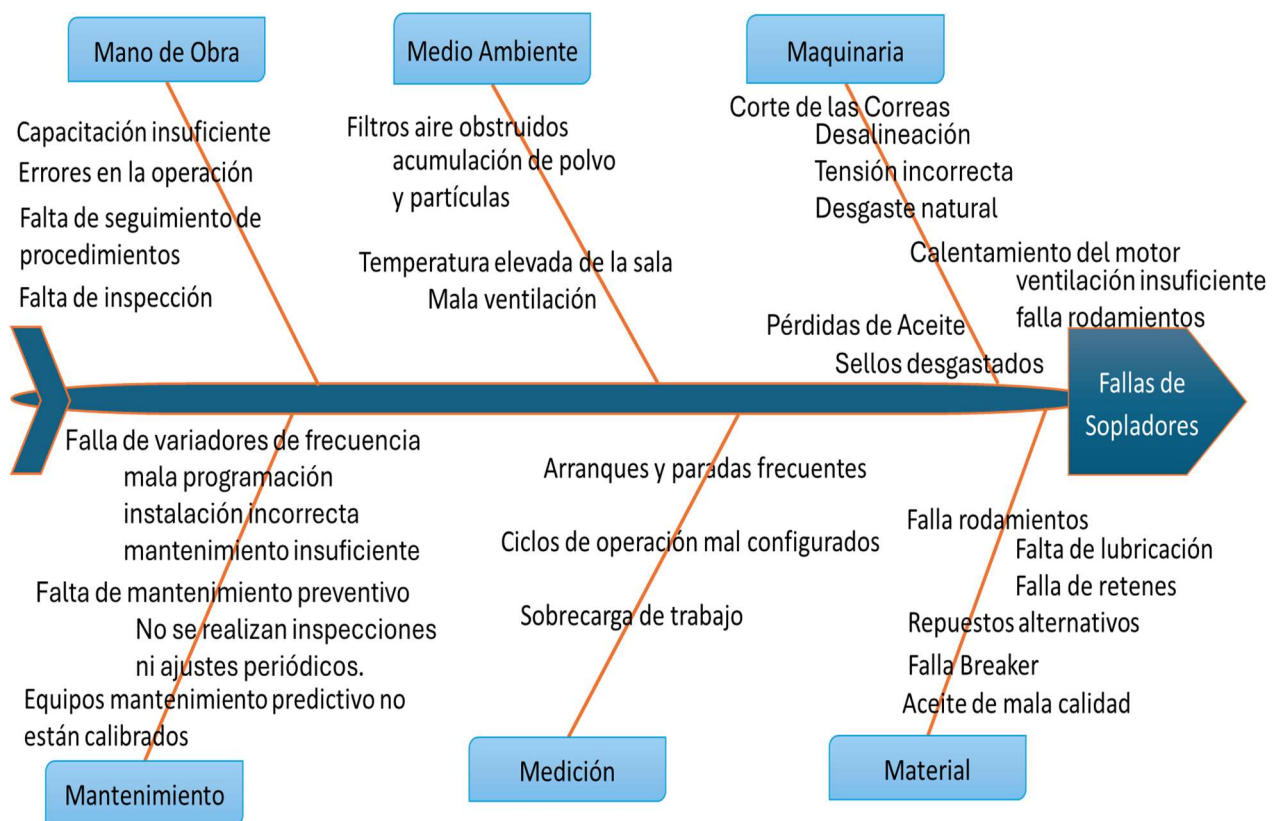
#### Interpretación del gráfico:

- El Soplador **2** concentran la mayor parte del gasto, representando aproximadamente el **42% del costo total**.
- Al aplicar la regla del 80/20, se observa que **tres sopladores (2,5 y1)** representan más del **80% del gasto acumulado**, lo que los convierte en candidatos prioritarios para análisis técnico y acciones correctivas. Con este gráfico se podrá justificar decisiones de mantenimiento, reemplazo o rediseño del sistema.
- El análisis detallado de estos casos facilitará la identificación de posibles causas técnicas, operativas o de gestión que estén generando a estos costos, y permitirá definir acciones correctivas o preventivas orientadas a mejorar la eficiencia del mantenimiento.

### 1.2.1.8 Aplicación de Diagrama de Causa (Diagrama de Ishikawa)

Con el objetivo de buscar las causas que originan los mayores costos de mantenimiento identificados mediante el Diagrama de Pareto, se utilizará el Diagrama de Causa-Efecto (Ishikawa) como herramienta de análisis. Esto permitirá descomponer y clasificar de forma estructurada las posibles causas de las fallas más frecuentes en los sopladores. La combinación de ambas herramientas facilitará la priorización de acciones correctivas y la formulación de estrategias de mejora enfocadas en los equipos más críticos del sistema.

Figura 3 Diagrama de Ishikawa



**Conclusión del análisis de Ishikawa:** El análisis realizado muestra que las fallas ocurridas en los sopladores son principalmente por causas técnicas del personal y de la forma que se ejecuta el mantenimiento.

### 1.2.1.9 Aplicación técnica de análisis los 5 Por Qué.

Con el propósito de identificar la causa raíz de las fallas más frecuentes en los sopladores, se aplicará la metodología de los 5 Porqués. Esta herramienta de análisis permitirá formular una secuencia de preguntas del tipo “¿por qué?” a partir de un problema conocido y así poder llegar a su origen o causa raíz. Esta técnica permite enfocar las acciones correctivas en las verdaderas causas del problema, evitando soluciones superficiales o temporales. Analizaremos las siguientes fallas:

Tabla 5 Análisis 5 Por Qué? Falla de correas

| Falla: Rotura de correas en los sopladores                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | Problema identificado: Las correas de los sopladores se rompen con una frecuencia promedio de cuatro veces al año.                           |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Pregunta                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | Respuesta                                                                                                                                    |  |
| ¿Por qué se rompen las correas con frecuencia?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | Porque están sometidas a tensiones, desalineación.                                                                                           |  |
| ¿Por qué hay tensiones y desalineación?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  | Porque no se mantiene una alineación adecuada entre poleas ni se realiza un ajuste correcto de la tensión.                                   |  |
| ¿Por qué no se mantiene la alineación ni el ajuste adecuado?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | Porque el procedimiento de mantenimiento no incluye una verificación sistemática de alineación y tensión.                                    |  |
| ¿Por qué el procedimiento de mantenimiento no contempla esa verificación?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | Porque no existe un procedimiento ni una capacitación específica para el personal técnico.                                                   |  |
| ¿Por qué no hay un procedimiento ni capacitación específica?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | Porque no se han revisado los planes de mantenimiento preventivo ni se han actualizado las rutinas de revisión según el historial de fallas. |  |
| <b>Conclusión:</b> La causa raíz de la rotura frecuente de correas no es solo un problema mecánico, sino también un problema de como se hace la ejecución del mantenimiento preventivo. Los técnicos que ejecutan no tienen la experiencia requerida para ejecutar la actividad y verificar la tensión y alineación. Se deben actualizar los procedimientos técnicos y reforzar la formación del equipo de mantenimiento. |  |                                                                                                                                              |  |

Tabla 6 Análisis 5 Por Qué? Falla perdida de aceite

| Falla: Pérdidas de Aceite                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  | Problema identificado: Se detectan filtraciones de aceite en los sopladores, con una frecuencia promedio de dos intervenciones mensuales para su corrección |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Pregunta                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | Respuesta                                                                                                                                                   |  |
| ¿Por qué se producen pérdidas de aceite en los sopladores?                                                                                                                                                                                                                                                         |  | Porque los sellos y juntas presentan desgaste o fallas de estanqueidad.                                                                                     |  |
| ¿Por qué los sellos y juntas están desgastados o fallan?                                                                                                                                                                                                                                                           |  | Porque han superado su vida útil o no se reemplazan con la frecuencia adecuada                                                                              |  |
| ¿Por qué no se reemplazan con la frecuencia adecuada?                                                                                                                                                                                                                                                              |  | Porque no existe un plan de mantenimiento preventivo específico para estos componentes.                                                                     |  |
| ¿Por qué no hay un plan de mantenimiento específico para los sellos?                                                                                                                                                                                                                                               |  | Porque el mantenimiento se ha enfocado principalmente en fallas visibles o críticas, sin considerar componentes menores pero recurrentes.                   |  |
| ¿Por qué no se consideran estos componentes en la planificación?                                                                                                                                                                                                                                                   |  | Porque no se ha realizado un análisis histórico detallado de fallas menores que generan costos acumulativos significativos.                                 |  |
| <b>Conclusión:</b> La causa raíz de las pérdidas de aceite está relacionada con la falta de <b>mantenimiento</b> preventivo para los componentes menores, como sellos y juntas. Esto genera solo atención correctiva, con intervenciones frecuentes que aumentan los costos y afectan la disponibilidad operativa. |  |                                                                                                                                                             |  |

