

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA PARA EL
MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE
AQUACHILE PLANTA CARDONAL**

AUTOR

FELIPE RIVERA TOLEDO

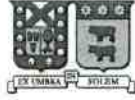
PROFESOR GUÍA

RAÚL STEGMAIER BRAVO

PROFESOR CO-REFERENTE

MARÍA PILAR GÁRATE CHATEAU

SANTIAGO DE CHILE, DICIEMBRE, 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: Estudio de Prefactibilidad Técnico-Económica para el mejoramiento del sistema de aire comprimido de AquaChile Planta Cardonal

Nombre del candidato(a): Felipe Edgardo Rivera Toledo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Vitacura Departamento: Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Stegmaier Bravo, 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: 12-01-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12-01-2026

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.

Tabla de contenido

Agradecimientos	5
Resumen ejecutivo	6
1. Problema de investigación.....	8
2. Objetivos	10
2.1 Objetivo General	10
2.2 Objetivos Específicos.....	10
3. Marco Teórico	12
3.1 Historia y evolución de los sistemas neumáticos industriales	12
3.2 Principios de generación, distribución y uso del aire comprimido	13
3.3 Componentes de un sistema de aire comprimido.....	15
3.3.1 Compresores: tipos, funcionamiento, eficiencia y seguridad.....	16
3.3.2 Estanques acumuladores: dimensionamiento, normativa y seguridad	17
3.3.3 Tratamiento del aire: secadores, filtros y separadores de condensado.....	19
3.3.4 Red de distribución y diseño de piping: materiales, pérdidas de carga y disposición de anillos ...	21
3.3.5 Instrumentación, control y monitoreo: sensores, válvulas, PLC, SCADA	23
3.4 Fundamentos de eficiencia energética en aire comprimido	25
3.4.1 Pérdidas energéticas: fugas, caídas de presión y sobrepresión	26
3.4.2 Indicadores de desempeño energético (kWh/Nm ³ , EnPI, SEC).....	27
3.4.3 Estrategias de control de demanda (secuenciación y almacenamiento intermedio)	28
3.5 Calidad del aire y requisitos en la industria alimentaria	29
3.5.1 ISO 8573-1: clasificación de purezas y contaminantes.....	30
3.5.2 NCh 2861/2020: requisitos sanitarios en procesos alimentarios.....	31
3.6 Normas y códigos aplicables al diseño, seguridad y eficiencia	32
3.6.1 ASME B31.3 y BPVC Sección VIII: diseño de tuberías y estanques a presión	33
3.6.2 ISO 11011 e ISO 50002: auditorías y evaluación energética.....	34
3.6.3 ISO 4414: seguridad y control en sistemas neumáticos.....	35
3.6.4 Legislación chilena en seguridad industrial: DS N°10/2012, DS N°594/1999, DS N°148/2003 ..	37
3.7 Evaluación económica y análisis del ciclo de vida (LCC).....	38
3.7.1 Definición de CAPEX, OPEX y Costo Total de Propiedad (TCO).....	40
3.7.2 Indicadores financieros (VAN, TIR, Payback).....	41
3.7.3 Enfoque de sostenibilidad en el ciclo de vida (energía y emisiones).....	43
3.8 Síntesis conceptual y relación con el caso de estudio	44
4. Antecedentes de la empresa	46
4.1 Historia de AquaChile.....	46
4.2 AquaChile Planta Cardonal.....	47

4.3	Proceso Productivo	47
5.	Metodología de la investigación.....	49
5.1	Diseño metodológico y enfoque del estudio	49
5.2	Etapas de desarrollo del proyecto	50
5.3	Fuentes de información y técnicas de recolección de datos.....	52
5.4	Instrumentación, monitoreo y parámetros adicionales.....	54
5.5	Procedimiento de diagnóstico energético conforme a ISO 11011	56
5.6	Criterios de diseño técnico, normativo y de seguridad	57
5.7	Metodología de evaluación económica y análisis del ciclo de vida (LCC)	59
5.8	Validación técnica y comparación de alternativas	61
6.	Diagnóstico.....	64
6.1	Descripción del sistema actual de aire comprimido.....	64
6.2	Configuración y estado operativo de los compresores.....	66
6.3	Tratamiento del aire y calidad del suministro	67
6.4	Instrumentación y control existente	69
6.5	Medición y análisis de desempeño energético y económico.....	70
7.	Ingeniería conceptual y rediseño propuesto	72
7.1	Criterios de diseño del nuevo sistema.....	72
7.2	Alternativas de configuración tecnológica.....	74
7.3	Selección de equipos.....	76
7.4	Diseño hidráulico del piping	78
7.4.1	Dimensionamiento	79
7.4.2	Selección de materiales y accesorios	81
7.4.3	Cálculo de pérdidas lineales.....	82
7.4.4	Cálculo de pérdidas en accesorios	82
7.4.5	Pérdidas de presión por tramo.....	83
7.5	Instrumentación y seguridad	83
8.	Evaluación económica y ciclo de vida	84
8.1	Estimación de costos de inversión (CAPEX).....	84
8.2	Estimación de costos operacionales (OPEX) y ahorros proyectados.....	84
8.3	Flujo de caja y horizonte de evaluación.....	86
8.4	Indicadores financieros (VAN, TIR, Payback).....	87
8.5	Análisis de sensibilidad (energía, horas de operación, tasa de descuento)	87
8.6	Evaluación de costo del ciclo de vida (LCC).....	89
8.6.1.	Costo del ciclo de vida del sistema actual	91
8.6.2.	Costo del ciclo de vida del sistema rediseñado.....	92
9.	Conclusiones y recomendaciones.....	94
9.1	Conclusiones técnicas	94
9.2	Conclusiones económicas	95

9.3	Recomendaciones de implementación	96
9.4	Propuestas de mejora continua y monitoreo	97
10.	Anexos	99
10.1	Fichas técnicas de equipos actuales y propuestos	99
10.2	Planos de distribución del sistema propuesto.....	102
10.3	Cálculos hidráulicos y de eficiencia energética	104
10.4	Cotizaciones y presupuestos de proveedores	107
10.5	Tablas complementarias del análisis financiero y LCC.....	108
11.	Referencias.....	109

Agradecimientos

Primero que todo, agradecer a mi familia, por su amor y apoyo incondicional. En especial agradecer a mi madre, que gracias a su esfuerzo y cariño pude lograr ser quien soy.

Gracias a mis amigos, los viejos y los que hice en el camino, quienes me acompañaron durante toda esta etapa y de alguna u otra forma me dieron las ganas de seguir.

Al personal de AquaChile, por abrirme las puertas y ayudarme en todo lo que necesité y más. Gracias en especial a Claudio y Felipe, quienes dispusieron de su tiempo sin dudar y me hicieron sentir acogido.

Gracias a la familia Cepeda Angulo, por su amor y aceptación infinita y hacerme sentir como en casa.

Finalmente, gracias a mí, por no bajar los brazos ante las exigencias, horas de estudio, desveladas, soledad y frustraciones del camino.

Resumen ejecutivo

El sistema de aire comprimido de AquaChile Planta Cardonal constituye un componente crítico para la operación continua de los procesos de eviscerado, fileteado, envasado y transporte interno, abasteciendo más de un centenar de actuadores neumáticos y equipos automatizados. El diagnóstico evidenció deficiencias estructurales y operativas relevantes: acumuladores sin certificación y con corrosión, ausencia de secado y filtración en etapas, pérdidas de presión superiores a lo recomendado, presencia de humedad en la red, fugas significativas y un trazado heterogéneo que no cumple los requisitos de la industria alimentaria. Estas condiciones generan fallas recurrentes en actuadores neumáticos, variabilidad en las presiones de trabajo, mayor consumo energético y costos crecientes de mantenimiento.

Se desarrolló una propuesta de rediseño integral basada en acumuladores certificados ASME, instalación de un secador FD260 VSD, filtración coalescente, purgadores automáticos y una nueva red de distribución en acero inoxidable y aluminio anodizado, configurada en dos anillos para mejorar la estabilidad de presión, reducir pérdidas de carga y asegurar la calidad del aire conforme a ISO 8573-1 y NCh 2861. El diseño se fundamentó en cálculos hidráulicos detallados, análisis de velocidades máximas, estimación de caídas de presión y selección de materiales según ASME B31.3.

La inversión requerida asciende a \$61.451.620, mientras que los ahorros anuales proyectados alcanzan aproximadamente \$15,3 millones, derivados de la reducción de fugas, menor presión de operación, disminución del consumo energético y reducción de fallas en cilindros. El flujo de caja a 10 años arroja un VAN de \$32.621.161, una TIR del 21% y un periodo de recuperación simple cercano a cuatro años. El análisis de sensibilidad confirma la viabilidad económica del proyecto incluso en escenarios conservadores.

En términos técnicos y económicos, la propuesta es completamente viable. El rediseño mejora la confiabilidad del sistema neumático, garantiza la calidad del aire para procesos alimentarios, reduce costos operativos y contribuye a la eficiencia energética de la planta, disminuyendo el costo total de propiedad en un 16,6% respecto del sistema actual. El proyecto constituye una solución sólida para asegurar la continuidad operativa y el desempeño sustentable de la instalación.

1. Problema de investigación

El aire comprimido se ha consolidado desde mediados del siglo XX como una de las fuentes de energía industrial más utilizadas a nivel global, dada su versatilidad, seguridad operativa y capacidad para accionar equipos en ambientes húmedos y exigentes donde otras tecnologías, como la eléctrica o hidráulica, presentan limitaciones relevantes (Stewart, 2010; Stephan & Stoessel, 2019). En Chile, su introducción ocurrió inicialmente en sectores intensivos como la minería durante los procesos de mecanización de los años sesenta, extendiéndose posteriormente a manufactura, alimentos, acuicultura y logística, donde se convirtió en un recurso esencial para la automatización y la continuidad operativa (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2022). En la industria de procesamiento de alimentos, su importancia es aún mayor, pues se emplea para accionar actuadores neumáticos, compuertas, manipuladores, elevadores, sistemas de eviscerado, máquinas de fileteado y equipos de envasado, todos los cuales requieren presiones estables, ausencia de humedad, filtración adecuada y un nivel de pureza compatible con estándares de inocuidad como ISO 8573-1 y NCh 2861 (ISO, 2010; INN, 2020).

En este contexto, el diagnóstico técnico realizado en AquaChile Planta Cardonal, evidencia un conjunto de deficiencias que comprometen la continuidad y eficiencia del proceso productivo. Entre los problemas identificados destacan: estanques acumuladores con corrosión avanzada y sin certificación ASME; ausencia de un sistema adecuado de secado y filtración en etapas; presencia de condensado en líneas principales; variaciones significativas de presión durante las horas de mayor demanda; pérdida aproximada del 20% del aire comprimido por fugas; incompatibilidad de parte de la red de tuberías con requisitos sanitarios; y fallas recurrentes en cilindros neumáticos asociadas al ingreso de humedad y partículas. Estas condiciones generan ineficiencias energéticas, incrementan el riesgo de detenciones no

programadas y elevan los costos operacionales debido a reemplazos frecuentes de componentes neumáticos y pérdidas por menor disponibilidad productiva.

La relevancia del problema se intensifica en un escenario de aumentos sostenidos en los costos de energía eléctrica en Chile (CNE, 2024), junto con exigencias regulatorias más estrictas en seguridad, mantenimiento y calidad del aire destinado a procesos alimentarios (MINSAL DS N°977/1996; DS N°10/2012). Frente a ello, surge la necesidad de determinar qué alternativa de rediseño del sistema de aire comprimido permite resolver las deficiencias detectadas y garantizar un suministro confiable, eficiente y conforme a los estándares normativos aplicables. En este sentido, el problema de investigación plantea interrogantes fundamentales: cuáles son las fallas técnicas, operacionales y normativas que actualmente afectan al sistema neumático de la planta y cómo estas influyen en la continuidad del proceso productivo; qué configuración de red, tratamiento de aire, acumulación y distribución permitiría cumplir los requerimientos de presión, caudal y pureza exigidos por la industria; qué alternativa de rediseño es técnica y económicamente más viable considerando inversión, operación, eficiencia energética, costos de mantenimiento y costo del ciclo de vida; y en qué medida un nuevo sistema permitiría reducir el consumo energético, las fugas, las fallas de actuadores y los costos operacionales respecto de la situación actual.

En consecuencia, el problema de investigación se orienta a identificar y evaluar integralmente el rediseño óptimo del sistema de aire comprimido de la Planta Cardonal, atendiendo a criterios de confiabilidad, eficiencia energética, cumplimiento normativo y viabilidad económica de largo plazo, con el fin de asegurar un abastecimiento neumático compatible con los requerimientos productivos y sanitarios de la industria

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la prefactibilidad técnico-económica del rediseño del sistema de aire comprimido de la Planta Cardonal de AquaChile, con el fin de mejorar su eficiencia energética, confiabilidad operativa y cumplimiento normativo, aplicando criterios de diseño industrial, seguridad y análisis del costo del ciclo de vida (LCC).

2.2 Objetivos Específicos

1. Diagnosticar técnica y energéticamente el sistema de aire comprimido actual de la Planta Cardonal, identificando sus principales deficiencias estructurales, operativas y normativas, mediante levantamiento en terreno, mediciones y análisis de desempeño conforme a ISO 11011:2013.
2. Diseñar y dimensionar una alternativa de mejora integral del sistema incluyendo compresores, estanques, filtración, secado, válvulas de seguridad, distribución de piping e instrumentación que cumpla con los estándares técnicos establecidos en ASME B31.3, ISO 8573-1:2010 y las normativas nacionales de seguridad e inocuidad alimentaria (NCh 2861/2020).
3. Evaluar económicamente la alternativa propuesta mediante un análisis de costo del ciclo de vida (LCC), considerando la inversión inicial (CAPEX), los costos operacionales y de mantenimiento (OPEX), el ahorro energético proyectado y los

indicadores financieros de rentabilidad (VAN, TIR y período de recuperación), con el propósito de determinar la factibilidad y sostenibilidad a largo plazo.

3. Marco Teórico

3.1 Historia y evolución de los sistemas neumáticos industriales

El desarrollo de los sistemas neumáticos industriales tiene su origen en la utilización del aire comprimido como fuente de energía y control en procesos productivos. Su historia se remonta a la Antigüedad, cuando civilizaciones como la griega y la romana ya empleaban el aire para generar movimiento en órganos hidráulicos y mecanismos de ventilación. Sin embargo, el uso del aire comprimido con fines industriales comenzó a consolidarse durante la Revolución Industrial del siglo XIX, en conjunto con los avances en metalurgia y la invención de compresores mecánicos capaces de generar presiones controladas (Keller, 2018).

Durante el siglo XIX, el aire comprimido se utilizó principalmente en minería y transporte subterráneo, destacando la red neumática de París de 1879, que distribuyó aire comprimido para accionar relojes y maquinaria. Este hito marcó el inicio de los sistemas de distribución centralizados y del diseño de redes de aire similares a las actuales (Stephan & Stoessel, 2019). En la primera mitad del siglo XX, el desarrollo de válvulas, actuadores y compresores de desplazamiento positivo permitió la expansión de la automatización neumática en sectores industriales como manufactura, ensamblaje y procesamiento de alimentos.

Con la llegada de la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de sistemas confiables y ligeros impulsó la investigación en control neumático, dando origen a los primeros sistemas lógicos neumáticos y posteriormente a la integración con controles eléctricos. En las décadas de 1960 y 1970, el avance de la electrónica permitió la combinación de tecnologías neumáticas e hidráulicas con sistemas de control electrónico (electroneumática), lo que mejoró la precisión y eficiencia de las operaciones (Bolton, 2021).

Desde finales del siglo XX hasta la actualidad, los sistemas neumáticos han evolucionado hacia configuraciones inteligentes, integradas con sensores, PLC y sistemas

SCADA, capaces de monitorear presión, caudal y consumo energético en tiempo real. Este avance ha sido impulsado por la necesidad de mejorar la eficiencia energética, reducir pérdidas por fugas y cumplir con normativas ambientales y sanitarias cada vez más exigentes, especialmente en la industria alimentaria (European Compressed Air Society 2020).

Hoy, la neumática industrial se encuentra estrechamente vinculada con los conceptos de Industria 4.0, donde la conectividad, la digitalización y el mantenimiento predictivo permiten optimizar los sistemas de aire comprimido en función de indicadores de desempeño energético (EnPI) y del costo del ciclo de vida. En consecuencia, la neumática moderna no solo se considera una tecnología de accionamiento, sino un componente estratégico de la eficiencia operativa y la sostenibilidad industrial (ISO, 2019).

3.2 Principios de generación, distribución y uso del aire comprimido

El aire comprimido es una de las formas de energía más utilizadas en la industria debido a su versatilidad, seguridad y facilidad de almacenamiento. Su principio fundamental consiste en la conversión de energía mecánica en energía potencial mediante la compresión del aire atmosférico, proceso en el cual el volumen disminuye y la presión aumenta. Esta energía se almacena en estanques acumuladores y se distribuye a través de una red de tuberías hacia los puntos de consumo, donde se transforma nuevamente en energía mecánica o de control para accionar herramientas, válvulas, actuadores y equipos automatizados (Stephan & Stoessel, 2019).

El proceso de generación comienza con el compresor, dispositivo que aspira aire del ambiente y lo comprime hasta una presión útil, generalmente entre 6 y 10 bar en sistemas industriales. Existen distintos tipos de compresores: de desplazamiento positivo (pistón, tornillo, paletas) y dinámicos (centrífugos, axiales) cuya selección depende del caudal, presión y perfil

de demanda requerido (Keller, 2018). Durante la compresión, el aire se calienta y se contamina con vapor de agua, aceite y partículas sólidas, lo que hace indispensable un tratamiento posterior mediante enfriadores, separadores de condensado, secadores y filtros para asegurar la calidad del aire según la norma ISO 8573-1.

La generación también incluye la etapa de almacenamiento en estanques acumuladores, los cuales permiten estabilizar la presión del sistema, compensar picos de demanda y reducir los ciclos de arranque del compresor. Su dimensionamiento debe considerar el volumen de aire requerido, la variación de presión admisible y los tiempos de carga y descarga, conforme a los criterios de seguridad establecidos en ASME Sección VIII (ASME, 2021).

Una vez tratado, el aire se conduce a través de una red de distribución compuesta por tuberías, válvulas, conexiones y puntos de consumo. El diseño de esta red debe minimizar pérdidas de carga y garantizar una distribución uniforme de presión. Las configuraciones más utilizadas son en anillo cerrado, que permite flujo bidireccional y mejor estabilidad, y en línea ramificada, adecuada para instalaciones simples o de baja extensión. El material de las tuberías puede variar entre acero galvanizado, aluminio, cobre o polímeros técnicos, seleccionados según la presión de trabajo, temperatura y requisitos de higiene del proceso (Mohan & Raghavan, 2020).

Para asegurar un funcionamiento eficiente, se deben incorporar válvulas de purga en los puntos bajos, pendientes controladas para el drenaje de condensados y ramales descendentes hacia los equipos, evitando que el agua o el aceite retornen a la línea principal. Además, los medidores de caudal, presión y consumo energético permiten monitorear el desempeño del sistema y detectar fugas o caídas de presión anormales.

El aire comprimido se emplea principalmente en tres funciones: energía de

accionamiento, control de procesos y transporte de materiales. En la primera, alimenta cilindros, herramientas neumáticas y sistemas de empaquetado; en la segunda, opera válvulas y dispositivos de control; y en la tercera, se utiliza en sistemas de transporte neumático o limpieza. En la industria alimentaria, el aire debe cumplir con estándares de pureza que eviten contaminación del producto, según lo establecido en ISO 8573-1 y NCh 2861/2020 (INN, 2020).

La eficiencia en el uso del aire comprimido depende de un control adecuado de la demanda, la eliminación de fugas y la regulación de la presión de trabajo. Cada reducción de 1 bar en la presión de suministro puede representar un ahorro energético cercano al 7%, por lo que la optimización de los parámetros operacionales constituye un factor clave de sostenibilidad y competitividad industrial (ISO, 2019).

3.3 Componentes de un sistema de aire comprimido

Un sistema de aire comprimido industrial está compuesto por una serie de elementos interconectados cuyo funcionamiento coordinado permite generar, almacenar, tratar, distribuir y utilizar el aire como fuente de energía y control. La configuración de estos componentes debe garantizar un suministro continuo, seguro y eficiente, adaptado a las necesidades de presión, caudal y pureza exigidas por el proceso productivo. En términos generales, el sistema se inicia con el compresor, encargado de elevar la presión del aire atmosférico; continúa con los estanques acumuladores, que actúan como reserva energética y estabilizadores de presión; y posteriormente incorpora los equipos de tratamiento del aire, como secadores, filtros y separadores de condensado, esenciales para eliminar impurezas y humedad. La red de distribución y diseño de piping constituye el medio de transporte del aire comprimido hacia los puntos de consumo, siendo determinante el material, la geometría y las pérdidas de carga admisibles en el diseño. Finalmente, la instrumentación, control y monitoreo mediante sensores,

válvulas, PLC y sistemas SCADA permiten supervisar el desempeño del sistema, optimizar la eficiencia energética y mantener las condiciones operativas dentro de los rangos de seguridad establecidos por las normas internacionales ISO 8573, ISO 4414 y ASME B31.3 (ISO, 2019; ASME, 2021; Stephan & Stoessel, 2019).

3.3.1 Compresores: tipos, funcionamiento, eficiencia y seguridad

El compresor constituye el componente principal de un sistema de aire comprimido, ya que es responsable de transformar la energía mecánica en energía potencial al elevar la presión del aire atmosférico. Su principio de funcionamiento se basa en la reducción del volumen del aire, generando un incremento de presión que lo convierte en un medio capaz de accionar herramientas, válvulas o equipos automatizados. En términos industriales, la selección del compresor depende de factores como el caudal requerido, la presión de trabajo, la variabilidad de la demanda y la eficiencia energética global del sistema (Keller, 2018).

Los compresores se clasifican principalmente en dos categorías: de desplazamiento positivo y dinámicos. Los primeros incluyen los compresores de pistón, tornillo y paletas, que funcionan mediante la reducción física del volumen de una cámara confinada. El compresor de pistón es adecuado para presiones elevadas y demandas intermitentes, mientras que el de tornillo rotativo, al ofrecer un flujo continuo y estable, es el más utilizado en plantas industriales modernas. Los compresores dinámicos, como los centrífugos y axiales, incrementan la presión del aire mediante la transferencia de energía cinética a través de impulsores rotativos, siendo recomendables para grandes caudales y aplicaciones de demanda constante (Stephan & Stoessel, 2019).

En cuanto a la eficiencia energética, este componente representa entre un 10 % y 30 % del consumo eléctrico total de una planta industrial, por lo que su rendimiento es crítico para la

sostenibilidad operativa. La eficiencia puede optimizarse mediante el uso de variadores de frecuencia (VFD), sistemas de secuenciación inteligente de compresores y mantenimiento predictivo basado en sensores de presión, temperatura y vibración. Asimismo, una correcta selección del punto de operación, combinada con un control adecuado de la presión de descarga y un dimensionamiento apropiado del estanque acumulador, permite reducir significativamente el consumo específico de energía (ISO, 2019).

Desde el punto de vista de la seguridad, los compresores deben cumplir con las disposiciones del código ASME BPVC Sección VIII y la norma ISO 4414, que establecen requisitos relativos a la integridad mecánica, válvulas de alivio, dispositivos de control de temperatura y mantenimiento preventivo. Es fundamental considerar la correcta ventilación del área de instalación, la protección contra sobrepresión, la eliminación de condensados y el aislamiento acústico, ya que el aire comprimido, si no se gestiona adecuadamente, puede generar riesgos asociados a proyecciones, ruido, sobrecalentamiento o explosión del recipiente de presión (ASME, 2021; ISO, 2010).

En síntesis, el compresor no solo es el generador del aire comprimido, sino también el punto de partida para la eficiencia y seguridad del sistema neumático. Su desempeño impacta directamente en los costos operacionales, la disponibilidad de los equipos y la calidad del aire suministrado, por lo que su selección y mantenimiento deben basarse en criterios técnicos, normativos y energéticos bien definidos.

3.3.2 Estanques acumuladores: dimensionamiento, normativa y seguridad

Los estanques acumuladores, también denominados depósitos o receptores de aire comprimido, cumplen un rol esencial dentro del sistema neumático, ya que permiten almacenar

aire comprimido, amortiguar variaciones de presión y reducir la frecuencia de arranque del compresor. Su función es actuar como un pulmón del sistema, estabilizando el flujo de aire ante fluctuaciones de demanda y asegurando un suministro continuo y homogéneo hacia la red de distribución. Además, contribuyen a mejorar la eficiencia energética al permitir que el compresor opere en condiciones más estables y cercanas a su punto óptimo de rendimiento (Stephan & Stoessel, 2019).

El dimensionamiento del estanque acumulador depende de diversos factores operativos: el caudal promedio y máximo del sistema, la presión de trabajo, el tipo de compresor y la variación de presión admisible. De manera general, el volumen del estanque V puede estimarse mediante la expresión:

$$V = \frac{Q \times t \times (P_1 - P_2)}{P_2 \times P_0}$$

Donde Q es el caudal de consumo [m³/min], t es el tiempo de autonomía deseado [min], P_1 la presión máxima de carga, P_2 la mínima de descarga y P_0 la presión atmosférica (Keller, 2018). En aplicaciones industriales típicas, se recomienda un volumen de estanque equivalente al 10–20 % del caudal del compresor en un minuto, aunque esta relación puede variar según el régimen de operación. Asimismo, es habitual la instalación de más de un acumulador, especialmente en redes extensas o con puntos de consumo distantes, para estabilizar presiones locales y reducir pérdidas de carga.

En cuanto a la normativa técnica, los estanques acumuladores se consideran recipientes a presión, por lo que deben diseñarse, fabricarse y probarse conforme al ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sección VIII, que regula espesores, materiales, procedimientos de soldadura, pruebas hidrostáticas y dispositivos de seguridad

Respecto a la seguridad operativa, los estanques deben incorporar válvulas de seguridad calibradas, manómetros de lectura directa, drenajes automáticos o manuales de condensado, y válvulas de cierre rápido que permitan su aislamiento. Deben situarse en áreas ventiladas, sobre fundaciones firmes y alejadas de fuentes de calor o impacto mecánico. Además, se recomienda realizar inspecciones periódicas internas y externas para verificar corrosión, fisuras o deformaciones, registrando los resultados en un plan de mantenimiento documentado conforme a la norma ISO 45001:2018.

3.3.3 Tratamiento del aire: secadores, filtros y separadores de condensado

El tratamiento del aire comprimido constituye una etapa esencial para garantizar la calidad, fiabilidad y seguridad de los sistemas neumáticos industriales. El aire atmosférico aspirado por el compresor contiene contaminantes tales como partículas sólidas, vapor de agua, aceite y microorganismos, los cuales se concentran durante la compresión. Si no se eliminan adecuadamente, estos contaminantes pueden provocar corrosión en las tuberías, fallas en los equipos neumáticos, bloqueo de válvulas y actuadores y, en la industria alimentaria, riesgo de contaminación del producto final. Por esta razón, el tratamiento del aire debe ajustarse a los niveles de pureza definidos por la norma ISO 8573-1, la cual clasifica el aire comprimido según su contenido máximo permitido de partículas, agua y aceite (ISO, 2010).

El sistema de tratamiento se compone principalmente de secadores, filtros y separadores de condensado, dispuestos en secuencia para eliminar progresivamente cada tipo de contaminante.

- **Secadores de aire**

Los secadores reducen la humedad presente en el aire comprimido para evitar

condensación dentro de la red. Los más comunes son los secadores por refrigeración, que enfrían el aire hasta condensar el vapor de agua, alcanzando puntos de rocío entre +2 y +5 °C, y los secadores por adsorción, que utilizan materiales desecantes (como alúmina o tamices moleculares) capaces de retener la humedad a niveles mucho más bajos (punto de rocío hasta -40 °C). En aplicaciones donde se requiere alta pureza, por ejemplo, procesos alimentarios o farmacéuticos, se prefieren secadores de adsorción regenerables o combinados (Stephan & Stoessel, 2019).

- **Filtros de aire**

Los filtros se instalan para eliminar partículas sólidas y aerosoles de aceite en distintas etapas del sistema. Los filtros coalescentes eliminan gotas y vapores de aceite mediante la unión de partículas finas en una malla filtrante, mientras que los filtros de partículas retienen polvo y óxidos provenientes de la red. La eficiencia de los filtros se expresa mediante su grado de retención (en micras) y su capacidad de caudal. Para aplicaciones de aire de proceso o contacto con alimentos, se exige filtración final con eficiencia mínima de 99,999 % a 0,01 µm, conforme a las recomendaciones de ISO 8573-2 y 8573-4 (ISO, 2010).

- **Separadores de condensado**

Los separadores de condensado eliminan automáticamente la mezcla de agua, aceite y partículas acumuladas en los puntos bajos del sistema o en la salida de los secadores. El drenaje debe realizarse mediante válvulas automáticas de purga temporizadas o sensibles al nivel, evitando pérdidas de aire. El condensado obtenido se considera un residuo peligroso por su contenido de hidrocarburos y debe gestionarse conforme al Decreto Supremo N°148/2003 del Ministerio de Salud, que regula el manejo de residuos industriales peligrosos en Chile (MINSAL, 2003).

El diseño del sistema de tratamiento debe contemplar la disposición adecuada de estos equipos, la pérdida de carga acumulada y el mantenimiento periódico para conservar la eficiencia del sistema. Un aire comprimido correctamente tratado no solo prolonga la vida útil de los equipos neumáticos, sino que también garantiza el cumplimiento de los estándares de seguridad alimentaria, sanitaria y ambiental, esenciales para la operación de plantas de procesamiento de alimentos como AquaChile.

3.3.4 Red de distribución y diseño de piping: materiales, pérdidas de carga y disposición de anillos

La red de distribución constituye el sistema circulatorio del aire comprimido, encargado de transportar el flujo desde los compresores y estanques acumuladores hasta los puntos de consumo. Su diseño debe garantizar un suministro estable de presión y caudal, minimizar las pérdidas energéticas y asegurar la calidad del aire en todas las etapas del proceso. En sistemas industriales complejos, como los de procesamiento de alimentos, una red correctamente dimensionada y mantenida es determinante para la eficiencia operativa, la seguridad y el cumplimiento de los requisitos sanitarios (Stephan & Stoessel, 2019).