### 1.2.2 Situación con proyecto y metodología

A partir del análisis técnico y económico realizado, se ha evidenciado que el sistema de sopladores presenta un deterioro progresivo que afecta tanto la confiabilidad operativa como los costos de mantenimiento del sistema de aireación. Ante esta situación, se plantea la ejecución de un proyecto orientado a mejorar la eficiencia y disponibilidad de los equipos, mediante la evaluación comparativa de dos alternativas:

**a) Mantenimiento mayor de los equipos existentes**

**b) Reemplazo por nuevos sopladores**

La metodología que se usara para el proyecto se estructura en las siguientes etapas:

- I. Diagnóstico técnico-operativo: Revisión del historial de fallas, análisis de órdenes de trabajo, costos asociados y desempeño de cada soplador.
- II. Análisis de criticidad: Aplicación de herramientas como el Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa y los 5 Porqués para identificar causas raíz y priorizar acciones.
- III. Evaluación de alternativas: Comparación técnica y económica entre el **mantenimiento mayor y el reemplazo de equipos**, considerando criterios como inversión, vida útil, eficiencia energética, impacto operativo y retorno de inversión.
- IV. Selección de solución adecuada: Definición de la alternativa más conveniente o combinación de ambas, en función de los resultados del análisis.
- V. Plan de implementación: Propuesta de cronograma, recursos requeridos y acciones de mejora continua.

Esta metodología permitirá tomar decisiones informadas y estratégicas, basadas en datos reales y criterios técnicos, con el objetivo de asegurar la sostenibilidad operativa del sistema de tratamiento y el cumplimiento de los estándares de calidad del efluente.

#### 1.2.2.1 Propuesta de Proyecto para la Solución Técnica

Con el objetivo de restituir la mejora operativa del sistema de aireación, se plantean dos alternativas técnicas posibles de ejecutar:

**Alternativa 1: Mantenimiento Mayor de Equipos Existentes**

**Descripción:**

Esta alternativa considera una intervención profunda de los sopladores actuales, que incluye el reemplazo de componentes críticos (rodamientos, sellos, correas, filtros, lóbulos, retenes, motores), limpieza interna, balanceo dinámico y revisión de sistemas de eléctrico y de control.

## Alternativa 2: Reemplazo por Equipos Nuevos

### Descripción:

Adquisición e instalación de nuevos sopladores con tecnología actualizada (por ejemplo, sopladores de tornillo o centrífugos), con mayor eficiencia energética, menor nivel de ruido y sistemas de control automatizados.

**Tabla 7 Ventajas y desventajas de propuestas**

| Alternativa 1: Mantenimiento Mayor de Equipos Existentes             | Alternativa 2: Reemplazo por Equipos Nuevos                                          |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ventajas</b>                                                      |                                                                                      |
| Menor inversión inicial                                              | Alta confiabilidad operativa.                                                        |
| Posibilidad de extender la vida útil de los equipos entre 3 y 5 años | Reducción significativa de fallas y costos de mantenimiento. 10–15 años de vida útil |
| Implementación más rápida si se dispone de repuestos.                | Mejora en la eficiencia energética y cumplimiento normativo.                         |
| <b>Desventajas</b>                                                   |                                                                                      |
| No se elimina completamente el riesgo de fallas futuras              | Mayor inversión inicial.                                                             |
| Mayor frecuencia de mantenimiento preventivo                         | Requiere planificación para instalación y puesta en marcha.                          |
| Riesgo de paradas prolongadas durante la intervención                | Posibles adecuaciones en infraestructura existente.                                  |

### Resumen de la tabla comparativa

La situación actual del sistema de aireación presenta baja confiabilidad operativa, altos costos de mantenimiento, con riesgo de fallas frecuentes.

La implementación del proyecto ya sea mediante **mantenimiento mayor o reemplazo de equipos**, ofrece mejoras significativas:

**Con el mantenimiento mayor**, se logrará una solución de corto plazo con menor inversión, aunque con riesgos remanentes y sin mejoras tecnológicas.

**Con el reemplazo de equipos**, se obtiene una solución de largo plazo, con alta confiabilidad y reducción de costos operativos, aunque requiere mayor inversión inicial y planificación.

Ambas alternativas superan ampliamente la situación actual, y una estrategia mixta podría optimizar recursos y resultados, asegurando la sostenibilidad operativa del sistema.

## 1.3 Objetivos del proyecto

### 1.3.1 Objetivo General

Evaluar Técnica y Económicamente Alternativas para el Mejoramiento Funcional de Sopladores del Sistema Aireación, con el fin de mejorar la eficiencia del proceso, reducir los costos de mantenimiento y asegurar la continuidad operativa a largo plazo.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

#### 1.3.2.1 Fase de Diagnóstico

Diagnosticar el estado actual del sistema de sopladores, mediante la revisión de datos históricos de fallas y registros de mantenimiento, para establecer una base con respecto a la disponibilidad y los costos.

#### 1.3.2.2 Fase de Análisis de Causa Raíz

Determinar las causas raíz de las fallas frecuentes, empleando Diagramas de Pareto e Ishikawa, con el fin de enfocar los recursos en los problemas de mayor impacto operativo.

#### 1.3.2.3 Fase de Evaluación y Toma de Decisiones

Validar técnica y económicamente la alternativa óptima entre el mantenimiento mayor y la reposición de los sopladores, mediante el análisis comparativo de indicadores financieros (KPI), utilizando una tasa de descuento calculada bajo el modelo CAPM y la proyección de flujos de caja mediante el análisis de VAN Incremental.

## 1.4 Supuestos de mejora del proyecto

Dentro de la gestión de proyectos, los supuestos son factores que se consideran ciertos para propósitos de planificación, sin contar con una prueba definitiva en el momento. Son condiciones previstas que permiten el avance del proyecto según lo programado.

Es importante señalar que, si un supuesto resulta ser incorrecto, esto podría afectar sustancialmente el cumplimiento del cronograma, el presupuesto, el alcance o la calidad esperada

### 1.4.1 Supuestos Técnicos y de Equipos

- a. Se estima técnicamente viable realizar intervenciones de mantenimiento mayor en los equipos actuales, previendo que su integridad estructural se mantendrá dentro de los parámetros de seguridad operativos. Se utilizarán los manuales técnicos de cada equipo como fuente principal para definir los procedimientos e información requerida para el mantenimiento.
- b. Considerando las especificaciones del diseño entregado en la Hoja Técnica de cada equipo, se proyecta que los equipos propuestos son compatibles en tamaño con la infraestructura disponible, anticipando intervenciones menores para su correcta puesta en marcha.