- **Materiales de tuberías y conexiones**

La selección del material de las tuberías depende de factores como la presión de trabajo, la temperatura del aire, las condiciones ambientales y las exigencias de higiene. Tradicionalmente, se ha empleado acero negro o galvanizado, aunque presentan desventajas por corrosión interna y generación de óxidos. En la actualidad, los materiales más recomendados son el aluminio anodizado, el acero inoxidable y los polímeros técnicos (como el polietileno reticulado o el nylon reforzado), debido a su ligereza, resistencia a la corrosión, facilidad de montaje y compatibilidad con la industria alimentaria. Las uniones deben ser herméticas y

desmontables, utilizando racores rápidos o conexiones con anillos de sellado compatibles con aire comprimido. En el caso de plantas que manipulan alimentos, la normativa NCh 2861/2020 y la ISO 8573-1 exigen materiales no contaminantes y fácilmente sanitizables (INN, 2020; ISO, 2010).

- **Pérdidas de carga y eficiencia hidráulica**

Las pérdidas de carga representan la caída de presión que se produce por la fricción del aire con las paredes internas de la tubería, codos, válvulas y accesorios. Estas pérdidas afectan directamente el rendimiento energético del sistema, ya que cada bar de presión adicional requerido en el compresor para compensarlas implica un aumento del consumo eléctrico cercano al 7 % (ISO, 2019). El dimensionamiento de las líneas debe realizarse de modo que la pérdida total no supere 0,1 bar entre el compresor y el punto más alejado.

La estimación de pérdidas se calcula mediante la ecuación de Darcy–Weisbach o por tablas empíricas de flujo, considerando el diámetro interno, la longitud equivalente y el caudal de aire. Para mejorar la eficiencia, se recomienda mantener velocidades de flujo entre 6 y 10 m/s en las líneas principales y no exceder 15 m/s en ramales secundarios. Además, es fundamental diseñar la red con pendientes del 1–2 % hacia los puntos de purga, permitiendo la evacuación de condensados sin interrumpir el flujo.

- **Disposición de anillos y configuración de la red**

Las configuraciones más comunes de distribución son lineales, en anillo cerrado y ramificadas. La disposición en anillo cerrado es la más eficiente, ya que permite que el aire fluya en ambos sentidos, equilibrando la presión en toda la red y reduciendo las caídas locales. Esta disposición también facilita el mantenimiento, pues los ramales pueden aislarse sin interrumpir el suministro general. En contraste, las redes lineales o ramificadas presentan mayores caídas

de presión y menor flexibilidad operativa, por lo que solo se recomiendan en instalaciones pequeñas o temporales (Mohan & Raghavan, 2020).

El diseño debe incorporar válvulas de seccionamiento, puntos de drenaje automáticos, reguladores de presión locales y ramales descendentes en los puntos de conexión de equipos, evitando acumulación de condensados. Asimismo, la instrumentación mediante caudalímetros y manómetros digitales distribuidos estratégicamente permite monitorear el rendimiento y detectar fugas o desequilibrios.

3.3.5 Instrumentación, control y monitoreo: sensores, válvulas, PLC, SCADA

La instrumentación y el control en sistemas de aire comprimido constituyen elementos esenciales para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la trazabilidad del proceso. Un sistema neumático moderno no solo debe generar y distribuir aire, sino también medir, registrar y controlar en tiempo real las variables críticas que afectan su desempeño, tales como presión, caudal, temperatura, humedad y consumo energético. La integración de sensores inteligentes, controladores programables y plataformas de supervisión SCADA permite optimizar la gestión del sistema bajo un enfoque de Industria 4.0, favoreciendo la eficiencia energética y el mantenimiento predictivo (Bolton, 2021).

- **Sensores y medición de variables**

Los sensores son dispositivos encargados de registrar los parámetros físicos del sistema y transformarlos en señales eléctricas para su procesamiento. Entre los más utilizados se encuentran:

Sensores de presión: de tipo piezorresistivo o capacitivo, empleados para monitorear la

presión en líneas principales y ramales, garantizando la estabilidad del suministro.

Caudalímetros: miden el volumen o masa de aire comprimido consumido; los modelos térmicos y de efecto Coriolis permiten gran precisión en caudales variables.

Sensores de temperatura y humedad: utilizados en la etapa de tratamiento del aire para verificar la eficiencia de los secadores y controlar el punto de rocío.

Analizadores de consumo energético: permiten calcular el rendimiento del sistema y estimar el índice específico de energía (kWh/Nm^3), indicador clave según ISO 11011 (ISO, 2019).

- **Válvulas y actuadores de control**

Las válvulas constituyen los elementos de mando que regulan el flujo de aire dentro del sistema. Se clasifican en válvulas de control direccional, reguladoras de presión, antirretorno y de purga automática. En conjunto con los actuadores, permiten controlar la secuencia y velocidad de movimiento en equipos neumáticos. Su operación puede ser manual, neumática o eléctrica, siendo cada vez más frecuente el uso de válvulas electroneumáticas con retroalimentación de posición, las cuales permiten un control proporcional de la presión y el caudal (Stephan & Stoessel, 2019).

- **PLC y automatización del sistema**

El Controlador Lógico Programable (PLC) constituye el núcleo de la automatización. Este dispositivo recibe las señales provenientes de sensores, ejecuta rutinas de control programadas y envía órdenes a las válvulas o actuadores. Los PLC permiten implementar estrategias de control como el secuenciamiento automático de compresores, el control de presión en cascada y la detección de fugas. Asimismo, los sistemas modernos integran módulos de

comunicación que permiten la conexión con plataformas de supervisión o con sistemas de gestión energética (Keller, 2018).

- **Supervisión SCADA y monitoreo inteligente**

El sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) permite la supervisión global del sistema de aire comprimido, integrando los datos de todos los sensores y controladores en una interfaz gráfica centralizada. Desde esta plataforma se pueden visualizar tendencias históricas, alarmas, consumos instantáneos y estados de equipos, facilitando la toma de decisiones y el mantenimiento basado en condición. Los sistemas SCADA actuales, conectados a redes industriales o en la nube, posibilitan además la implementación de mantenimiento predictivo mediante algoritmos de análisis de datos y Machine Learning (ISO, 2019).

La correcta instrumentación y el control integral del sistema permiten reducir pérdidas de aire, optimizar la eficiencia energética y prevenir fallas críticas. En contextos como la industria alimentaria, donde la estabilidad de presión y la calidad del aire son variables críticas, la integración de estos sistemas garantiza el cumplimiento de las normas de seguridad (ISO 4414) y de gestión de energía (ISO 50001), alineando la operación con los objetivos de sostenibilidad y confiabilidad industrial.

3.4 Fundamentos de eficiencia energética en aire comprimido

El aire comprimido es una de las fuentes de energía más costosas dentro de la industria, ya que su generación puede representar entre el 10 % y el 30 % del consumo eléctrico total de una planta (ISO, 2019). Por esta razón, la eficiencia energética constituye un eje central en el diseño, operación y mantenimiento de los sistemas neumáticos. La optimización del rendimiento

no solo implica reducir el consumo eléctrico de los compresores, sino también minimizar las pérdidas energéticas, monitorear los indicadores de desempeño y gestionar inteligentemente la demanda del sistema. Las fugas, las caídas de presión y la sobrepresión son las principales causas de ineficiencia, mientras que el uso de indicadores normalizados —como el EnPI (Energy Performance Indicator) y el SEC (Specific Energy Consumption)— permite evaluar de manera cuantitativa el comportamiento energético del sistema. Asimismo, las estrategias de control de demanda, como la secuenciación de compresores y el almacenamiento intermedio, son fundamentales para adaptar la producción de aire comprimido a los requerimientos reales de la planta, reduciendo el desperdicio de energía y los costos operacionales.

3.4.1 Pérdidas energéticas: fugas, caídas de presión y sobrepresión

Las pérdidas energéticas en los sistemas de aire comprimido representan una de las principales causas de ineficiencia industrial, afectando directamente los costos operativos y el desempeño del sistema. Estas pérdidas se manifiestan principalmente en tres formas: fugas de aire, caídas de presión y sobrepresión, todas asociadas a un uso ineficiente de la energía suministrada por los compresores (Keller, 2018).

Las fugas de aire constituyen la pérdida más común y costosa. En promedio, entre un 20 % y un 30 % del aire comprimido producido se pierde por escapes en un sistema mal mantenido (ISO, 2019). Las fugas pueden producirse en uniones, válvulas, racores, mangueras o equipos desconectados, generando un consumo continuo incluso cuando no existe demanda. Esta pérdida obliga al compresor a operar durante más tiempo, incrementando el consumo eléctrico y el desgaste mecánico. La detección y reparación de fugas mediante equipos ultrasónicos o monitoreo continuo puede reducir el consumo energético hasta en un 10 %, lo que convierte esta práctica en una medida prioritaria de eficiencia (Stephan & Stoessel, 2019).

Las caídas de presión, en tanto, ocurren por fricción en las tuberías, accesorios o elementos de tratamiento del aire. Cada 1 bar de pérdida de presión equivale aproximadamente a un aumento del 7 % en el consumo de energía eléctrica del compresor, al requerir mayor presión de descarga para compensar la pérdida en la red (ISO, 2019). Un diseño adecuado del sistema que contemple tuberías de diámetro apropiado, trayectos cortos, uniones herméticas y mantenimiento periódico de filtros permite minimizar este tipo de pérdidas.

Por último, la sobrepresión ocurre cuando el sistema opera a una presión superior a la requerida por los equipos finales. Este exceso de presión incrementa innecesariamente el consumo energético, acelera el desgaste de los componentes y aumenta el riesgo de fugas. En la mayoría de los casos, una reducción de 1 bar en la presión de trabajo puede traducirse en un ahorro energético del 6–8 %, sin afectar la productividad (Mohan & Raghavan, 2020). La instalación de reguladores de presión, válvulas de control y estrategias de secuenciación de compresores son medidas efectivas para evitar esta condición.

3.4.2 Indicadores de desempeño energético (kWh/Nm³, EnPI, SEC)

La evaluación del desempeño energético en sistemas de aire comprimido se basa en indicadores que permiten cuantificar la relación entre la energía consumida y la cantidad de aire útil generado o aprovechado. Estos indicadores constituyen herramientas esenciales para el control operacional, la comparación entre periodos y la implementación de medidas de eficiencia conforme a la norma ISO 11011:2019.

El consumo específico de energía (kWh/Nm³) es el indicador más utilizado y se define como la cantidad de energía eléctrica requerida para producir un metro cúbico normalizado de aire comprimido. Este valor depende de la eficiencia del compresor, las condiciones de operación, la pureza del aire y el nivel de pérdidas del sistema. Valores de referencia típicos en

sistemas industriales eficientes se sitúan entre 0,10 y 0,13 kWh/Nm³, aunque pueden variar según la presión de trabajo y el tipo de compresor (ISO, 2019).

El Indicador de Desempeño Energético (EnPI, Energy Performance Indicator) expresa el comportamiento energético del sistema respecto de una línea base establecida. Se calcula como la razón entre el consumo real de energía y el consumo de referencia ajustado por variables relevantes (como caudal, horas de operación o condiciones ambientales). Un valor EnPI inferior a 1 indica una mejora del desempeño energético, mientras que valores superiores reflejan un deterioro del rendimiento (International Energy Agency [IEA], 2020).

El SEC (Specific Energy Consumption), o consumo energético específico, es un indicador complementario que relaciona la energía total consumida por el sistema con la producción o actividad industrial asociada, expresado en unidades de energía por producto final (por ejemplo, kWh/kg de producto procesado). Este parámetro permite integrar la gestión del aire comprimido dentro del análisis energético global de la planta, facilitando la toma de decisiones en programas de eficiencia y sostenibilidad (Keller, 2018).

3.4.3 Estrategias de control de demanda (secuenciación y almacenamiento intermedio)

El control de la demanda en sistemas de aire comprimido tiene como objetivo ajustar la generación y el suministro de aire a los requerimientos reales de consumo, evitando el funcionamiento innecesario de compresores y reduciendo los costos energéticos. Las estrategias de gestión más utilizadas son la secuenciación de compresores y el almacenamiento intermedio, ambas alineadas con los lineamientos de eficiencia energética establecidos en la norma ISO 11011:2019.

La secuenciación de compresores consiste en la coordinación automática del

funcionamiento de múltiples unidades para satisfacer la demanda con la menor cantidad de equipos en operación. Este control se realiza mediante sistemas electrónicos o PLC que priorizan el uso de los compresores más eficientes, manteniendo los de reserva en estado de espera. Los sistemas de secuenciación modernos utilizan algoritmos que analizan en tiempo real la presión de la red y el caudal requerido, activando o desactivando compresores según curvas de rendimiento predefinidas. Esta estrategia puede generar ahorros energéticos del 15 % al 25 % al evitar ciclos de carga y descarga innecesarios (Stephan & Stoessel, 2019).

El almacenamiento intermedio corresponde a la instalación de estanques adicionales o cámaras pulmón en puntos estratégicos de la red, cuyo propósito es absorber las fluctuaciones de consumo y estabilizar la presión del sistema. Estos depósitos permiten reducir los arranques frecuentes del compresor, mantener una presión constante en los equipos finales y minimizar las pérdidas asociadas a la sobrepresión. La capacidad de almacenamiento se dimensiona considerando el volumen de aire necesario para amortiguar los picos de demanda y la variación de presión admisible, usualmente entre 5 % y 10 % del caudal total del sistema (Keller, 2018).

Ambas estrategias son complementarias: la secuenciación optimiza la operación de los compresores, mientras que el almacenamiento intermedio mejora la estabilidad hidráulica y reduce la exigencia mecánica sobre el sistema. Su implementación coordinada constituye una práctica recomendada en programas de eficiencia energética industrial y gestión inteligente de aire comprimido.

3.5 Calidad del aire y requisitos en la industria alimentaria

En la industria alimentaria, la calidad del aire comprimido es un factor crítico que incide directamente en la inocuidad del producto final y en el cumplimiento de las normativas sanitarias. El aire utilizado puede entrar en contacto directo o indirecto con los alimentos, por

lo que debe cumplir estrictos estándares de pureza definidos por la ISO 8573-1, que clasifica el aire según su contenido máximo de partículas sólidas, agua y aceite. Asimismo, la NCh 2861/2020 establece en Chile los requisitos sanitarios y microbiológicos aplicables al uso de aire comprimido en procesos alimentarios, garantizando que este no constituya una fuente de contaminación. La correcta selección del sistema de tratamiento, el monitoreo continuo y el mantenimiento preventivo son esenciales para asegurar la conformidad con los estándares de calidad exigidos por la legislación nacional e internacional.

3.5.1 ISO 8573-1: clasificación de purezas y contaminantes

La norma ISO 8573-1 establece los parámetros y límites de pureza del aire comprimido mediante una clasificación basada en tres tipos de contaminantes principales: partículas sólidas, contenido de agua y contenido de aceite. Esta norma constituye la referencia internacional para determinar la calidad del aire requerido según el uso industrial o sanitario, garantizando la compatibilidad con los procesos sensibles, como los de la industria alimentaria, farmacéutica o electrónica (ISO, 2010).