- c. Se estima que los nuevos equipos alcanzarán una vida útil de al menos 10 años, considerando un régimen de operación normal y el cumplimiento de los planes de mantenimiento recomendados. La fuente de información es la carta de garantía entregada por el proveedor y las proyecciones de vida útil declaradas por el fabricante bajo condiciones de operación nominal

#### 1.4.2 Supuestos operacionales

- a. Se prevé que el sistema de reactor biológico (SBR) mantenga una operatividad constante bajo las condiciones actuales de carga y caudal durante los próximos años, considerando la estabilidad de la demanda proyectada.
- b. Para garantizar el éxito del proyecto, se contempla que el personal técnico dispone del nivel de especialización adecuado para gestionar operativamente los nuevos equipos

#### 1.4.3 Supuestos económicos

- d. Se estima la estabilidad de los costos operativos (repuestos, mano de obra y energía), proyectando que se mantendrán dentro de rangos similares a los actuales. Esta premisa se fundamenta en el análisis de cotizaciones históricas y la validación de precios actualizada con cada proveedor
- a. Se proyecta la disponibilidad presupuestaria conforme a los plazos establecidos en el cronograma del proyecto. Esto se fundamenta en la planificación coordinada con la responsable del Plan Maestro para la Gestión de Activos del presente ejercicio
- e. Se considera un escenario de estabilidad en el tipo de cambio para la importación de equipos, proyectando que no habrá fluctuaciones que afecten significativamente el presupuesto. Esta premisa se basa en el seguimiento y análisis de los informes de política monetaria del Banco Central

## 2 ESTUDIO TÉCNICO

### Introducción al Estudio Técnico

El presente Estudio Técnico tiene como propósito definir los parámetros que permiten analizar para posteriormente evaluar y comparar de manera objetiva las dos alternativas propuestas, con el fin de optimizar la funcionalidad de los sopladores del sistema de aireación:

- La Alternativa 1: Mantenimiento Mayor de los Equipos Actuales y
- La Alternativa 2: Reemplazo por Equipos Sopladores Nuevos.

Este análisis permitirá identificar la opción más adecuada, considerando aspectos técnicos, operativos y económicos, con el fin de garantizar el funcionamiento óptimo del sistema y contribuir a la mejora continua del proceso. El resultado de esta sección determinará la factibilidad técnica de cada propuesta, sirviendo como base indispensable para la posterior Evaluación Económica.

### 2.1 ANALISIS TÉCNICO

#### 2.1.1 Alternativa 1: Mantenimiento Mayor de los Equipos Actuales

Esta alternativa consiste en realizar una intervención completa y exhaustiva de cada soplador existentes, con el objetivo de restaurar su rendimiento, prolongar su vida útil y mejorar su desempeño. Con este servicio se busca reacondicionar los equipos a un estado funcional próximo al original.

##### 2.1.1.1 Alcance: El plan de trabajo incluirá las siguientes actividades

Desmontaje Completo: El soplador será desarmado por completo para realizar una inspección detallada de cada componente interno y visualizar su estado actual. El objetivo es evaluar el estado actual de cada parte, identificar posibles desgastes o fallas, y preparar el equipo para su reacondicionamiento o reemplazo según sea necesario.

**Diagnóstico y Medición:** Se inspeccionarán todos los componentes críticos del soplador TNE, incluyendo:

- Motor PMSM (síncrono de imanes permanentes)
- Impulsor centrífugo de una sola etapa
- Cojinetes de aire tipo Air Foil
- Carcasa acústica y estructural
- Sistema de entrada y salida de aire
- Filtros de aire (no tejido o HEPA)
- Sistema de control HMI y variador de frecuencia (VFD)
- Sensores de temperatura y presión
- Válvulas de seguridad y accesorios estándar

El diagnóstico se realizará mediante pruebas funcionales, inspección visual y análisis de datos operativos, con el fin de verificar el estado mecánico, eléctrico y de control del equipo.

#### **Reemplazo de Componentes:**

Se procederá al reemplazo de los componentes principales del soplador TNE, incluyendo:

- Sistema motor turbina
- Impulsor centrífugo
- Filtros de aire
- Empaquetaduras y elementos de sellado
- Sensores de temperatura/presión

Reacondicionamiento de Partes: La carcasa acústica y estructural será limpiada y verificada para asegurar una correcta alineación del conjunto. Se realizará un balanceo dinámico del impulsor centrífugo para garantizar un funcionamiento libre de vibraciones. Además, se inspeccionará y verificará el estado del sistema eléctrico, incluyendo el motor PMSM, el variador de frecuencia (VFD) y las válvulas de control y antirretorno, asegurando su correcto funcionamiento y compatibilidad con los protocolos de comunicación industrial.

Ensamble y Calibración: El equipo será reensamblado utilizando componentes nuevos o reacondicionados, respetando todas las tolerancias y holguras de fábrica. Se realizarán ajustes de calibración en el sistema de control (HMI, sensores de presión y temperatura) y se ejecutarán pruebas preliminares para verificar la correcta integración de todos los elementos del soplador.

Pruebas de Funcionamiento: Se llevarán a cabo pruebas de funcionamiento para confirmar que el soplador cumple con las especificaciones de caudal, presión y consumo eléctrico establecidas por el fabricante. Estas pruebas se realizarán bajo condiciones controladas e incluirán la generación de informe técnico.

#### **2.1.1.2 Descripción del Equipo:**

El equipo es un soplador turbo de alta velocidad con cojinete de aire (Air Bearing High-Speed Turbo Blower). Es tipo centrífugo de una sola etapa, diseñado para aplicaciones industriales que requieren eficiencia energética y bajo mantenimiento.

#### **Funcionamiento:**

El aire entra por la succión, pasa por el impulsor centrífugo que lo acelera, y se comprime por acción de la velocidad rotacional. Los cojinetes de aire permiten que el eje gire sin fricción mecánica, lo que mejora la eficiencia y reduce el mantenimiento. El VFD ajusta la velocidad del motor según la demanda de aire.

El sistema está diseñado para operar en condiciones variables de presión y temperatura, con alta estabilidad incluso en aplicaciones de presión cero.

Características del equipo:

Figura 4 Despiece partes del Soplador Turbo



Tabla 8 características Soplador TNE

| Elemento                     | Descripción                                                                                 |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Marca                        | TNE                                                                                         |
| Modelo                       | ST-R52B-096                                                                                 |
| Tipo de equipo               | Soplador turbo de alta velocidad con cojinete de aire (Air Bearing High-Speed Turbo Blower) |
| Tecnología de impulsión      | Impulsor centrífugo de una sola etapa                                                       |
| Motor                        | PMSM (Motor síncrono de imanes permanentes), 380–480 V, 3 fases, 50–60 Hz                   |
| Potencia nominal             | 96 kW                                                                                       |
| Corriente de operación       | 150–180 A (dependiendo de carga y presión)                                                  |
| Caudal máximo de aire        | 52 m³/min (≈ 1,840 CFM)                                                                     |
| Presión de descarga          | Hasta 800 mbar (≈ 11.6 psi)                                                                 |
| Nivel de ruido               | < 85 dB(A) a 1 metro                                                                        |
| Cojinetes                    | Tipo Air Foil, sin contacto ni lubricación                                                  |
| Variador de frecuencia (VFD) | Integrado, certificado CE/UL/CSA                                                            |
| Panel de control             | Pantalla táctil HMI, compatible con PLC y SCADA                                             |
| Sensores                     | Temperatura, presión, vibración, corriente                                                  |
| Filtros de aire              | Tipo no tejido o HEPA                                                                       |
| Certificaciones              | KS B 6350 / PTC 13 / ISO Annex G                                                            |
| Dimensiones                  | Ancho (W) 96 pulgadas; Altura (H) 85 pulgadas; Largo (L) 100 pulgadas                       |
| Peso                         | Aproximadamente 4000 kg                                                                     |

### 2.1.1.3 Alternativa 2: Reemplazo por Equipo Nuevo

Esta alternativa contempla el reemplazo de los equipos actuales por nuevos sopladores, considerando alternativa de distinta marca, tipo y modelo que se ajuste a los requerimientos técnicos del sistema.

Como parte de esta opción, se realizará un proceso de evaluación y selección que incluirá el análisis de la tecnología disponible en el mercado, comparando aspectos como eficiencia energética, capacidad de caudal y presión, facilidad de mantenimiento, compatibilidad con la infraestructura existente y costo-beneficio.