La clasificación se organiza en clases de pureza numeradas del 1 al 9, donde el número menor indica una mayor calidad del aire. Para el caso de partículas sólidas, la norma especifica el número máximo permitido por metro cúbico y su tamaño máximo en micras. Por ejemplo, la clase 1 permite un máximo de 20.000 partículas de hasta 0,1 μm , mientras que la clase 6 admite hasta 5.000.000 de partículas de 5 μm . En cuanto al contenido de agua, este se expresa como punto de rocío a presión, variando desde $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (clase 1) hasta $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (clase 6), dependiendo del nivel de secado requerido. Finalmente, el contenido total de aceite —que incluye aerosoles, vapores e hidrocarburos líquidos— se limita desde 0,01 mg/m^3 (clase 1) hasta 5 mg/m^3 (clase 4).

En aplicaciones alimentarias, la selección de la clase de pureza depende del grado de exposición del aire comprimido al producto. Según la British Compressed Air Society (BCAS, 2020), se recomienda clase 1.2.1 o superior para aire en contacto directo con alimentos, y clase 2.4.2 para contacto indirecto o en sistemas de envasado. Para cumplir estos estándares, es indispensable incorporar filtros coalescentes, secadores por adsorción y separadores de aceite, además de realizar muestreos periódicos y ensayos de validación conforme a las partes complementarias de la serie ISO 8573 (ISO 8573-2 a ISO 8573-9).

El cumplimiento de esta norma asegura que el aire comprimido no introduzca contaminantes físicos, químicos ni microbiológicos en la línea de producción, constituyendo un requisito básico para la implementación de Sistemas de Gestión de Inocuidad Alimentaria (ISO 22000) y de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM).

3.5.2 NCh 2861/2020: requisitos sanitarios en procesos alimentarios

La norma chilena NCh 2861/2020, elaborada por el Instituto Nacional de Normalización (INN), establece los requisitos sanitarios y técnicos que debe cumplir el aire comprimido utilizado en procesos alimentarios para prevenir la contaminación física, química o microbiológica de los productos. Esta norma se aplica tanto al aire comprimido que entra en contacto directo con los alimentos, como al que se utiliza en operaciones auxiliares tales como transporte neumático, limpieza de envases o accionamiento de equipos dentro de zonas de proceso (INN, 2020).

El documento especifica que el aire comprimido debe ser limpio, seco y libre de contaminantes. En particular, se prohíbe la presencia de aceites minerales, partículas sólidas, humedad excesiva y microorganismos patógenos. Para ello, el sistema de generación y distribución debe incorporar etapas de filtración, secado y separación de condensados capaces

de alcanzar los niveles de pureza definidos por la ISO 8573-1, debiendo seleccionarse las clases de pureza de acuerdo con el riesgo de contaminación del producto.

La norma exige que las instalaciones se diseñen bajo principios higiénicos, utilizando materiales resistentes a la corrosión, no tóxicos y sanitizables, como acero inoxidable o polímeros certificados para uso alimentario. Además, establece la obligación de implementar procedimientos de mantenimiento preventivo y limpieza, así como registros documentados de inspección y verificación de calidad del aire mediante análisis periódicos. Estos análisis deben incluir la determinación de partículas, humedad, aceite y carga microbiológica, asegurando la trazabilidad de los resultados.

Finalmente, la NCh 2861/2020 dispone que todo sistema de aire comprimido en plantas alimentarias forme parte del Plan de Inocuidad y de las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), conforme a los lineamientos del Reglamento Sanitario de los Alimentos (DS N°977/1996). El cumplimiento de esta norma es fundamental para garantizar que el aire comprimido no constituya una fuente de contaminación y para asegurar la conformidad con las exigencias de la Autoridad Sanitaria y de certificaciones internacionales como ISO 22000 o BRCGS Food Safety.

3.6 Normas y códigos aplicables al diseño, seguridad y eficiencia

El diseño y operación de los sistemas de aire comprimido industrial se rigen por un conjunto de normas técnicas y códigos internacionales que establecen los criterios mínimos de seguridad, eficiencia y confiabilidad. Estas regulaciones abarcan desde el dimensionamiento y fabricación de los equipos sometidos a presión, hasta la evaluación de desempeño energético y la gestión del riesgo operativo. Entre las más relevantes se encuentran el ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sección VIII y el ASME B31.3, que regulan el diseño y

construcción de estanques y tuberías; la ISO 11011, que define las metodologías para auditorías de eficiencia energética en sistemas de aire comprimido; y la ISO 4414, que establece los requisitos generales de seguridad para componentes y circuitos neumáticos. A nivel nacional, el cumplimiento del DS N°10/2012 y del DS N°594/1999 del Ministerio de Salud asegura la protección de los trabajadores y la integridad de las instalaciones bajo presión. Estas normativas en conjunto garantizan la operación segura y eficiente del sistema, promoviendo la conformidad con los estándares internacionales de gestión energética e industrial.

3.6.1 ASME B31.3 y BPVC Sección VIII: diseño de tuberías y estanques a presión

El diseño de los sistemas de aire comprimido que operan bajo presión debe cumplir con los estándares establecidos por la American Society of Mechanical Engineers (ASME), reconocidos internacionalmente por regular la integridad estructural y la seguridad de equipos y redes sometidos a presión. En este contexto, los códigos ASME B31.3 – Process Piping y ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sección VIII – Pressure Vessels constituyen los principales marcos normativos aplicables al diseño, fabricación, inspección y prueba de tuberías y estanques acumuladores utilizados en sistemas neumáticos industriales (ASME, 2021).

El código ASME B31.3 establece los requisitos para el diseño mecánico de tuberías de proceso, incluyendo criterios de presión de trabajo, temperatura, materiales, métodos de unión, pruebas de hermeticidad y tolerancias de fabricación. Este estándar considera factores como la resistencia a la presión interna, las tensiones admisibles del material y la expansión térmica de la línea, garantizando que la red de distribución soporte las condiciones operativas sin riesgo de fuga o falla estructural. Asimismo, exige la aplicación de pruebas hidrostáticas o neumáticas antes de la puesta en servicio, así como la identificación y trazabilidad de los componentes.

Por su parte, la ASME BPVC Sección VIII regula el diseño y construcción de recipientes a presión, categoría bajo la cual se encuentran los estanques acumuladores de aire comprimido. Esta norma define los métodos de cálculo para espesores mínimos, esfuerzos permisibles, soldaduras, tratamientos térmicos y dispositivos de seguridad. También establece la obligación de incorporar válvulas de alivio de presión calibradas, manómetros certificados y drenajes automáticos de condensado, además de requerir la inspección y certificación por un organismo autorizado (Authorized Inspector) previo a su operación.

La aplicación combinada de ambos códigos permite asegurar que los sistemas de aire comprimido cumplan con altos estándares de seguridad, durabilidad y desempeño, minimizando el riesgo de explosión, fuga o colapso estructural. En el caso de Chile, estos lineamientos se complementan con las exigencias del Decreto Supremo N°10/2012 del Ministerio de Salud, que adopta principios equivalentes del ASME para la fiscalización de equipos a presión y su operación en entornos industriales.

3.6.2 ISO 11011 e ISO 50002: auditorías y evaluación energética

Las normas ISO 11011 e ISO 50002 establecen los lineamientos internacionales para la evaluación y auditoría energética de los sistemas de aire comprimido, proporcionando un marco metodológico que permite identificar ineficiencias, cuantificar pérdidas y proponer acciones de mejora basadas en criterios técnicos y económicos. Estas normas son herramientas fundamentales para la implementación de sistemas de gestión de energía (SGE) bajo la ISO 50001, ya que permiten medir y verificar el desempeño energético en instalaciones industriales (ISO, 2019; ISO, 2014).

La ISO 11011:2019 define el procedimiento específico para realizar evaluaciones energéticas en sistemas de aire comprimido, abarcando todo su ciclo funcional: generación,

tratamiento, almacenamiento, distribución y uso final. La norma establece la necesidad de recopilar datos operacionales, medir variables clave (presión, caudal, potencia eléctrica, fugas y punto de rocío) y determinar el consumo específico de energía (kWh/Nm³). Asimismo, exige la elaboración de un perfil de demanda y la identificación de oportunidades de mejora en eficiencia, tales como la reducción de fugas, la optimización de la presión de operación o la modernización de los equipos de compresión. Los resultados deben expresarse en indicadores normalizados, como el EnPI (Energy Performance Indicator), para permitir la comparación entre periodos o instalaciones (ISO, 2019).

Por su parte, la ISO 50002:2014 establece los requisitos generales para la realización de auditorías energéticas aplicables a cualquier tipo de sistema industrial. Esta norma define las etapas de planificación, recolección de datos, análisis técnico y reporte, garantizando que las auditorías se desarrollen bajo un enfoque sistemático y reproducible. Su aplicación en sistemas neumáticos permite integrar los resultados de la evaluación ISO 11011 dentro de una estrategia energética global, facilitando la priorización de inversiones y la verificación de mejoras implementadas.

En conjunto, ambas normas proporcionan una base técnica para la gestión energética continua de los sistemas de aire comprimido, promoviendo la reducción del consumo eléctrico, la mejora del desempeño operacional y la sustentabilidad de los procesos industriales.

3.6.3 ISO 4414: seguridad y control en sistemas neumáticos

La norma ISO 4414:2010 establece los principios generales de diseño, control y seguridad aplicables a los sistemas y componentes neumáticos industriales. Su propósito es prevenir accidentes, fallas operacionales y daños a los equipos mediante la implementación de criterios de seguridad funcional y control confiable del aire comprimido en todo el ciclo de

operación (ISO, 2010).

El documento define los requisitos esenciales de diseño seguro, los cuales incluyen la selección adecuada de materiales, el dimensionamiento conforme a la presión máxima de trabajo, la instalación de dispositivos de alivio y la protección contra sobrepresiones o bloqueos. Asimismo, exige la incorporación de válvulas de corte, antirretorno y de seguridad, junto con dispositivos de purga controlada que permitan descargar la presión residual antes de labores de mantenimiento o intervención.

En materia de control, la norma establece que los sistemas neumáticos deben incorporar medidas de redundancia y monitoreo en los circuitos críticos, especialmente en aquellos que intervienen en operaciones automatizadas o de seguridad funcional. Se recomienda el uso de válvulas bistables, enclavamientos mecánicos y bloqueos neumáticos o eléctricos para evitar movimientos no deseados durante paradas o fallas de energía. Además, se promueve la identificación clara de todas las líneas y componentes mediante códigos y colores normalizados, facilitando la operación y el mantenimiento.

La ISO 4414 también aborda aspectos relativos a la preservación de la energía y control de fugas, destacando la importancia de integrar sistemas de supervisión continua que permitan detectar caídas de presión y prevenir la pérdida de aire comprimido. Este enfoque complementa los objetivos de eficiencia energética definidos por la ISO 11011, vinculando la seguridad operativa con la optimización del desempeño del sistema.

El cumplimiento de esta norma es obligatorio para fabricantes, diseñadores y operadores de equipos neumáticos, y su aplicación en industrias como la alimentaria o farmacéutica asegura que las instalaciones cumplan con los niveles exigidos de seguridad, higiene y confiabilidad operativa, reduciendo los riesgos laborales y las detenciones no programadas.

3.6.4 Legislación chilena en seguridad industrial: DS N°10/2012, DS N°594/1999, DS N°148/2003

La legislación chilena establece un marco normativo específico para la seguridad en la operación de equipos sometidos a presión, las condiciones laborales y el manejo de residuos industriales peligrosos, aplicable a los sistemas de aire comprimido utilizados en entornos industriales. Los decretos DS N°10/2012, DS N°594/1999 y DS N°148/2003, todos del Ministerio de Salud (MINSAL), regulan de forma complementaria la instalación, operación y mantenimiento seguro de estos sistemas, asegurando la protección de las personas y del medio ambiente.

El Decreto Supremo N°10/2012 establece el Reglamento de seguridad para calderas, autoclaves y equipos sometidos a presión. Este documento define los requisitos técnicos y administrativos para el diseño, construcción, inspección, certificación y operación de equipos como estanques acumuladores y compresores. Exige que estos dispositivos sean fabricados bajo estándares internacionales, principalmente ASME BPVC Sección VIII, e inspeccionados periódicamente por organismos autorizados. Además, impone la obligación de mantener registros técnicos y certificados de inspección actualizados, así como de instalar válvulas de alivio y dispositivos de seguridad que eviten sobrepresiones (MINSAL, 2012).

El Decreto Supremo N°594/1999, correspondiente al Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, establece disposiciones generales de higiene, ventilación, control de ruido y exposición a contaminantes. En relación con los sistemas neumáticos, exige que las instalaciones cuenten con protecciones acústicas adecuadas, sistemas de ventilación que eviten la acumulación de calor o aceite, y planes de mantenimiento preventivo que aseguren la integridad de los equipos bajo presión (MINSAL, 1999).

Finalmente, el Decreto Supremo N°148/2003, que aprueba el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos, regula la gestión ambiental de los condensados provenientes del tratamiento del aire comprimido. Dado que estos condensados contienen aceites, hidrocarburos y metales, se clasifican como residuos industriales peligrosos y deben ser almacenados, transportados y dispuestos conforme a las exigencias del reglamento. Esto implica la implementación de sistemas de separación y recolección de condensados y el cumplimiento de las disposiciones sobre etiquetado, almacenamiento temporal y trazabilidad ambiental (MINSAL, 2003).

En conjunto, estos decretos conforman el marco legal que regula la seguridad industrial, sanitaria y ambiental de los sistemas de aire comprimido en Chile, garantizando condiciones operativas seguras y sostenibles, coherentes con los estándares internacionales de ingeniería y gestión ambiental.

3.7 Evaluación económica y análisis del ciclo de vida (LCC)

La evaluación económica y el análisis del ciclo de vida (Life Cycle Cost, LCC) constituyen herramientas fundamentales para la toma de decisiones en el diseño, operación y mantenimiento de sistemas industriales, como los de aire comprimido. Estas metodologías permiten determinar no solo el costo de inversión inicial, sino también los costos de operación, mantenimiento, energía y disposición final, ofreciendo una visión integral del desempeño económico a lo largo de toda la vida útil del sistema. En los sistemas neumáticos, los costos energéticos pueden representar hasta el 70 % del costo total de propiedad, por lo que su análisis resulta determinante para optimizar la rentabilidad y la eficiencia del proceso (Keller, 2018).

El enfoque LCC, regulado por la norma ISO 15686-5:2017, permite comparar alternativas de diseño o renovación en función de su costo total y su impacto en el tiempo,

considerando parámetros financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación (Payback). Este tipo de análisis resulta esencial para justificar inversiones en tecnologías más eficientes, sistemas de control automatizado o mejoras en el tratamiento del aire, al cuantificar sus beneficios económicos frente a los costos de operación y mantenimiento.

De esta manera, el análisis económico y del ciclo de vida no solo orienta las decisiones de inversión, sino que también contribuye a la sostenibilidad técnica y ambiental del sistema, al integrar criterios de eficiencia energética, emisiones indirectas y gestión responsable de recursos.

En el contexto del análisis del ciclo de vida, la literatura especializada ha destacado la relevancia de incorporar los costos asociados a la no confiabilidad (unreliability) dentro de la evaluación económica de activos industriales. Estos costos corresponden a todas aquellas pérdidas derivadas de la incapacidad del sistema para cumplir su función requerida de manera consistente, ya sea por fallas, degradación prematura, variabilidad en el desempeño o interrupciones operacionales no previstas. De acuerdo con Dziaduch (2010), los costos por no confiabilidad representan un componente recurrente del ciclo de vida y deben ser considerados como parte estructural del LCC, dado que pueden manifestarse en forma de reemplazos anticipados, mantenimientos correctivos no planificados, pérdidas de disponibilidad y afectaciones en la continuidad operativa.