### 2.1.1.4 Características de equipo nuevos

#### a. Especificaciones Técnicas

El equipo nuevo, por evaluar, debe tener las siguientes características técnicas:

**Tabla 9 características Soplador Nuevo**

| DETALLES TECNICOS DEL EQUIPO |                                                                                            |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elemento                     | Descripción                                                                                |
| País de fabricación          | Alemania                                                                                   |
| Marca                        | Kaeser                                                                                     |
| Modelo                       | FBS720M-G3SFC                                                                              |
| Tipo                         | Tornillo                                                                                   |
| Enfriamiento                 | Por aire.                                                                                  |
| Capacidad FAD a 720 mbar     | min 16 m3/hr – max. 71,7 m3/min                                                            |
| máxima presión diferencial   | 830 mbar                                                                                   |
| Cabina                       | Insonorizada Metalica Pintura Electroestática.                                             |
| Nivel de ruido               | 74 db(a) (1 mts)                                                                           |
| Controlador                  | Integrado Sigma Control 3                                                                  |
| Protocolo de comunicación    | Profibus DP-V0, Modbus RTU, Ethernet/IP, Devise Net, Modbus TCP, Profinet IO, entre otros. |
| Motor eléctrico              | 400 volts (+/-) 10%/ 50Hz/ 3Ph                                                             |
| Potencia Nominal             | 90 KW                                                                                      |
| Eficiencia del motor         | en carga 95,8%                                                                             |
| Eficiencia                   | Premium IE4 de acuerdo IEC 60034-30:2015                                                   |
| Eficiencia                   | IES2 Norma DIN EN 50599                                                                    |
| Grado de protección          | IP56                                                                                       |

### 2.1.1.5 Requisitos para Evaluación Técnica

Para la evaluación técnica de las alternativas, permitirá una comparación objetiva y rigurosa. La información solicitada abarca aspectos clave del equipo, su implementación y operación a largo plazo, garantizando que la alternativa seleccionada no solo cumpla con los requisitos técnicos iniciales, sino que también sea viable desde el punto de vista logístico y operativo.

#### a. Antecedentes técnicos del equipo:

Fichas técnicas (data sheets) de cada componente y del conjunto completo.

Especificaciones de dimensiones físicas, potencias, puntos de operación y caudales.

Identificación clara de marcas y modelos de los equipos principales y complementarios.

**b. Plazos de entrega y logística:**

Tiempos estimados de fabricación, suministro, transporte y entrega.

Descripción de las obras civiles, eléctricas y mecánicas requeridas para la instalación.

**c. Garantías:**

Detalle de las garantías ofrecidas para los equipos y servicios, incluyendo plazos y condiciones.

**d. Puesta en marcha y capacitación:**

Programa detallado de puesta en marcha.

Plan de capacitación técnica para el personal operativo y de mantenimiento.

**e. Plan de mantenimiento**

Descripción de las acciones de mantenimiento preventivo y correctivo.

Frecuencias, repuestos requeridos, tiempos estimados, servicios asociados y consumibles necesarios.

**f. Eficiencia energética**

Los equipos propuestos deben ser de alta eficiencia eléctrica y mecánica.

Se requiere que los motores eléctricos sean, como mínimo, clase IE3 (eficiencia premium) o superior.

**g. Memoria técnica y planos**

Documento explicativo con los criterios y normas utilizadas en el diseño.

Planos de disposición general, estructurales, eléctricos y de todos los componentes a suministrar.

### **2.1.1.6 Descripción Técnica de equipo nuevo Propuesto**

El Kaeser FBS 720 M SFC es un soplador de tornillo rotativo, exento de aceite, diseñado como una solución de ingeniería de paquete completo ("Plug-and-play") para aplicaciones de baja presión, destacando su uso en el tratamiento de aguas residuales (aireación), flotación, fluidización y fermentación.

#### **Características Principales:**

**Tecnología de Soplador:** Incorpora un elemento soplador de tornillo con el perfil de rotor de alta eficiencia SIGMA PROFILE, lo que permite una compresión de aire notablemente superior y exenta de aceite, resultando en ahorros energéticos de hasta el 35% en comparación con sopladores de lóbulos convencionales.

**Control de Velocidad Variable (SFC):** El sufijo SFC (SIGMA Frequency Control) indica que el equipo está equipado con un variador de frecuencia integrado. Esto permite un control dinámico de la velocidad del motor para ajustar con precisión el caudal volumétrico entregado a la demanda real del proceso, manteniendo una eficiencia casi constante en todo su amplio rango de control.

**Motorización:** Para esta versión (hasta 110 kW), utiliza un motor de reluctancia síncrona de alta eficiencia (SynRM), el cual combina las ventajas de los motores de imán permanente (alta eficiencia) con la robustez y facilidad de mantenimiento de los motores asíncronos.

**Transmisión:** La transmisión de potencia entre el motor y el elemento soplador se realiza mediante engranajes directos (sin correas), lo que garantiza una transferencia de potencia sin pérdidas significativas y un funcionamiento libre de mantenimiento.

**Sistema de Control:** Incorpora el controlador inteligente SIGMA CONTROL 2, que gestiona y monitoriza en tiempo real todos los parámetros de funcionamiento (presión, temperatura, estado) y permite la comunicación para la integración en sistemas de control superiores

**Diseño Compacto:** El diseño del gabinete permite la instalación lado a lado con otros equipos (acceso de servicio frontal), maximizando el ahorro de espacio en la sala de sopladores.

**Tabla 10 Cuadro de rendimiento garantizado**

| Punto de operación | Caudal                 | Caudal               | DP (3) | Consumo en KW |          |          |
|--------------------|------------------------|----------------------|--------|---------------|----------|----------|
|                    | Nm <sup>3</sup> /h (1) | m <sup>3</sup> /h(2) | m.c.a  | Al eje        | Al motor | A la red |
| Max Q; max DP      | 3700                   | 3700                 | 7,2    | 90            | 91,84    | 96,0     |
| Max Q; min DP      | 3700                   | 3700                 | 6,2    | 77,7          | 79,29    | 83,2     |
| Med Q; max DP      | 2550                   | 2730                 | 6,0    | 46            | 46,94    | 50,0     |
| Med Q; min DP      | 2550                   | 2730                 | 5,0    | 41,1          | 41,94    | 45,1     |
| Min Q; max DP      | 1400                   | 1760                 | 5,4    | 29,1          | 29,69    | 32,9     |
| Min Q; min DP      | 1400                   | 1760                 | 4,4    | 23,5          | 23,98    | 26,0     |
| Min Q Admisible    | No indica              | No indica            | 4,4    | 13,3          | 13,57    | 16,5     |

#### 2.1.1.6.1 Despiece y Partes Principales del Kaeser FBS 720 M SFC

El soplador FBS 720 M SFC está diseñado como una unidad de paquete completo. Las partes principales que componen el sistema dentro de su cabina insonorizada son:

**Tabla 11 Despiece de Soplador Nuevo**

| No. | Componente Principal                   | Función                                                                                             | Ubicación / Observaciones                                                                  |
|-----|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Elemento Soplador de Tornillo (Airend) | Genera el caudal de aire mediante el perfil de rotor SIGMA PROFILE, libre de aceite.                | Es el corazón del sistema; se lubrican solo los engranajes y rodamientos de este elemento. |
| 2   | Motor de Reluctancia Síncrona          | Proporciona la potencia para mover el elemento soplador.                                            | Motor de alta eficiencia (IES2), acoplado directamente al elemento soplador.               |
| 3   | Transmisión (Engranajes)               | Transfiere la potencia del motor al elemento soplador sin pérdidas (sin correas).                   | Sistema sellado y lubricado con aceite especial.                                           |
| 4   | Controlador SIGMA CONTROL 2            | Monitorea, regula y controla todos los parámetros operativos y de seguridad del soplador.           | Panel de control principal.                                                                |
| 5   | Convertidor de Frecuencia (SFC)        | Regula la velocidad del motor para ajustar el caudal a la demanda (Variable Speed Drive - VSD).     | Gabinete eléctrico, integrado.                                                             |
| 6   | Sistema de Filtrado de Admisión        | Filtra el aire atmosférico que ingresa al elemento soplador, protegiéndolo de partículas.           | En la línea de admisión.                                                                   |
| 7   | Silenciador de Admisión                | Reduce el ruido generado por la entrada de aire al soplador.                                        | En la línea de admisión.                                                                   |
| 8   | Silenciador de Descarga                | Reduce las pulsaciones y el ruido generado por la compresión y la salida del aire.                  | En la línea de descarga/salida.                                                            |
| 9   | Sistema de Ventilación/Refrigeración   | Ventilador y ductos para la extracción del calor generado dentro de la cabina (motor, convertidor). | Dentro de la cabina insonorizada.                                                          |
| 10  | Válvula de Retención                   | Evita el reflujo de aire del proceso hacia el soplador cuando este se detiene.                      | En la línea de descarga.                                                                   |