En la misma línea, Barberá et al. (2012) sostienen que la no confiabilidad de un sistema genera efectos económicos significativos que exceden el ámbito del mantenimiento directo, incorporando costos por penalización, disminución de la productividad, impacto en la calidad del producto y riesgos asociados al incumplimiento de especificaciones operacionales. Estos elementos, aun cuando no se cuantifiquen de forma exacta, deben integrarse conceptualmente

en el análisis de alternativas, ya que influyen en la competitividad y en la eficiencia global del activo a lo largo de su vida útil.

En consecuencia, el LCC no solo permite evaluar costos directos como la inversión inicial, el consumo energético y el mantenimiento programado, sino que también exige la consideración cualitativa de los costos derivados del riesgo y la ineficiencia operacional. Este enfoque resulta particularmente relevante en sistemas neumáticos, donde la degradación de componentes, la humedad en las líneas, las fluctuaciones de presión y las fallas asociadas al suministro de aire pueden generar pérdidas significativas en disponibilidad y confiabilidad del proceso productivo. Así, la incorporación conceptual de los costos por no confiabilidad en el LCC permite una evaluación más completa del desempeño esperado de las alternativas analizadas y contribuye a decisiones de ingeniería más alineadas con los objetivos económicos y operativos de la organización

3.7.1 Definición de CAPEX, OPEX y Costo Total de Propiedad (TCO)

El análisis económico de un sistema industrial, como el de aire comprimido, requiere distinguir entre los costos asociados a la inversión inicial y aquellos derivados de su operación y mantenimiento a lo largo del tiempo. En este contexto, los conceptos CAPEX, OPEX y Costo Total de Propiedad (TCO) permiten estructurar la evaluación financiera de manera integral, identificando las variables que inciden en la rentabilidad y sostenibilidad del sistema (ISO, 2017).

El CAPEX (Capital Expenditure) corresponde al gasto de capital inicial destinado a la adquisición, instalación y puesta en marcha de los equipos e infraestructura necesarios para el funcionamiento del sistema. En el caso del aire comprimido, incluye la compra de compresores,

estanques acumuladores, secadores, filtros, tuberías, instrumentación y sistemas de control, así como los costos de ingeniería, montaje y certificación técnica (Keller, 2018).

El OPEX (Operational Expenditure) agrupa los costos operativos y de mantenimiento asociados al funcionamiento del sistema durante su vida útil. Comprende principalmente el consumo energético, el mantenimiento preventivo y correctivo, los repuestos, los insumos de tratamiento del aire (filtros y aceites) y los costos de supervisión y monitoreo. En sistemas neumáticos industriales, el OPEX suele superar ampliamente el CAPEX, ya que la energía eléctrica consumida por los compresores representa entre 60 % y 80 % del costo total del ciclo de vida (ISO, 2019).

El Costo Total de Propiedad (TCO, Total Cost of Ownership) integra tanto los costos de inversión (CAPEX) como los de operación (OPEX), incluyendo además los costos indirectos asociados a paradas no programadas, pérdidas por fugas, ineficiencia energética y eventual disposición o renovación del sistema. Este indicador proporciona una visión global del impacto económico real del sistema a lo largo de su vida útil y permite comparar alternativas tecnológicas o estrategias de mejora bajo criterios de costo-beneficio.

La comprensión y aplicación conjunta de estos tres conceptos son esenciales para la toma de decisiones de inversión y para la planificación de mantenimiento y eficiencia energética, orientando los recursos hacia soluciones que reduzcan los costos totales y aumenten la sostenibilidad del sistema.

3.7.2 Indicadores financieros (VAN, TIR, Payback)

Los indicadores financieros permiten evaluar la viabilidad económica de proyectos de inversión asociados al diseño, modernización o mejora de sistemas industriales, incluyendo los

de aire comprimido. Entre los más utilizados se encuentran el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión (Payback), los cuales permiten comparar alternativas considerando los flujos de caja proyectados, la vida útil del sistema y el costo del capital (Ross, Westerfield & Jaffe, 2019).

El Valor Actual Neto (VAN) representa la diferencia entre el valor presente de los flujos de caja futuros generados por un proyecto y el monto de la inversión inicial. Se calcula mediante la fórmula:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0$$

Donde F_t corresponde al flujo neto de caja en el periodo t , r es la tasa de descuento y I_0 la inversión inicial. Un VAN positivo indica que el proyecto genera beneficios económicos superiores al costo del capital, siendo considerado financieramente viable (Gitman & Zutter, 2015).

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de descuento que iguala el VAN a cero. Expresa el rendimiento porcentual esperado del proyecto, y se acepta la inversión cuando la TIR es mayor que la tasa mínima de rentabilidad exigida o el costo de oportunidad del capital. En proyectos de eficiencia energética, como la incorporación de sistemas de control o secuenciación de compresores, la TIR suele superar ampliamente los umbrales mínimos debido a los ahorros sostenidos en consumo eléctrico (ISO, 2019).

El Período de Recuperación (Payback) corresponde al tiempo requerido para recuperar la inversión inicial a partir de los flujos netos de caja positivos generados por el proyecto. Si bien no considera el valor del dinero en el tiempo, su simplicidad lo convierte en un indicador útil para decisiones operativas o inversiones de bajo riesgo. En sistemas neumáticos, un Payback

menor a tres años se considera económicamente atractivo, especialmente cuando se trata de medidas de eficiencia energética o modernización tecnológica (Keller, 2018).

Estos tres indicadores permiten evaluar proyectos desde distintas perspectivas: el VAN desde la creación de valor, la TIR desde la rentabilidad porcentual y el Payback desde la liquidez o recuperación del capital, complementándose en el análisis integral de inversiones industriales.

3.7.3 Enfoque de sostenibilidad en el ciclo de vida (energía y emisiones)

El enfoque de sostenibilidad en el análisis del ciclo de vida (LCC) busca integrar las dimensiones energética y ambiental en la evaluación económica de los sistemas industriales, considerando no solo los costos monetarios, sino también los impactos asociados al consumo de energía y a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo de la vida útil del sistema. En los sistemas de aire comprimido, esta evaluación resulta especialmente relevante, ya que la generación de aire es un proceso de alta demanda energética y, por tanto, de significativa huella de carbono (ISO, 2017).

El análisis sostenible del ciclo de vida se apoya en metodologías como la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, Life Cycle Assessment), regulada por la ISO 14040:2006 y la ISO 14044:2006, las cuales permiten cuantificar los impactos ambientales desde la extracción de materias primas, la fabricación y operación del sistema, hasta su disposición final. En este contexto, los costos ambientales se expresan en indicadores como el consumo energético total (kWh/Nm³), las emisiones equivalentes de CO₂ (kg CO₂e) y la eficiencia global del sistema, que relaciona la energía útil entregada con la energía total consumida (ISO, 2019).

La incorporación de criterios sostenibles en la gestión del aire comprimido implica la aplicación de tecnologías de alta eficiencia, la recuperación de calor residual, la reducción de

fugas, el uso de energías renovables para la alimentación eléctrica y la implementación de estrategias de monitoreo continuo para optimizar el desempeño energético. Estas acciones no solo reducen los costos de operación, sino que también contribuyen al cumplimiento de los compromisos ambientales corporativos y de los objetivos establecidos en los marcos normativos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París sobre cambio climático.

En síntesis técnica, el enfoque de sostenibilidad dentro del LCC permite evaluar las decisiones de inversión considerando simultáneamente la eficiencia energética, el costo de operación y el impacto ambiental, favoreciendo la adopción de soluciones que maximicen el valor económico y minimicen las externalidades negativas a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema neumático.

3.8 Síntesis conceptual y relación con el caso de estudio

El marco teórico desarrollado integra los fundamentos técnicos, normativos, energéticos y económicos que sustentan el diseño y gestión de sistemas de aire comprimido en entornos industriales. Estos sistemas, compuestos por etapas de generación, tratamiento, almacenamiento, distribución y control, constituyen una infraestructura crítica para garantizar la continuidad operativa y la eficiencia productiva en plantas de procesamiento de alimentos. La revisión de normas internacionales como ISO 8573-1, ISO 4414, ISO 11011, ASME B31.3 y BPVC Sección VIII, junto con la legislación chilena vigente (DS N°10/2012, DS N°594/1999, DS N°148/2003 y NCh 2861/2020), permite establecer las bases técnicas y legales para el diseño seguro, higiénico y eficiente de estos sistemas.

Desde una perspectiva económica, la aplicación de herramientas como el Costo del Ciclo de Vida (LCC), el CAPEX, el OPEX y el TCO, junto con los indicadores financieros VAN, TIR

y Payback, proporciona una estructura de análisis que facilita la evaluación de alternativas tecnológicas y la optimización de la inversión en infraestructura neumática. Complementariamente, el enfoque de sostenibilidad, apoyado en las normas ISO 14040 y ISO 15686-5, introduce criterios de eficiencia energética y reducción de emisiones que vinculan la gestión técnica con los objetivos ambientales de la industria.

En el contexto del caso de estudio de AquaChile, esta síntesis conceptual permite fundamentar la propuesta de diseño y evaluación del sistema de aire comprimido de la planta de procesamiento, considerando los requerimientos operacionales, las condiciones de pureza del aire exigidas por la normativa alimentaria y las oportunidades de mejora en rendimiento energético y confiabilidad operacional. La integración de estos elementos teóricos y normativos servirá como base metodológica para el desarrollo del diagnóstico técnico-económico y la formulación de propuestas de optimización en las etapas siguientes del estudio.

4. Antecedentes de la empresa

4.1 Historia de AquaChile

AquaChile se origina durante la década de 1980, centrando sus primeras operaciones en el cultivo de salmón en agua dulce (producción de ovas, alevines y smolts). Posteriormente, en 1998, se consolidó una fusión estratégica con Salmones Pacífico Sur, lo que permitió integrar verticalmente las operaciones de cultivo marino con las de agua dulce y procesamiento (AquaChile + Pacífico Sur). Esta integración fue clave para que la empresa controlara más etapas del ciclo productivo y ganara escala en la industria salmonera chilena.

Con el tiempo, AquaChile llevó a cabo adquisiciones estratégicas que expandieron su alcance operacional: en 2003 adquirió activos de Pesquera BestSalmon; en 2004 integró la empresa Antarfish; en 2005 avanzó en la compra de Salmones Chiloé, Pesquera Palacios y Salmones Australes; y entre 2005–2006 fortaleció su integración genética mediante alianzas y la creación de entidades de innovación como Aquainnovo. Ya en años más recientes, AquaChile fue adquirida por el grupo Agrosuper, operación considerada una de las más relevantes en la industria salmonera chilena.

Hoy AquaChile opera con una estructura operativa significativa en Chile. Según su sitio oficial, dispone de 335 concesiones acuícolas, 15 pisciculturas, 6 plantas de proceso y una planta de alimentos propia.

Estas instalaciones le permiten abarcar todas las etapas del ciclo del salmón: genética, engorda en centros de cultivo, procesamiento industrial y comercialización.

En la actualidad, AquaChile se posiciona como una de las empresas salmoneras más grandes de Chile y del mundo con un modelo de operación completamente integrado. Su red de

plantas y centros de cultivo constituye la base operativa de su capacidad productiva y logística, mientras que su presencia internacional le permite diversificar mercados y productos.

4.2 AquaChile Planta Cardonal

El estudio se desarrollará en la planta de proceso de AquaChile ubicada en Cardonal S/N, Lote B, Puerto Montt, Chile.

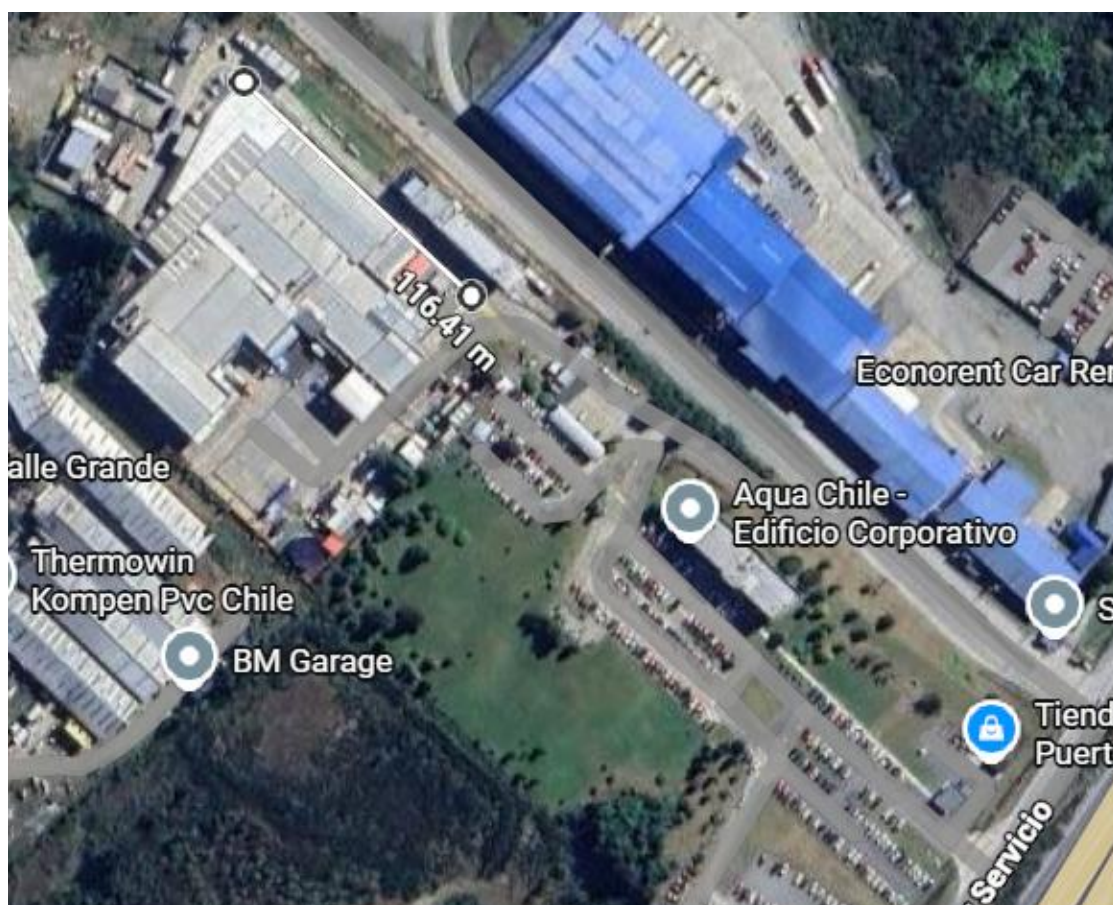


Imagen 1: Vista satelital de Planta Cardonal y Edificio Corporativo AquaChile

4.3 Proceso Productivo

El proceso productivo de Planta Cardonal abarca desde la llegada de la materia prima, la

cual consiste en especies de salmón (Coho y Atlántico) sin vísceras provenientes de los distintos centros de cultivo de AquaChile, hasta la carga de los camiones con los subproductos frescos y congelados listos para despacho a los distintos mercados.

El proceso productivo a modo general se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

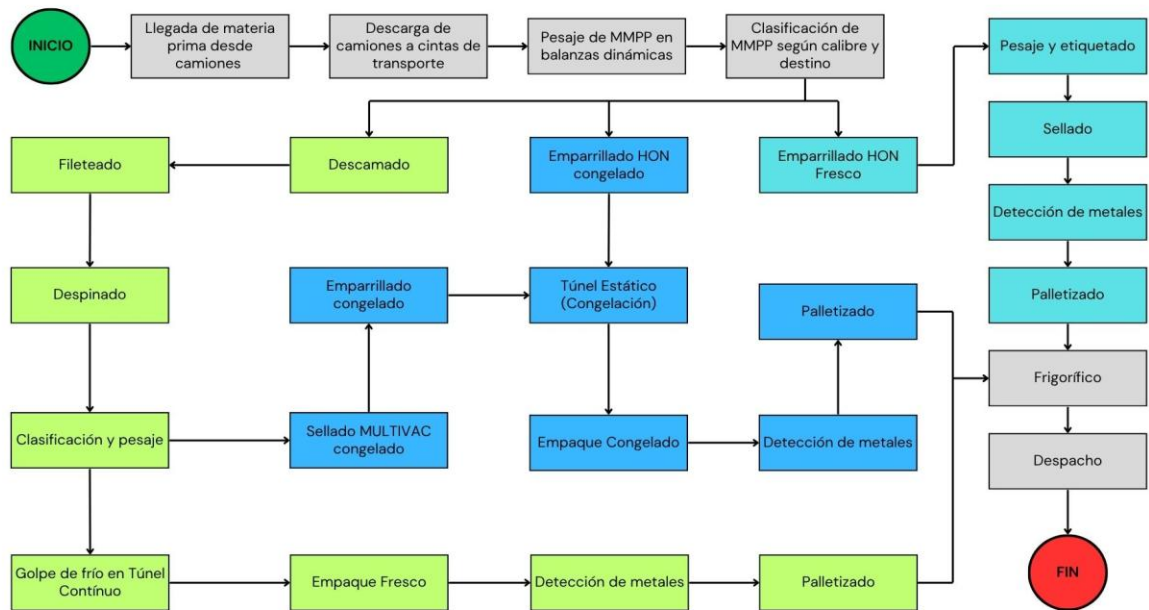


Imagen 2 Flujograma del proceso productivo de Planta Cardonal. Fuente: Elaboración Propia.

El proceso productivo posee distintas variaciones cada día debido a los distintos subproductos que se necesitan despachar, horarios de llegada de los camiones, disponibilidad de personal, capacidad y disposición de máquinas y características de la MMPP.

5. Metodología de la investigación

5.1 Diseño metodológico y enfoque del estudio

El presente estudio se enmarca dentro de una investigación aplicada de tipo descriptivo y analítico, orientada a la evaluación de prefactibilidad técnico-económica para la mejora del sistema de aire comprimido de la Planta AquaChile Cardonal. Su propósito es generar una base de decisión objetiva respecto de la conveniencia técnica, energética y económica de las alternativas de rediseño propuestas.

El enfoque metodológico adoptado combina elementos cuantitativos y cualitativos. El componente cuantitativo se centra en la obtención, tratamiento y análisis de datos técnicos del sistema actual (presiones, caudales, consumos energéticos, costos de operación, etc.), utilizando herramientas de diagnóstico energético conforme a la ISO 11011:2013, así como métodos de análisis económico-financiero basados en el ciclo de vida del sistema (LCC). El componente cualitativo complementa este análisis mediante la revisión de estándares normativos (ISO, ASME, NCh, DS) y buenas prácticas de diseño aplicables a plantas de procesamiento de alimentos.

El diseño metodológico se estructura bajo un enfoque secuencial de etapas que abarca:

1. Caracterización del sistema actual mediante inspecciones en planta, revisión de planos, fichas técnicas y registros operacionales.
2. Diagnóstico energético basado en mediciones de campo, balance de aire comprimido y determinación de pérdidas o ineficiencias.
3. Desarrollo de alternativas de mejora considerando criterios técnicos, normativos y de seguridad.

4. Evaluación económica y ambiental de las alternativas bajo el enfoque del costo total de propiedad (TCO) y el análisis del ciclo de vida (LCC).
5. Validación técnica comparativa para determinar la opción más eficiente y sustentable desde el punto de vista técnico-económico.

El enfoque metodológico se apoya en lineamientos de la ISO 50002:2014 para auditorías energéticas, la ISO 8573-1:2010 para la calidad del aire comprimido, y la ASME B31.3 para el diseño de sistemas de tuberías. Estos marcos normativos permiten garantizar la confiabilidad de los resultados y la trazabilidad del proceso analítico.

5.2 Etapas de desarrollo del proyecto

El desarrollo metodológico del estudio se estructura en ocho etapas secuenciales e interdependientes, orientadas a garantizar la rigurosidad técnica y la coherencia entre los objetivos del proyecto y los resultados obtenidos. Cada fase responde a los lineamientos de la ISO 11011:2013 para la evaluación de eficiencia energética en sistemas de aire comprimido y se integra con criterios de diseño técnico y económico basados en estándares internacionales (ISO, ASME, NCh).

Etapas 1. Revisión documental y levantamiento de información preliminar:

Comprende la recopilación de antecedentes técnicos del sistema existente: planos de distribución, fichas de compresores, estanques acumuladores, secadores y equipos consumidores. Incluye además la revisión de normas aplicables, manuales de fabricante y registros de mantenimiento histórico. Esta etapa permite definir el alcance del diagnóstico y establecer las variables críticas a medir.

Etapa 2. Caracterización del sistema actual de aire comprimido: Se realiza la descripción funcional del sistema, identificando los componentes principales (compresor, tratamiento de aire, almacenamiento, red de distribución y puntos de consumo). Se determinan parámetros base como presión, caudal, eficiencia energética, y se elabora el diagrama de flujo neumático representativo de la instalación actual.

Etapa 3. Medición, instrumentación y registro de datos operativos: Incluye la instalación de instrumentos de medición (caudalímetros, manómetros, data loggers, sensores de temperatura y humedad) en puntos estratégicos de la red. Se recopilan datos en condiciones normales de operación para construir una línea base energética representativa del comportamiento real del sistema.

Etapa 4. Diagnóstico energético conforme a ISO 11011: A partir de la información medida, se realiza el análisis de eficiencia energética, identificando pérdidas por fugas, sobrepresiones, ineficiencia en la generación y almacenamiento, y desbalances de caudal. Se cuantifica el potencial de ahorro energético y se definen los indicadores clave de desempeño (KPIs).

Etapa 5. Formulación de alternativas de mejora técnica: Se generan propuestas de rediseño y optimización, tales como la redistribución de la red principal, incorporación de estanques acumuladores intermedios, mejora en la calidad del aire comprimido, automatización del control de presión y dimensionamiento de equipos auxiliares.

Etapa 6. Evaluación técnica, normativa y de seguridad: Cada alternativa se somete a revisión conforme a los requisitos establecidos en normas nacionales e internacionales: NCh 2861:2020, ISO 8573-1:2010, ASME B31.3:2020, y DS N°594/1999 sobre seguridad industrial. Se verifican las condiciones de cumplimiento sanitario y de inocuidad aplicables a plantas de procesamiento de alimentos.

Etapa 7. Análisis económico y de ciclo de vida (LCC): Se aplica la metodología de análisis del ciclo de vida de costos (Life Cycle Costing) según ISO 15686-5:2017, considerando inversiones (CAPEX), costos operacionales (OPEX), mantenimiento, consumo energético y emisiones asociadas. Se calculan indicadores financieros como VAN, TIR y Payback para determinar la factibilidad económica de cada opción.

Etapa 8. Validación y comparación de alternativas: Se integran los resultados técnicos, energéticos y económicos para comparar las alternativas. Se emplea un enfoque multicriterio que pondera desempeño técnico, ahorro energético, inversión y cumplimiento normativo. La alternativa óptima se define en función del menor costo total de propiedad (TCO) y la mayor eficiencia del sistema a largo plazo.

5.3 Fuentes de información y técnicas de recolección de datos

La obtención de información para el desarrollo del estudio se sustenta en fuentes primarias y secundarias, complementadas mediante técnicas de medición directa, observación estructurada y análisis documental, en concordancia con las directrices de la ISO 11011:2013 para la evaluación energética de sistemas de aire comprimido.

a) Fuentes primarias

Corresponden a los datos obtenidos directamente desde la planta de proceso, a través de mediciones, inspecciones y observaciones en terreno. Incluyen:

- Registros operativos de presión, caudal y consumo energético de los compresores y equipos asociados.
- Mediciones instrumentales de variables críticas mediante caudalímetros, manómetros, sensores de temperatura y analizadores eléctricos portátiles.

- Observación técnica directa de la red de distribución, acumuladores, puntos de consumo y estado general de la infraestructura neumática.
- Entrevistas técnicas con personal de mantenimiento, jefatura de planta y operadores, orientadas a identificar prácticas operativas, incidencias y restricciones en el uso del aire comprimido.

b) Fuentes secundarias

Incluyen información documental, normativa y bibliográfica necesaria para contextualizar el análisis técnico y económico. Entre ellas:

- Normas técnicas: ISO 11011 (evaluación de eficiencia energética), ISO 8573-1 (calidad del aire comprimido), NCh 2861 (requisitos de sistemas neumáticos), ASME B31.3 (diseño de tuberías), DS N°594/1999 (seguridad industrial) y DS N°977/1996 (Reglamento Sanitario de los Alimentos).
- Manuales de fabricante de compresores, secadores, acumuladores y elementos de tratamiento del aire.
- Registros internos de mantenimiento preventivo y correctivo, reportes de consumo eléctrico y hojas técnicas de equipos consumidores de aire.
- Fuentes académicas y bibliográficas: artículos científicos, guías técnicas de eficiencia energética (por ejemplo, de la Agencia de Sostenibilidad Energética de Chile y el Ministerio de Energía) y publicaciones especializadas sobre diseño de redes neumáticas industriales.

c) Técnicas de recolección de datos

El proceso de recopilación se desarrollará siguiendo tres métodos complementarios:

1. Medición directa y registro continuo: instalación temporal de sensores en los puntos críticos del sistema para obtener curvas de presión y caudal en tiempo real.
2. Revisión documental sistemática: análisis y contraste de información técnica y normativa para establecer criterios de evaluación comparables.
3. Entrevistas semiestructuradas: aplicación de guías de preguntas dirigidas a especialistas internos con el fin de validar información cualitativa sobre fallas, mantenibilidad y hábitos operativos.

La validación y procesamiento de los datos se realizará mediante análisis estadístico básico y contraste con valores de referencia establecidos por las normas ISO y NCh, garantizando la fiabilidad y trazabilidad de los resultados obtenidos.

5.4 Instrumentación, monitoreo y parámetros adicionales

El levantamiento de información cuantitativa para el diagnóstico energético del sistema de aire comprimido requiere la implementación de instrumentación especializada y técnicas de monitoreo continuo, conforme a los lineamientos establecidos en la ISO 11011:2013 y la ISO 50002:2014. Estas normas definen los criterios para la correcta medición, análisis y validación de datos energéticos en sistemas industriales.

a) Instrumentación utilizada

La selección de instrumentos responde a la necesidad de obtener mediciones confiables de presión, caudal, temperatura, potencia eléctrica y contenido de humedad. Los equipos considerados se detallan a continuación:

- **Manómetros y transductores de presión:** para registrar la presión de trabajo en

puntos estratégicos de la red, con resolución mínima de 0,1 bar.

- **Sensores de temperatura y humedad relativa:** utilizados para evaluar las condiciones del aire comprimido y verificar la eficiencia de los sistemas de secado.
- **Analizadores eléctricos portátiles:** para medir potencia activa, corriente, tensión y factor de potencia en los compresores.
- **Equipos de detección ultrasónica de fugas:** destinados a la localización de pérdidas de aire comprimido en un rango de 20 a 100 kHz.

b) Estrategia de monitoreo y puntos de medición

El monitoreo se estructura en tres niveles jerárquicos:

1. **Nivel de generación:** medición en la descarga del compresor y antes del tratamiento del aire (secador y filtros), con el fin de caracterizar el rendimiento del equipo y las pérdidas por sobrepresión.
2. **Nivel de almacenamiento y distribución:** registro en la entrada y salida de los estanques acumuladores y en puntos intermedios de la red principal, para determinar la estabilidad de presión y las caídas por fricción.
3. **Nivel de consumo:** medición en líneas terminales o “bajadas” representativas de los procesos productivos, a fin de verificar la presión efectiva en los equipos finales.

c) Parámetros de análisis adicionales

Además de las variables operativas, se incorporan indicadores complementarios para una evaluación integral:

- **Eficiencia volumétrica del compresor (η_v):** relación entre el caudal real entregado y el teórico.
- **Consumo energético específico (kWh/m³):** indicador clave de desempeño (KPI) para comparar la eficiencia entre alternativas.
- **Índice de pérdidas por fugas (%):** proporción del caudal perdido respecto del caudal total generado.
- **Factor de utilización:** cociente entre el tiempo de carga y el tiempo total de operación del compresor.
- **Nivel de pureza del aire (ISO 8573-1:2010):** determinación de clases de partículas, humedad y aceite residual.

d) Validación y trazabilidad de datos

Las mediciones serán validadas mediante comparación cruzada entre equipos calibrados y valores de referencia. Los instrumentos deberán contar con certificados de calibración vigentes, emitidos por laboratorios acreditados bajo la norma ISO/IEC 17025:2017. Todos los registros se almacenarán en formatos digitales compatibles con hojas de cálculo para su análisis posterior.

5.5 Procedimiento de diagnóstico energético conforme a ISO 11011

El diagnóstico energético del sistema de aire comprimido se efectuará conforme a la norma ISO 11011:2013, la cual establece los lineamientos para la evaluación de eficiencia energética en sistemas de aire comprimido, considerando las etapas de generación, tratamiento, almacenamiento, distribución y consumo. El objetivo es determinar el desempeño energético

del sistema, identificar ineficiencias y proponer mejoras técnicas y operacionales.

a) Definición del alcance y límites del sistema

Se delimita el sistema objeto de estudio, comprendiendo los subsistemas de generación, tratamiento, almacenamiento, distribución y puntos de consumo. Este alcance permite estructurar el balance energético y definir los parámetros de medición para cada componente.

b) Recolección y validación de datos

Se registran variables operacionales mediante instrumentación calibrada bajo ISO/IEC 17025:2017, incluyendo presión, caudal, temperatura, consumo eléctrico y horas de operación. Los datos son contrastados con registros históricos y verificados por consistencia técnica.

c) Análisis energético del sistema

Se elabora el balance energético global según la relación entre la energía útil del aire comprimido y la energía eléctrica total suministrada. Se identifican pérdidas por fugas, sobrepresión, caídas de presión y baja eficiencia volumétrica, cuantificando su impacto energético y económico.

d) Determinación de indicadores de desempeño

Se calculan indicadores clave de eficiencia (KPIs), tales como consumo específico de energía (kWh/m^3), factor de utilización, porcentaje de fugas y eficiencia del tratamiento de aire. Estos valores se comparan con estándares internacionales de referencia para establecer el nivel de desempeño del sistema.