### 2.1.1.6.2 Piezas de Mantenimiento Preventivo (Kits de Servicio)

Para garantizar la máxima eficiencia y vida útil del soplador, Kaeser recomienda el uso de Kits de Servicio originales. El mantenimiento preventivo se centra en la sustitución periódica de consumibles y piezas de desgaste crítico. Las piezas principales requeridas para un servicio de mantenimiento (típicamente anual o por horas de funcionamiento) incluyen:

**Tabla 12 Piezas de mantenimiento preventivo**

| Repuesto / Consumible                   | Función                                                                                                                      | Frecuencia Típica de Reemplazo                                                                   |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Cartucho/Elemento del Filtro de Aire | Asegura que el aire que ingresa al elemento soplador esté limpio, protegiendo los rotores y rodamientos.                     | Anual o según las horas de funcionamiento (h), o por indicador de saturación.                    |
| 2. Aceite/Lubricante Sintético          | Lubricación de los engranajes y rodamientos del elemento soplador. Se requiere el lubricante SIGMA FLUID especial de Kaeser. | Según las horas de funcionamiento indicadas por Kaeser (generalmente cada 8,000 h o anualmente). |
| 3. Filtro de Aceite                     | Mantiene limpio el lubricante que fluye hacia los cojinetes y engranajes del elemento soplador.                              | Sustitución con cada cambio de aceite.                                                           |
| 4. Kits de Mantenimiento para Válvulas  | Kits de juntas, sellos y O-rings para la válvula de admisión y/o válvula de retención.                                       | Programado o según condición / horas de funcionamiento.                                          |

## Dimensiones



(Ilustración FBS 720 M SFC)

| Datos de dimensiones (mm) |      |
|---------------------------|------|
| Alto (H)                  | 1970 |
| Profundidad (T)           | 2330 |
| Ancho (B)                 | 1460 |

Ilustración 1 Dimensiones de Soplador Nuevo

### 4.3 Máquina

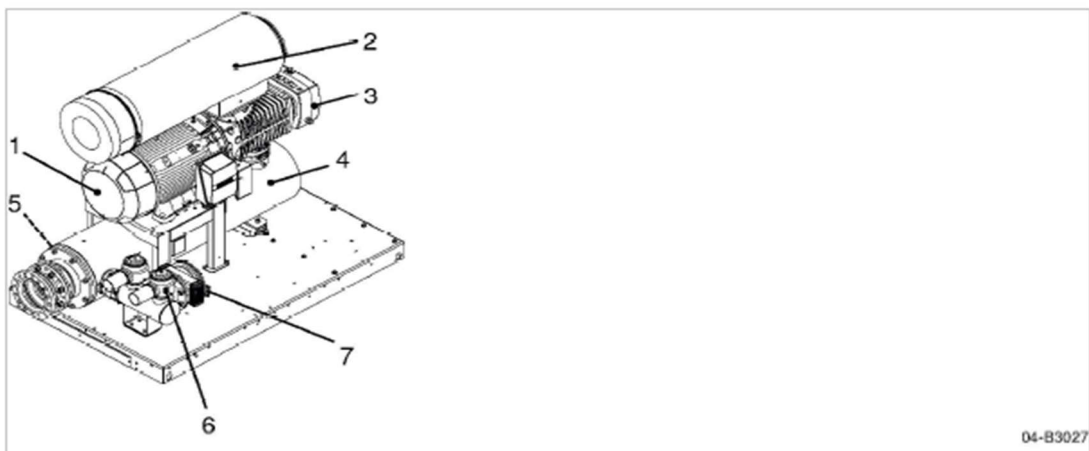


Fig. 7 Máquina

- |                               |                                                |
|-------------------------------|------------------------------------------------|
| ① Motor de accionamiento      | ⑤ Válvula de retención (opción G1)             |
| ② Silenciador de aspiración   | ⑥ Válvula de seguridad                         |
| ③ Bloque soplante de tornillo | ⑦ Válvula de descarga de arranque (opción C11) |
| ④ Silenciador de salida       |                                                |

El motor de accionamiento (motor eléctrico) ① acciona el bloque soplante de tornillo ③. A través de un filtro de aire en el silenciador de aspiración ② se aspira y se limpia el aire. A continuación, el aire es impulsado en vertical desde el bloque soplante de tornillo hasta el silenciador de salida ④, proceso durante el cual se genera presión.

Ilustración 2 Descripción de Soplador nuevo

## 4.2 Panel de control SIGMA CONTROL 2

### 4.2.1 Teclas

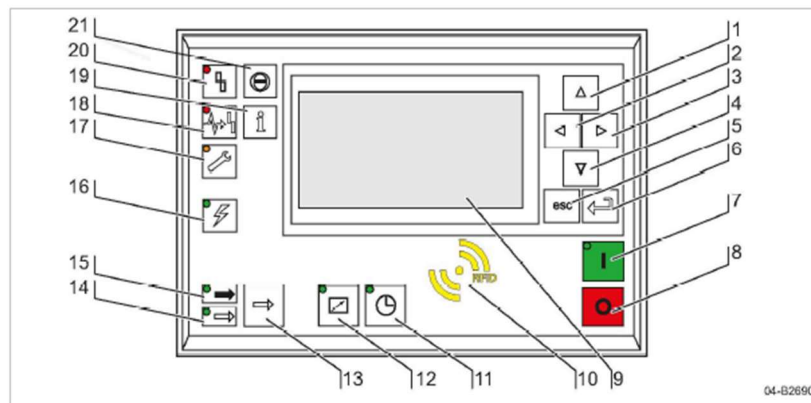


Fig. 4 Elementos de indicación y control

### Ilustración 3 Esquema del Panel SIGMA

## 2.2 EVALUACIÓN TÉCNICA

En esta sección se realizará una evaluación técnica comparativa entre el Soplador Turbo TNE ST-R52B-096 y el Soplador de Tornillo Rotativo Kaeser FBS 720 M SFC, estructurada en las dimensiones técnica, ambiental, logística y administrativa, para determinar la alternativa más adecuada para el mejoramiento funcional del sistema de aireación.



El objetivo es cuantificar y cualificar el rendimiento y la vida útil de los equipos bajo cada escenario.

**El Mantenimiento Mayor** es la solución de corto plazo que busca extender la vida útil a bajo costo, mientras que el **Reemplazo de equipos** es la solución de largo plazo con la cual se busca mejorar el rendimiento y reducir el riesgo técnico.

### 2.2.1 Estudio Técnico: Eficiencia y Rendimiento

Este criterio analiza la funcionalidad central de cada equipo.