5.6 Criterios de diseño técnico, normativo y de seguridad

La evaluación técnica y económica se desarrolla con el propósito de determinar la

viabilidad de las alternativas de mejora propuestas, integrando criterios de desempeño operativo, eficiencia energética, cumplimiento normativo y rentabilidad financiera. Este análisis se sustenta en los lineamientos de la ISO 15686-5:2017 para el costo del ciclo de vida (Life Cycle Costing, LCC) y en la ISO 50002:2014 para la evaluación de medidas de eficiencia energética.

a) Evaluación técnica: Cada alternativa se analiza en función de su impacto sobre la confiabilidad, mantenibilidad, eficiencia y seguridad del sistema. Los principales criterios técnicos considerados son:

- Adecuación al proceso productivo: compatibilidad con las condiciones de operación y requerimientos de calidad del aire según ISO 8573-1:2010.
- Cumplimiento normativo: verificación conforme a ASME B31.3, NCh 2861:2020 y DS N°594/1999.
- Eficiencia energética estimada: reducción del consumo específico (kWh/m³) y de las pérdidas por fugas o caídas de presión.
- Confiabilidad operativa: impacto en la continuidad de suministro y facilidad de mantenimiento preventivo.

Los resultados técnicos se ponderan mediante una matriz de evaluación multicriterio, que asigna pesos relativos a cada parámetro en función de su relevancia operacional y estratégica para la planta.

b) Evaluación económica

La evaluación económica considera el ciclo de vida completo de cada alternativa, incluyendo inversión inicial (CAPEX), costos de operación y mantenimiento (OPEX) y costos de energía. Se aplican los siguientes indicadores financieros:

- Valor Actual Neto (VAN): evaluación del beneficio económico actualizado.
- Tasa Interna de Retorno (TIR): rentabilidad porcentual del proyecto.
- Periodo de recuperación (Payback): tiempo necesario para recuperar la inversión.
- Costo total de propiedad (TCO): suma de todos los costos asociados durante la vida útil del sistema.

Los flujos de caja se elaboran considerando una vida útil de diseño de 10 a 15 años y una tasa de descuento acorde a las condiciones financieras de la empresa. Adicionalmente, se estiman los ahorros energéticos anuales (kWh/año).

c) Selección de la alternativa óptima

La alternativa seleccionada corresponderá a aquella que presente el mejor desempeño integral en términos de eficiencia técnica, cumplimiento normativo y rentabilidad económica. La decisión final se fundamenta en el resultado de la matriz comparativa multicriterio, priorizando el menor costo total de propiedad (TCO) y el mayor beneficio energético y ambiental.

5.7 Metodología de evaluación económica y análisis del ciclo de vida (LCC)

La evaluación económica del proyecto se desarrolla utilizando la metodología de Costo del Ciclo de Vida (Life Cycle Cost Analysis, LCC), ampliamente empleada en ingeniería para analizar la conveniencia económica de activos físicos durante su vida útil. Este enfoque permite integrar en un mismo marco analítico tanto los costos de inversión inicial como aquellos que emergen de la operación, el mantenimiento y el desempeño del sistema a lo largo del tiempo. Tal como plantean Barberá et al. (2012), el LCC constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que facilita la comparación objetiva entre alternativas técnicas, considerando su

impacto económico total y su alineación con los objetivos estratégicos de la organización.

El LCC reconoce que el costo real de un sistema industrial no se limita al desembolso inicial asociado a la adquisición e instalación, sino que incluye todos los costos recurrentes que se originan durante la operación. Entre estos se encuentran el consumo energético, los programas de mantenimiento preventivo y correctivo, la reposición de componentes, la gestión de repuestos y los recursos humanos necesarios para sostener el funcionamiento del sistema. Este enfoque resulta especialmente relevante en sistemas neumáticos industriales, donde las condiciones de operación, el estado de la red y la calidad del aire suministrado pueden incrementar de manera significativa los costos totales asociados a la operación.

Adicionalmente, el análisis del ciclo de vida debe integrar los costos derivados de la no confiabilidad (unreliability), entendida como la incapacidad del sistema para cumplir su función requerida de manera segura, continua y estable a lo largo del tiempo. Dziaduch (2010) identifica que los costos por no confiabilidad comprenden eventos tales como fallas prematuras de componentes, detenciones no planificadas, pérdida de disponibilidad, degradación del desempeño y variabilidad en parámetros críticos del sistema. Aunque estos costos no se cuantifican con exactitud en este estudio, su incorporación conceptual en el análisis económico es fundamental, dado que representan pérdidas reales que afectan la productividad, la continuidad operativa y la eficiencia energética del sistema actual.

En concordancia con lo anterior, la metodología definida para esta investigación considera tres grupos principales de costos:

Costos de inversión (CAPEX): incluyen los costos de adquisición de equipos, instalación y puesta en marcha.

Costos de operación y mantenimiento (OPEX): comprenden el consumo energético, las

actividades de mantenimiento programado, la sustitución de componentes y los recursos operacionales necesarios.

Costos cualitativos por riesgo e ineficiencia: corresponden a los efectos operacionales que la literatura asocia a la no confiabilidad, tales como fallas repetitivas de cilindros, pérdidas energéticas por fugas, deterioro de componentes por humedad y caídas de presión que afectan la disponibilidad de las líneas productivas. Estos costos se incorporan de forma conceptual, dado su impacto en la competitividad y en la estabilidad del sistema neumático (Barberá et al., 2012).

El proceso metodológico de evaluación económica consiste en estimar los costos relevantes de la alternativa de diseño y llevarlos a valor presente mediante una tasa de descuento representativa. A partir de estos costos, se calculan indicadores económicos tradicionales: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y período de recuperación de la inversión para determinar la conveniencia técnica y económica del proyecto.

5.8 Validación técnica y comparación de alternativas

La etapa final del proceso metodológico consiste en la integración y análisis global de los resultados técnicos, energéticos y económicos, con el propósito de establecer conclusiones fundamentadas sobre la viabilidad de las alternativas de mejora del sistema de aire comprimido en la Planta AquaChile Cardonal. Esta síntesis permite vincular los hallazgos obtenidos con los objetivos planteados y con las condiciones operativas reales del caso de estudio.

a) Integración de resultados

Los datos obtenidos en las etapas anteriores se consolidan en una matriz comparativa que resume los principales indicadores técnicos (presión, caudal, eficiencia volumétrica),

energéticos (consumo específico de energía, pérdidas por fugas, ahorro estimado) y económicos (CAPEX, OPEX, VAN, TIR, Payback). Esta integración permite identificar tendencias de mejora y cuantificar los beneficios potenciales de cada alternativa.

b) Correlación con el caso de estudio

Los resultados se analizan considerando las particularidades de la planta, tales como el patrón de consumo de aire por línea de proceso, la distribución física de los estanques acumuladores, la demanda variable por turno y las restricciones de espacio del entretecho técnico. De este modo, la evaluación no se limita a un enfoque teórico, sino que se ajusta a las condiciones estructurales, operativas y normativas específicas del entorno productivo de AquaChile.

c) Interpretación técnica y económica

A partir de los indicadores calculados, se determina el desempeño comparativo entre la situación actual y las alternativas propuestas, destacando los beneficios asociados a la eficiencia energética, la reducción de costos operacionales y la mejora en la confiabilidad del sistema. Este análisis se complementa con una estimación del impacto ambiental derivado de la disminución del consumo eléctrico y de las emisiones de CO₂ asociadas.

d) Conclusión integradora

La síntesis final permite seleccionar la alternativa que presenta el mejor equilibrio entre desempeño técnico, rentabilidad económica y sostenibilidad ambiental, constituyendo la base

para la elaboración del estudio de prefactibilidad técnico-económica. La opción seleccionada será aquella que optimice el uso energético del sistema neumático, cumpla con las normativas vigentes (ISO 8573-1:2010, NCh 2861:2020, ASME B31.3, DS N°594/1999) y asegure la continuidad operacional del proceso productivo.

6. Diagnóstico

6.1 Descripción del sistema actual de aire comprimido

El sistema de aire comprimido de la Planta AquaChile Cardonal constituye una infraestructura esencial para el funcionamiento de los equipos neumáticos del proceso productivo, tales como selladoras MULTIVAC, clasificadoras (grader), enzunchadoras y dispositivos de accionamiento neumático distribuidos en las líneas de producción. Su desempeño es crítico para la continuidad operativa y la eficiencia energética de la planta, por lo que su condición técnica actual reviste especial relevancia.

El sistema está conformado principalmente por dos compresores de tornillo lubricado Atlas Copco modelo GA75, de similares características eléctricas y mecánicas. El Compresor 1 (GA75VSD FF7) se encuentra en operación continua, con una potencia nominal de 75 kW (100 hp), presión máxima de 12,75 bar (185 psi) y caudal de 15,09 m³/min. El Compresor 2 (GA75P) se encuentra operativo, pero solo funciona como respaldo del compresor 1 o cuando por algún motivo se requiere aire extra, con una capacidad de 13,84 m³/min y presión máxima de 7,6 bar (113 psi). Ambos operan a 400 V, 50 Hz, trifásico, con un régimen de rotación cercano a 3000 r/min. El Compresor 1 (GA75VSD FF7) incorpora un sistema de velocidad variable (VSD) que ajusta automáticamente el régimen de operación según la demanda de aire, optimizando el consumo energético; en contraste, el Compresor 2 (GA75P) opera a velocidad fija, lo que implica un menor nivel de eficiencia y flexibilidad operativa. Actualmente, el sistema depende casi exclusivamente del compresor principal, que opera aproximadamente un 95 % del tiempo, lo que representa un riesgo elevado de indisponibilidad ante fallas o mantenimientos no programados.

En la sala de compresores se alojan además cuatro estanques acumuladores de tamaño medio de aproximadamente 0,7 m³ cada uno y un separador de agua, el cual se purga cuando el

agua alcanza cierto nivel. Este dispositivo, aunque funcional, no cuentan con silenciadores acústicos, generando un nivel de ruido considerable durante la purga, lo cual constituye una condición de riesgo ergonómico y auditivo conforme al DS N°594/1999 para los trabajadores que transitan la zona.

Desde la sala de compresores parte una línea principal que se extiende hacia el entretecho técnico de la planta, donde se ubican dos estanques acumuladores adicionales. El primero de aproximadamente 1,8 m³ de capacidad, fue fabricado por una maestranza local hace aproximadamente 20 años y no cumple con la normativa vigente (NCh 2861:2020 y ASME Sección VIII, División 1), al carecer de placa de identificación, válvula de alivio y certificación de diseño. Además, presenta un avanzado estado de oxidación superficial e interna, lo que representa un riesgo de falla estructural y de seguridad industrial. El segundo acumulador, de aproximadamente 1,1 m³ de capacidad y con fecha de fabricación Agosto del año 2000, sí cumple con las normas aplicables, incluyendo válvula de seguridad, manómetro, purgador automático y rotulación técnica visible.

El sistema cuenta únicamente con un filtro coalescente Atlas Copco DD310+, instalado aguas abajo del acumulador que cumple con la normativa. Este filtro opera con una presión máxima de 16 bar, filtrando partículas sólidas y aerosoles de aceite hasta 1 µm, conforme a la ISO 8573-1:2010. Su indicador de presión diferencial permite verificar la saturación del elemento filtrante. Además, se identificaron 4 purgadores automáticos en distintas bajadas de aire distribuidas por la planta.

Durante las inspecciones en terreno se detectaron gran cantidad fugas de aire en la red, de magnitud no cuantificada, además de bajas recurrentes de presión en las máquinas MULTIVAC durante las horas de mayor demanda (turno de mañana), provocando detenciones del proceso. Este fenómeno se asocia a una capacidad de acumulación insuficiente, a la

presencia de pérdidas y a una distribución ineficiente del aire comprimido.

Asimismo, se observaron problemas de humedad en la línea, evidenciados por la oxidación prematura de los cilindros neumáticos de las máquinas Grader 1 y 2, que deben reemplazarse periódicamente. Esta condición confirma la deficiencia del sistema de secado y tratamiento de aire, actualmente limitado al único filtro coalescente operativo.

El sistema de distribución presenta una configuración heterogénea de materiales, con tramos de PVC, cobre y acero galvanizado, presencia de codos cerrados, uniones tipo “T” oxidadas y secciones intermedias conectadas mediante mangueras, materiales no recomendados para redes permanentes. La falta de pendiente en el anillo principal impide el drenaje efectivo del condensado, favoreciendo la acumulación de agua en la red y el deterioro de los componentes.

En conjunto, el sistema actual presenta operatividad limitada y cumplimiento normativo parcial, con deficiencias en el tratamiento de aire, acumulación, respaldo de compresión y control de condensado. La evidencia técnica obtenida confirma la necesidad de un rediseño integral del sistema de aire comprimido, orientado a la mejora de la confiabilidad, eficiencia energética y seguridad conforme a los estándares ISO 11011, ISO 8573-1, NCh 2861 y ASME B31.3.

6.2 Configuración y estado operativo de los compresores

El sistema de generación de aire comprimido está compuesto por dos compresores de tornillo lubricado Atlas Copco modelo GA75, instalados en paralelo dentro de la sala técnica principal. El Compresor 1 (GA75VSD FF7), actualmente operativo, incorpora tecnología de velocidad variable (VSD) que ajusta su régimen de trabajo según la demanda de aire, mientras que el Compresor 2 (GA75P), de velocidad fija, se encuentra semi-operativo y requiere mantenimiento general antes de ser reincorporado.

El compresor en uso posee una presión máxima de 12,75 bar y un caudal nominal de 15,09 m³/min, mientras que el equipo fuera de servicio alcanza 7,6 bar y 13,84 m³/min, respectivamente. Esta diferencia de capacidad y régimen operativo dificulta su funcionamiento simultáneo sin una estrategia de control coordinado.

El Compresor 1 opera de manera continua aproximadamente el 95 % del tiempo, situación que genera alta dependencia operativa y desgaste acelerado del equipo. La ausencia de redundancia activa implica que, ante una falla o mantenimiento, se interrumpiría completamente el suministro de aire comprimido, afectando directamente la continuidad de la producción.

Durante la inspección se observó que la red no cuenta con sistemas de monitoreo digital para el control de presión, caudal o consumo energético. Tampoco se registran históricos de operación ni alarmas automáticas, limitando la capacidad de gestión preventiva y el seguimiento del desempeño energético conforme a la ISO 11011:2013.

En conjunto, la configuración actual presenta operatividad limitada y baja resiliencia, por lo que resulta necesario implementar un sistema de control automatizado y redundancia operativa que asegure el suministro continuo y eficiente de aire comprimido en condiciones seguras.

6.3 Tratamiento del aire y calidad del suministro

El sistema de tratamiento de aire comprimido de la Planta AquaChile Cardonal presenta una configuración básica y parcialmente funcional, que permite la remoción de parte del condensado y partículas sólidas, pero no asegura la calidad requerida para aplicaciones en la industria alimentaria.

El proceso de tratamiento se inicia a la salida de los compresores, donde el aire pasa por

un separador de agua que se purga cada cierto tiempo sin silenciador. Aguas abajo, se identificaron cuatro purgadores automáticos en distintas bajadas de aire que descargan el condensado hacia afuera del recinto. Si bien cumplen su función operativa, su configuración actual no garantiza un drenaje hermético ni libre de arrastre de aceite o humedad residual para todos los equipos que lo requieren

El único elemento de filtración en servicio corresponde a un filtro coalescente Atlas Copco modelo DD310+, instalado aguas abajo del acumulador principal. Este componente permite retener partículas de hasta 1 μm y aerosoles de aceite conforme a la clase 4 de la ISO 8573-1, operando a una presión máxima de 16 bar. Sin embargo, la ausencia de un sistema de secado por refrigeración o adsorción, así como la inexistencia de filtración en etapas (prefiltro y filtro de carbón activado), limita severamente la calidad del aire entregado a los equipos neumáticos.