**Tabla 13 Comparativo Eficiencia y rendimiento**

| Aspecto Clave            | Turbo TNE ST-R52B-096 (Alta Velocidad)                                                                                                                               | Tornillo Kaeser FBS 720 M SFC (SFC)                                                                                       |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tecnología de Compresión | Compresor dinámico (Turbo), libre de aceite y sin contacto mecánico.                                                                                                 | Compresor de desplazamiento positivo (Tornillo), lubricado.                                                               |
| Eficiencia Energética    | Máxima eficiencia a plena carga (cerca al 100% del caudal nominal).                                                                                                  | Alta eficiencia sostenida en carga parcial al utilizar el Control de Frecuencia (SFC) y al Motor Síncrono de Reluctancia. |
| Control de Caudal        | Ofrece un rango de control más limitado. La eficiencia se reduce significativamente en cargas bajas.                                                                 | Ofrece un amplio rango de control, ajustando con precisión la producción de aire a la demanda real,                       |
| Motor Eléctrico          | Generalmente utiliza un motor de imán permanente (PMSM) de alta velocidad y eficiencia, a menudo con clasificación IE4/IE5.                                          | Motor Síncrono de Reluctancia, que combina la alta eficiencia (IES2/IE4) con la robustez de un motor asíncrono.           |
| Confiabilidad            | Alta, pero sensible a las interrupciones de energía o fallos en el sistema de cojinetes (aire o magnético), lo que puede requerir un sistema de respaldo de energía. | Muy alta robustez y tolerancia a condiciones operativas variables. El motor de reluctancia es intrínsecamente duradero.   |

## 2.2.2 Evaluación Ambiental

**Tabla 14 Comparativo evaluación ambiental**

| Aspecto Clave             | Turbo TNE ST-R52B-096 (Alta Velocidad)                                                            | Tornillo Kaeser FBS 720 M SFC (SFC)                                                                       |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ruido y Vibración</b>  | Niveles de ruido y vibración muy bajos por la ausencia de contacto mecánico y el encapsulamiento. | Nivel de ruido bajo a moderado gracias al diseño de tornillo y al encabinado con amortiguación de sonido. |
| <b>Emisiones de CO2</b>   | Bajas, debido a la alta eficiencia en condiciones óptimas.                                        | Bajas, debido a la alta eficiencia en condiciones de carga parcial.                                       |
| <b>Manejo de Residuos</b> | Mínimo: no genera aceite residual, solo filtros y electrónica de potencia.                        | Bajo: genera aceite lubricante y filtros de aire, con una gestión de residuos sencilla.                   |

## 2.2.3 Evaluación Logística y Administrativa

**Tabla 15 Evaluación comparativa**

| Aspecto Clave                          | Turbo TNE ST-R52B-096 (Alta Velocidad)                                                                                                                                               | Tornillo Kaeser FBS 720 M SFC (SFC)                                                                                                                                     |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mantenimiento y Costos (OPEX)</b>   | Mantenimiento mínimo: No requiere cambios de aceite ni revisión de rodamientos. Sus repuestos son principalmente filtros y electrónica. Sin embargo, una falla mayor es muy costosa. | Mantenimiento predictivo bajo: Requiere un mantenimiento periódico (cambio de aceite, filtros) que es más predecible y menos costoso que una reparación mayor de turbo. |
| <b>Plazos de Entrega</b>               | Pueden ser más largos debido a la complejidad de la fabricación y la calibración de alta precisión de los componentes turbo.                                                         | Típicamente más cortos debido a la mayor estandarización y volumen de fabricación del proveedor (Kaeser).                                                               |
| <b>Instalación y Certificación</b>     | La instalación requiere alta precisión. El sistema se entrega como unidad completa, pero la electrónica es compleja.                                                                 | El equipo se entrega como una unidad completa, lista para conectar ( <i>Plug-and-Play</i> ), con certificaciones CE y EMC ya integradas, simplificando las obras.       |
| <b>Capacitación y Facilidad de Uso</b> | Requiere capacitación especializada debido a la alta velocidad de operación y los sistemas de control avanzados.                                                                     | Requiere capacitación estándar para sopladores de tornillo. El controlador SIGMA CONTROL 2 ofrece una interfaz de monitoreo avanzada pero robusta.                      |

## 2.2.4 Resumen de la Evaluación

**Tabla 16 Resumen de Evaluación**

| Alternativa                | Fortalezas                                                                                                                                            | Riesgos/Limitaciones                                                                                                                                             | Recomendación de Uso                                                                                        |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>TNE Turbo</b>           | Máxima eficiencia energética a plena carga, mantenimiento mecánico nulo (sin aceite/rodamientos), mínimo ruido.                                       | Alto costo inicial, alta sensibilidad a las variaciones de presión, dependencia del suministro eléctrico, mayor costo de reparación ante una falla catastrófica. | Procesos con caudal de aire muy estable (variación menor al 20%) y operación continua.                      |
| <b>Kaeser Tornillo SFC</b> | Mejor eficiencia en carga parcial, alta tolerancia a variaciones de presión y ambiente, instalación más sencilla, mantenimiento predecible y robusto. | Eficiencia inferior a plena carga que un turbo, requiere cambio de aceite, genera más ruido que un turbo.                                                        | Procesos con demanda de aire variable y donde la robustez y la facilidad de mantenimiento son prioritarias. |

## 2.2.5 Comparativo entre ambas alternativas plazos e impacto

| COMPARATIVO                 | Alternativa 1. Tabla Mantenimiento Mayor | Alternativa 2. Reemplazo por equipo nuevo |
|-----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| criterio                    | Valor                                    | Valor                                     |
| Cantidad de equipos         | 4                                        | 4                                         |
| Tiempo de entrega           | 4 a 6 semanas                            | 15 semanas                                |
| Garantía                    | 6 meses                                  | 24 meses                                  |
| Tiempo de ejecución         | 4 semanas                                | 8 semanas                                 |
| Vida útil restante          | 5 años                                   | 10 años                                   |
| Disponibilidad de repuestos | baja                                     | alta                                      |
| Impacto de la producción    | bajo                                     | medio                                     |
| Riesgo técnico              | medio                                    | medio                                     |
| Flexibilidad tecnológica    | baja                                     | alta                                      |
| valor residual futuro       | bajo                                     | medio                                     |

## 2.2.6 Costos de Inversión

La inversión inicial para cada propuesta se detalla en las tablas siguientes. En estas se especifica tanto el capital necesario (CAPEX) como los costos operativos vinculados al mantenimiento preventivo anual (OPEX) para cada alternativa.

| Alternativa 1. Tabla Costos Mantenimiento Mayor |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |
|-------------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Inversión / años                                | 0       | 1      | 2      | 3      | 4       | 5      | 6      | 7      | 8       | 9      | 10     |
| Mantenimiento Mayor (UF)                        | 2964,81 |        |        |        | 2964,81 |        |        |        | 2964,81 |        |        |
| Mantenimiento preventivo anual (UF)             | 816,66  | 821,46 | 821,46 | 821,46 | 821,46  | 821,46 | 821,46 | 821,46 | 821,46  | 821,46 | 821,46 |

| Alternativa 2. Tabla Costos Reemplazo por equipo Nuevo |         |       |       |        |       |       |        |       |       |         |       |
|--------------------------------------------------------|---------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|
| Inversión (UF)                                         | 0       | 1     | 2     | 3      | 4     | 5     | 6      | 7     | 8     | 9       | 10    |
| Suministro y Montaje de equipos                        | 6431,15 |       |       |        |       |       |        |       |       |         |       |
| Mantenimiento preventivo anual                         |         | 57,75 | 57,75 | 105,52 | 57,75 | 57,75 | 105,52 | 57,75 | 57,75 | 1410,41 | 57,75 |

## 3 ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

### 3.1 OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de este capítulo es realizar el análisis de factibilidad económica y financiera de la propuesta de mejora. Este análisis se enfocará en evaluar económicamente las dos alternativas para la reposición de los equipos:

- Mantenimiento mayor de los equipos existentes.
- Reemplazo por equipos nuevos.

#### 3.1.1 Metodología de Evaluación

Para lograr la evaluación, se considerarán los siguientes elementos:

- Costos de inversión inicial y costos por mantenimiento preventivo.
- Estimación de la tasa de descuento mediante el modelo Capital Asset Pricing Model (CAPM).
- Proyección de los flujos de caja.

La decisión sobre la alternativa más conveniente se fundamentará en el cálculo del Valor Actual Neto (VAN). Se utilizará un enfoque de flujo incremental para comparar de manera directa los costos entre la opción de **Mantenimiento Mayor** y la opción de **Compra de Equipos Nuevos**

Se aplicará una **tasa de descuento del 7%**, definida por la Empresa como su costo de oportunidad del capital, para determinar la rentabilidad y conveniencia de cada alternativa.

Finalmente, se desarrollará un análisis de sensibilidad para determinar el grado de robustez del proyecto frente a posibles variaciones en sus variables clave.

#### 3.1.2 Método de Evaluación Económica

El Valor Actual Neto Incremental (VANI) compara el VAN de dos proyectos de inversión para determinar si una inversión adicional en un proyecto que ofrece más beneficios está justificada. Es decir, se utiliza para evaluar si el incremento en la inversión de una alternativa es rentable y, por lo tanto, si vale la pena reemplazar un equipo existente por uno nuevo.

##### 3.1.2.1 ¿Cómo se aplica?

Para calcular el VANI del proyecto propuesto, se aplica el concepto de VANI a las diferencias entre las alternativas:

##### **Primero: Identificar las alternativas**

Se comparan las dos opciones, el estado actual (Mantenimiento Mayor) versus la reposición de equipos (Compra de equipos nuevos).

### Segundo: Calcular el VAN de cada alternativa

Cada opción se analiza por separado, calculando su propio Valor Actual Neto (VAN).

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} - Io$$

Donde:

Ft: Flujo de caja en el periodo (t).

K: Tasa de descuento (rentabilidad requerida)

Io: Inversión Inicial

### Tercero: Calcular las diferencias

Se restan los flujos de caja y la inversión inicial de una alternativa de los de la otra.

### Cuarto: Calcular el VANI

Se calcula el VAN de esas diferencias.

### Quinto: Tomar la decisión

El criterio de decisión basado en el Valor Actual Neto Incremental (VANI) se establece de la siguiente manera:

VANI Positivo (\$VANI > 0\$): El VAN es positivo, por lo que la alternativa de reemplazo es rentable y es viable realizar el proyecto.

VANI Negativo (\$VANI < 0\$): El VAN es negativo, por lo que la alternativa de reemplazo es menos rentable, no es una alternativa viable

## 3.2 INVERSIÓN INICIAL

Utilizando las tablas con datos de inversión inicial y costos por mantenimiento preventivo, se realiza el calcula de flujos para cada alternativa

## 3.3 PROYECCIÓN DE FLUJOS DE CAJA

### 3.3.1 Cálculo de flujos para cada alternativa

Flujo de Caja Alternativa N°1 MANTENIMIENTO MAYOR

| FLUJO DE CAJA PARA ALTERNATIVA N°1 _ MANTENIMIENTO MAYOR |            |             |        |        |         |        |        |        |         |        |        |
|----------------------------------------------------------|------------|-------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Tasa de descuento                                        | 7%         |             |        |        |         |        |        |        |         |        |        |
| Inversion (UF) / Años                                    | 0          | 1           | 2      | 3      | 4       | 5      | 6      | 7      | 8       | 9      | 10     |
| Costo Mantenimiento Mayor                                | 2964,81    |             |        |        | 2964,81 |        |        |        | 2964,81 |        |        |
| Costos Mantenimiento                                     | 816,66     | 816,66      | 816,66 | 816,66 | 816,66  | 816,66 | 816,66 | 816,66 | 816,66  | 816,66 | 816,66 |
| Flujo de Caja                                            | 3781,47    | 816,66      | 816,66 | 816,66 | 3781,47 | 816,66 | 816,66 | 816,66 | 3781,47 | 816,66 | 816,66 |
| Valor Actual                                             | 3781,47    | 763,23      | 713,30 | 666,64 | 2884,86 | 582,27 | 544,17 | 508,57 | 2200,85 | 444,21 | 415,15 |
|                                                          | VAN costos | \$13.504,71 |        |        |         |        |        |        |         |        |        |

## Flujo de Caja\_Alternativa N°2 COMPRA DE EQUIPOS NUEVOS

| FLUJO DE CAJA PARA ALTERNATIVA N°2 _ COMPRA EQUIPOS NUEVOS |                   |                   |       |        |       |       |        |       |       |          |       |
|------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|-------|
| Tasa descuento                                             | 7%                |                   |       |        |       |       |        |       |       |          |       |
| Inversion (UF) / Años                                      | 0                 | 1                 | 2     | 3      | 4     | 5     | 6      | 7     | 8     | 9        | 10    |
| Costo Compra y                                             | 6431,15           |                   |       |        |       |       |        |       |       |          |       |
| Costos Mantenimiento                                       |                   | 57,75             | 57,75 | 105,52 | 57,75 | 57,75 | 105,52 | 57,75 | 57,75 | 1.410,41 | 57,75 |
| Costos Mantenimiento                                       | 816,66            |                   |       |        |       |       |        |       |       |          |       |
| Flujo de caja                                              | 7.247,81          | 57,75             | 57,75 | 105,52 | 57,75 | 57,75 | 105,52 | 57,75 | 57,75 | 1.410,41 | 57,75 |
| Valor Actual                                               | 7.247,81          | 53,97             | 50,44 | 86,13  | 44,06 | 41,18 | 70,31  | 35,97 | 33,61 | 767,17   | 29,36 |
|                                                            | <b>VAN costos</b> | <b>\$8.460,02</b> |       |        |       |       |        |       |       |          |       |

## 3.3.2 Cálculo del Valor Actual Neto Incremental (VAN incremental o VPNI)

Con los datos obtenidos del cálculo de flujo para cada alternativa, se realiza el Flujo Incremental y cálculo del VAN Incremental.

| FLUJO DE CAJA INCREMENTAL        |                   |                   |        |        |         |        |        |        |         |         |        |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| Tasa de descuento                | 7%                |                   |        |        |         |        |        |        |         |         |        |
| Inversion (UF) / Años            | 0                 | 1                 | 2      | 3      | 4       | 5      | 6      | 7      | 8       | 9       | 10     |
| Costos flujo Compra Equipo Nuevo | 7247,81           | 57,75             | 57,75  | 105,52 | 57,75   | 57,75  | 105,52 | 57,75  | 57,75   | 1410,41 | 57,75  |
| Costos flujo Mantenimiento Mayor | 3781,47           | 816,66            | 816,66 | 816,66 | 3781,47 | 816,66 | 816,66 | 816,66 | 3781,47 | 816,66  | 816,66 |
| Flujo caja incremental           | -3466,35          | 758,90            | 758,90 | 711,14 | 3723,71 | 758,90 | 711,14 | 758,90 | 3723,71 | -593,76 | 758,90 |
| Valor Actual                     | -3466,35          | 709,26            | 662,86 | 580,50 | 2840,80 | 541,09 | 473,86 | 472,61 | 2167,24 | -322,96 | 385,79 |
|                                  | <b>VAN costos</b> | <b>\$5.044,69</b> |        |        |         |        |        |        |         |         |        |

## 3.3.3 Resultado obtenido del Análisis Incremental

El criterio de decisión basado en el Valor Actual Neto Incremental (VANI) se establece de la siguiente manera:

Si el VAN es positivo, se aprueba el proyecto de reposición

Si el VANI es negativo, no se aprueba el proyecto de reposición

El cálculo del flujo Incremental de las diferencias entre las alternativas arroja un Valor Actual Neto Incremental (VANI) de \$5.044,69

Dado que el VANI es positivo, se concluye que: La Alternativa N°2 (Reemplazo por equipos Nuevos) es económicamente rentable y viable de ejecutar.

### 3.4 TASA DE DESCUENTO

Cálculo de la Tasa de Descuento por el Método CAPM

El Modelo CAPM es un marco teórico que establece una relación directa entre el riesgo que asume un inversionista y la rentabilidad esperada que debe exigir a un activo o proyecto. En el contexto de la evaluación de proyectos de inversión, el resultado del CAPM se utiliza como la Tasa de Descuento (o Costo de Capital Propio), que es la rentabilidad mínima requerida para justificar la inversión. Su principal utilidad radica en que permite incorporar de forma explícita el Riesgo Sistemático (o de mercado) en la tasa requerida.

Fórmula del CAPM para  $K_e$

$$K_e = R_f + \beta \cdot (R_m - R_f)$$

Componentes:

- $R_f$ : Tasa libre de riesgo (bonos soberanos, por ejemplo 10 años).
- $\beta$ : Riesgo sistemático de la empresa (medido respecto al mercado).
- $R_m - R_f$ : Prima de riesgo del mercado.

Valores estimados para una Empresa de Tratamiento de Aguas son:

- $R_f$ : 5,32% (bonos soberanos Chile a 10 años).
- $\beta$ : 0,20 (empresa regulada, menor riesgo).
- $R_m - R_f$ : 6% (prima de riesgo de mercado).

Aplicando la formula y reemplazando los datos, tenemos que

$$K_e = 5,32 + 0,20 \cdot 6$$

$$K_e = 5,32 + 1,2$$

$$K_e = 6,38 \%$$

El valor de la tasa de descuento obtenida es de 6,38%

La Tasa de descuento aplicada al proyecto es de 7%

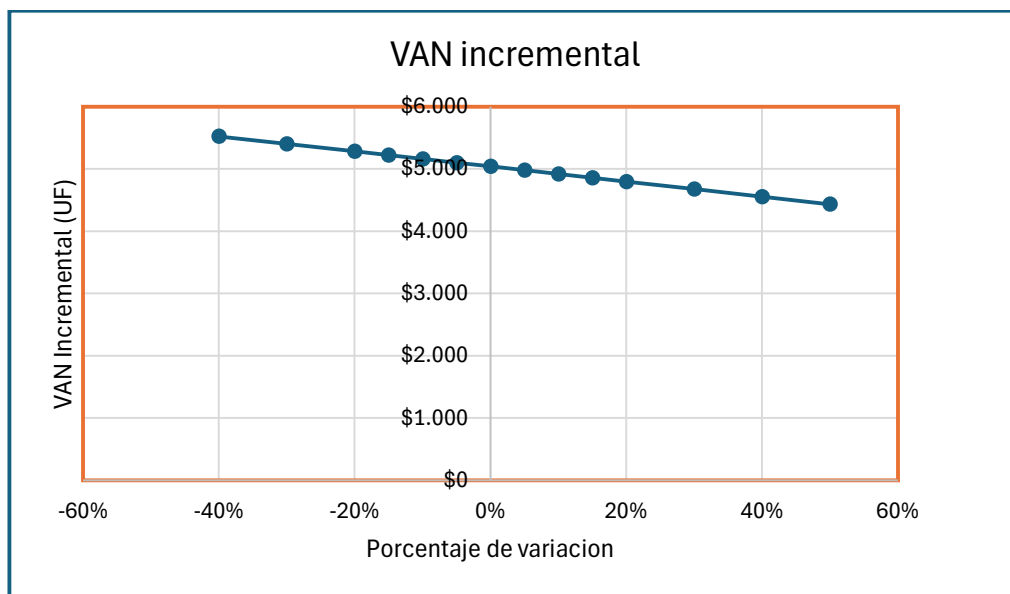
### 3.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para analizar el impacto del aumento en el costo del mantenimiento preventivo anual del equipo nuevo sobre el VAN incremental, y por consiguiente en la decisión entre Mantenimiento Mayor o Reemplazo de equipos, se realizó un estudio de sensibilidad.

Asimismo, con el objetivo de evaluar la influencia de la variación en el costo del mantenimiento preventivo anual, se generó un análisis considerando diferentes porcentajes de incremento y disminución en dicho costo para la alternativa de compra de equipos nuevos.

Tabla de variación del costo del mantenimiento anual versus VAN incremental para Alternativa N°2. Compra equipos nuevos

| Aumento y disminución del costo de mantenimiento preventivo |            |                 |
|-------------------------------------------------------------|------------|-----------------|
| Alternativa Compra de Equipos Nuevos                        |            |                 |
| Escenario                                                   | porcentaje | VAN incremental |
| Aumento                                                     | 50%        | \$4.434         |
|                                                             | 40%        | \$4.555         |
|                                                             | 30%        | \$4.676         |
|                                                             | 20%        | \$4.797         |
|                                                             | 15%        | \$4.858         |
|                                                             | 10%        | \$4.919         |
|                                                             | 5%         | \$4.979         |
|                                                             | 0%         | \$5.040         |
| disminución                                                 | -5%        | \$5.101         |
|                                                             | -10%       | \$5.161         |
|                                                             | -15%       | \$5.222         |
|                                                             | -20%       | \$5.282         |
|                                                             | -30%       | \$5.404         |
|                                                             | -40%       | \$5.525         |



### Conclusión del análisis

Del análisis realizado con respecto a la variación en los costos por mantenimiento anual para los Sopladores nuevos, tenemos lo siguiente:

Al aumentar el costo, el VAN incremental disminuye, pero siempre permanece positivo, esto indica que es una alternativa adecuada y no sufre grandes cambios con el aumento en los costos. Esto confirma la robustez de la decisión

### 3.6 SÍNTESIS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO-FINANCIERO

El análisis económico-financiero realizado integró los elementos clave para evaluar la viabilidad monetaria de la opción de inversión: la Compra de Equipos Nuevos (Alternativa N°2) frente al Mantenimiento Mayor (Alternativa N°1). Esto se logró a través de una metodología rigurosa que incluyó:

- El cálculo de la tasa de descuento utilizando el modelo Capital Asset Pricing Model (CAPM).
- La proyección de flujos de caja incrementales.
- La aplicación del Valor Actual Neto Incremental (VANI) como principal indicador de rentabilidad.

El resultado arrojó un VANI positivo, sustentando la recomendación de inversión. Finalmente, se ejecutó un análisis de sensibilidad para verificar la robustez del proyecto ante variaciones de los años de vida útil, proporcionando un marco objetivo y sólido para la toma de decisiones.

### 3.7 CONCLUSIONES

La Evaluación Técnico-Económica de Alternativas para el Mejoramiento Funcional de Sopladores del Sistema Aireación en Planta Aguas Servidas, que abarcó los siguientes capítulos diagnóstico y planteamiento del problema, Análisis Técnico y Análisis Económico-Financiero, establece una clara justificación para la implementación de la mejora propuesta.

#### **Diagnóstico y Necesidad**

El diagnóstico operacional evidenció que los equipos sopladores existentes se encuentran en una fase avanzada de su ciclo de vida, enfrentando un aumento en los costos de mantenimiento mayor y una potencial disminución en la confiabilidad y disponibilidad operativa.

#### **Análisis Técnico**

El análisis técnico confirmó que la Alternativa N°2 (Compra de Equipos Nuevos) es la solución adecuada, ya que garantiza la incorporación de tecnología moderna, mayor eficiencia energética y una reducción significativa en la probabilidad de fallas mayores. Técnicamente, esta alternativa asegura la continuidad operativa y el cumplimiento de los estándares de desempeño requeridos.

#### **Análisis Económico**

El análisis económico-financiero, utilizando la metodología de flujo incremental y la tasa de descuento determinada por método CAPM, validó la decisión técnica.

Este VANI positivo demuestra que los beneficios económicos derivados de la inversión inicial (menores costos de mantenimiento y mayor vida útil) superan el costo del capital de la Empresa.

El análisis de sensibilidad confirmó la robustez financiera del proyecto, incluso frente a escenarios adversos. Incluso considerando variaciones en el costo de mantenimiento preventivo anual, el VAN se mantiene positivo, lo que confirma la robustez de la decisión.

## Referencias bibliográficas

Biblioteca del Congreso nacional

[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25552/2/Informe Tratamiento Aguas Residuales.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25552/2/Informe_Tratamiento_Aguas_Residuales.pdf)

Agua Sigma

<https://aguasigma.com/procesos/sbr/>

Kaeser Compresores

<https://mx.kaeser.com/productos-y-soluciones/sopladores/>

IAgua

<https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>

Atlas Copco

<https://www.atlascopco.com/es-pe/compressors/aplicaciones-aire-comprimido/sopladores-aire-comprimido-como-funcionan-aplicaciones-tipos>

Soplador de Lóbulos

<https://sopladores.com.mx/2025/04/24/partes-de-un-compresor-de-lobulos/>

Soplador TNE

<https://air-center.com/wp-content/uploads/2024/08/Catalogo-Turbo-Blower-TNE-2024-Spanish-2.pdf>

Soplador KAESER

//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://es.kaeser.com/download.ashx?id=tcm:38-133855

<https://es.investing.com/equities/aguas-andinas>

[Base de Datos Estadísticos \(BDE\)](#)