Las consecuencias operativas de esta configuración se evidencian en la presencia de agua y aceite en las líneas de distribución, lo que ha provocado oxidación interna y fallas recurrentes en cilindros neumáticos de las máquinas Grader y en componentes de selladoras MULTIVAC. Esta situación afecta tanto la confiabilidad de los equipos como la higiene del entorno productivo, contraviniendo las buenas prácticas definidas por el Reglamento Sanitario de los Alimentos (DS N°977/1996) y la NCh 2861:2020 en materia de pureza del aire comprimido utilizado en procesos de contacto indirecto con alimentos.

Asimismo, no se registran controles periódicos de calidad del aire, tales como medición de punto de rocío o análisis de aceite residual, indicadores esenciales para verificar la conformidad con las clases de pureza establecidas por la norma ISO 8573-1.

En síntesis, el sistema actual de tratamiento no garantiza un suministro de aire seco, limpio y libre de contaminantes, por lo que se recomienda incorporar un secador de aire por

refrigeración o adsorción, junto con un sistema de filtración en tres etapas (prefiltro, coalescente y de carbón activado) y un monitoreo de punto de rocío en línea, de manera de cumplir con los estándares de inocuidad y desempeño exigidos para la operación de plantas de proceso alimentario.

6.4 Instrumentación y control existente

El sistema de aire comprimido de la Planta carece de un sistema digital de monitoreo y control centralizado, operando bajo un esquema manual y local, dependiente de lecturas visuales realizadas por el personal de mantenimiento. No existen registros automáticos ni alarmas de presión, caudal o temperatura, lo que limita la capacidad de diagnóstico preventivo ante fallas o fluctuaciones operativas.

Actualmente, la instrumentación disponible se restringe a manómetros analógicos instalados en cada estanque acumulador y en algunas bajadas de aire específicas de la red, principalmente aquellas que alimentan equipos críticos como las máquinas MULTIVAC y las Grader. En estos puntos, las unidades FRL (Filtro–Regulador–Lubricador) permiten visualizar la presión de operación local y efectuar ajustes manuales de regulación, pero sin transmitir información al sistema de control ni generar alertas ante desviaciones de presión.

La ausencia de sensores digitales o caudalímetros en línea impide conocer el comportamiento del flujo a lo largo de la red, dificultando la detección temprana de bajas de presión, fugas o sobreconsumo de aire. De igual forma, los purgadores automáticos electrónicos carecen de supervisión eléctrica o indicadores de estado, por lo que su verificación depende de la observación directa, incrementando el riesgo de acumulación de condensado o fallos silenciosos.

6.5 Medición y análisis de desempeño energético y económico

El sistema actual genera costos anuales derivados del consumo energético del compresor y del mantenimiento asociado a fallas y recambios preventivos.

- Costo energético anual actual: Se estimó un consumo anual de 299.520 [kWh] en el compresor. El resto de componentes eléctricos del sistema neumático no se consideraron al ser despreciables en comparación con el compresor. Se consideró un costo promedio de \$103,6 CLP por kWh consumido lo que resulta en:

$$C_{energía} = \$31.030.272 \text{ CLP/año}$$

- Costo de mantenimiento anual actual:

Cambios por fallas: \$17.346.625

Estos cambios por fallas se deben en parte a que el aire que usan los actuadores neumáticos (en su mayoría cilindros neumáticos) contiene un exceso de agua y otras impurezas, haciendo que se genere óxido dentro de los cilindros que impide su correcto funcionamiento. Otra parte de las fallas también se genera por golpes generados al momento de la limpieza rutinaria al final de cada turno en la planta que afecta a los sellos de estos cilindros.

Cambios preventivos: \$15.606.639

$$C_{mantenimiento} = \$31.953.264 \text{ CLP/año}$$

Los cambios preventivos se hacen cada cierto tiempo cuando si bien el actuador no ha fallado, se encuentran defectos que podrían generar una falla prontamente, reduciendo su vida útil en gran medida.

- El costo total del sistema actual a 10 años es:

$$LCC_{actual} = 10 \times (31.060.272 + 32.953.264)$$

$$LCC_{actual} = \$639.835.360 \text{ CLP}$$

El diagnóstico del sistema neumático actual revela que, además de las ineficiencias técnicas y energéticas identificadas, existen impactos operacionales reconocidos como costos por ineficiencia o no confiabilidad del sistema (unreliability). Estos costos no solo incluyen fallas recurrentes, humedad en las líneas, variaciones de presión y mayor demanda de mantenimiento correctivo, sino también efectos indirectos de mayor alcance, tales como detenciones no programadas, retrasos en la producción y pérdidas de volumen procesado, todos los cuales afectan la continuidad y el rendimiento global del proceso. Debido a la complejidad para estimar estos costos y que el enfoque del rediseño de la red apunta a reducir las pérdidas de eficiencia, no se incluirán en el análisis económico.

En consecuencia, el desempeño del sistema actual debe entenderse no solo desde la perspectiva de su eficiencia técnica, sino también considerando el impacto que estas ineficiencias ejercen sobre la productividad, la continuidad operativa y el ciclo de vida del activo.

7. Ingeniería conceptual y rediseño propuesto

7.1 Criterios de diseño del nuevo sistema

El diseño del nuevo sistema de aire comprimido se desarrolló considerando criterios técnicos, normativos y de eficiencia energética acordes con las exigencias operacionales de la planta de proceso de AquaChile. El objetivo principal fue optimizar la confiabilidad y el desempeño del sistema mediante un rediseño integral que permitiera reducir pérdidas de presión, mejorar la calidad del aire, asegurar el cumplimiento de las normas aplicables y facilitar el mantenimiento y la supervisión de la red.

El proceso de diseño se realizó sobre un modelo tridimensional (3D) generado en el software Autodesk Inventor, empleando una maqueta digital a escala de la planta. Este modelo permitió definir con precisión la ubicación de los equipos principales: compresores, secador, filtros y estanques acumuladores, y trazar las líneas de distribución principales y secundarias, considerando la geometría real del recinto, interferencias estructurales y puntos de uso. Asimismo, se representaron los tramos de tubería con sus correspondientes longitudes, diámetros, accesorios y válvulas, lo que facilitó el cálculo hidráulico y la estimación exacta de materiales y pérdidas de carga.

El diseño se rige por los siguientes criterios técnicos fundamentales:

- **Presión y caudal de diseño:**

Se estableció una presión nominal de trabajo de 9 bar y un caudal máximo de 250 l/s FAD, en concordancia con la capacidad del compresor GA75VSD FF y los requerimientos simultáneos de las líneas de producción.

Se buscó limitar las caídas de presión totales a menos del 10% de la presión de descarga del compresor, asegurando una presión mínima de 7 bar en los puntos de uso más alejados del anillo 1 y 8 bar en el anillo 2.

- **Configuración del sistema:**

Debido a las ubicaciones de los equipos neumáticos, la red se configuró bajo un esquema cerrado con dos anillos de distribución que se desprenden de cada estanque acumulador, con ramales y bajadas de aire a los puntos de uso. Este diseño permite equilibrar las presiones, reducir pérdidas localizadas y mantener continuidad operativa ante mantenimientos parciales.

- **Eficiencia energética y control de pérdidas:**

Se priorizó el uso de tuberías de diámetro óptimo según el análisis de caídas de presión, evitando velocidades de flujo superiores a 6 m/s en la red de alimentación de los compresores y anillos y 8 m/s en ramales.

Asimismo, se incorporaron purgadores automáticos en los puntos bajos para eliminar condensados y minimizar pérdidas por fuga o arrastre de humedad.

- **Calidad del aire comprimido:**

El sistema fue diseñado para cumplir la clase 7.4.3 según ISO 8573-1, correspondiente a procesos industriales no críticos en contacto indirecto con alimentos.

Para ello, se dispusieron filtros coalescentes y secadores refrigerativos posteriores al compresor, complementados con unidades FRL en los puntos de uso críticos.

- **Materiales y normas aplicables:**

La selección de materiales se basó en las normas ASME B31.3 e ISO 4414, garantizando compatibilidad con aire comprimido, resistencia mecánica y durabilidad.

Se emplearon tramos de acero inoxidable AISI 316L de 3" en la línea de alimentación y anillo 1, acero inoxidable AISI 316L de 2" en anillo 2 y aluminio anodizado en los ramales de distribución.

- **Seguridad, accesibilidad y mantenimiento:**

Se dispusieron válvulas de aislamiento por sectores para permitir el mantenimiento sin detener la operación total del sistema. Los acumuladores se ubicaron estratégicamente para reducir caídas de presión y facilitar su inspección visual, contando con manómetros y válvulas de seguridad conforme a ASME BPVC Sección VIII.

- **Modelación y cálculos técnicos:**

A partir del modelo 3D se identificaron todos los accesorios (codos, tees, válvulas, uniones, etc.) y se realizaron los cálculos de pérdidas de presión en cada tramo mediante la ecuación de Darcy–Weisbach, considerando el largo equivalente de accesorios.

Estos resultados fueron la base para el dimensionamiento final y la selección de materiales presentados en los puntos 7.4.1 y 7.4.2.

- **Sostenibilidad y eficiencia del ciclo de vida:**

El diseño prioriza la reducción del consumo energético del compresor, el uso eficiente de materiales y la facilidad de ampliación futura. Se considerará integrar en la fase posterior un sistema de monitoreo digital para evaluar consumo y desempeño, en línea con los criterios de eficiencia energética definidos por ISO 11011:2013.

7.2 Alternativas de configuración tecnológica

El proceso de rediseño del sistema de aire comprimido de la planta se sustentó en la evaluación de distintas alternativas de configuración tecnológica, definidas con base en los resultados del diagnóstico técnico realizado en terreno. Este diagnóstico permitió identificar deficiencias estructurales y operativas del sistema existente, tales como caídas excesivas de presión, acumulación de condensado, corrosión en tuberías, fugas y deterioro en los equipos

principales.

De acuerdo con los lineamientos de la norma ISO 11011:2013, que establece los criterios de eficiencia energética en sistemas de aire comprimido, se formularon tres alternativas de intervención con distintos niveles de alcance técnico y económico. Estas alternativas permiten comparar el impacto de cada propuesta sobre la confiabilidad, la eficiencia y la sostenibilidad del sistema durante su ciclo de vida (Atlas Copco, 2023; Park, 2007).

Las alternativas se estructuran de la siguiente forma:

- **Alternativa 1:** Sustitución mínima o mejora parcial del sistema existente, centrada en la reposición de componentes críticos y la reparación de fallas localizadas.
- **Alternativa 2:** Rediseño completo de la red de distribución y acumulación, con una nueva configuración hidráulica, materiales optimizados y disposición estratégica de equipos y acumuladores.
- **Alternativa 3:** Incorporación de un sistema de control automático y monitoreo en línea para la gestión energética y preventiva del sistema.

La presente tesis considera como base de desarrollo la Alternativa 2, correspondiente al rediseño completo del sistema, por ser la única que aborda integralmente los problemas estructurales identificados, garantizando una operación segura, eficiente y sostenible. La Alternativa 1, si bien permite mejorar parcialmente la funcionalidad del sistema actual, no soluciona de manera definitiva las deficiencias de diseño, las pérdidas de energía ni la acumulación de humedad en la red, por lo que se considera una medida transitoria de mantenimiento correctivo. Finalmente, la Alternativa 3 se plantea como una etapa futura de mejora tecnológica, cuya implementación requeriría la participación de una empresa

especializada en automatización industrial y monitoreo energético.

7.3 Selección de equipos

De acuerdo con el diagnóstico técnico realizado en la planta, se procedió a la selección de los principales equipos que conforman el nuevo sistema de aire comprimido, considerando criterios de eficiencia energética, cumplimiento normativo y compatibilidad con las condiciones operativas del proceso. La selección se efectuó conforme a las normas ISO 11011:2013 y ISO 8573-1:2010, priorizando equipos de alto rendimiento, bajo consumo energético y diseño modular que faciliten el mantenimiento preventivo y la futura ampliación del sistema (Atlas Copco, 2023).

Compresor:

El análisis de operación determinó que el compresor actualmente instalado posee la capacidad suficiente para satisfacer la demanda de aire comprimido de la planta. Las caídas de presión observadas durante los picos de consumo en el turno productivo no se deben a una limitación del compresor, sino a fugas en la red y pérdidas de carga en distintos tramos de la distribución. Dado el alto costo de inversión que implicaría la adquisición de un nuevo compresor y la suficiencia del equipo existente, se decidió mantener el compresor actual en servicio, previa revisión y mantenimiento mayor para asegurar su correcto funcionamiento.

Filtros coalescentes:

Los filtros coalescentes se instalan aguas abajo de cada estanque acumulador, con el propósito de retener partículas de aceite y aerosoles presentes en el flujo de aire comprimido, garantizando el cumplimiento de la norma ISO 8573-1:2010, clase 7.4.3, exigida por los equipos neumáticos de la planta. Se seleccionó el modelo DD300+ (635 CFM) de la marca Atlas Copco, el cual ya se encuentra en operación en uno de los acumuladores. Este filtro ofrece una capacidad

adecuada para el caudal total de la red y un margen adicional de sobredimensionamiento que permitirá absorber incrementos futuros de demanda.

Secador:

Para asegurar la calidad del aire comprimido conforme a la clase 7.4.3 de la norma ISO 8573-1, el sistema requiere un punto de rocío de presión igual o inferior a 3 °C, evitando la formación de condensado en las líneas y la corrosión de los actuadores neumáticos. Se seleccionó el secador de aire refrigerativo modelo FD260 VSD de Atlas Copco, que cumple con los requisitos de caudal y calidad de aire, incorporando además la tecnología Variable Speed Drive (VSD). Este sistema ajusta la velocidad del compresor del refrigerante en función de la demanda real, lo que permite un ahorro energético de hasta un 65 % respecto de los secadores tradicionales de velocidad fija (Atlas Copco, 2023).

Estanques Acumuladores:

Los estanques acumuladores actuales presentan signos de deterioro interno y deficiencias estructurales, por lo que se determinó su reemplazo. La capacidad óptima de los nuevos estanques se calculó empleando las fórmulas de dimensionamiento recomendadas por Atlas Copco para compresores del tipo VSD, incorporando un sobredimensionamiento del 60 % para considerar futuras ampliaciones de la red. Se seleccionaron dos estanques: uno de 2.000 litros y otro de 1.500 litros, ambos diseñados conforme a la norma ASME BPVC Sección VIII para recipientes a presión, con válvulas de seguridad y manómetros calibrados según las exigencias del DS N°10/2012 del Ministerio de Salud de Chile.

Unidades de mantenimiento:

Las unidades de filtrado, regulación y lubricación (FRL) cumplen la función de acondicionar el aire en los puntos de uso, regulando la presión de trabajo, filtrando partículas

sólidas y suministrando lubricación cuando el equipo lo requiera. Se instalarán en cada punto de conexión que alimente maquinaria neumática crítica. Se seleccionó el modelo MS4-LFR, que ofrece una regulación precisa, baja caída de presión y compatibilidad con la clase de aire requerida.

Purgadores:

Los purgadores se instalarán en los puntos bajos de la red, así como en los equipos donde se genera o acumula condensado, tales como los secadores y estanques acumuladores. Su función es evacuar el agua y el condensado del sistema, evitando su arrastre hacia los actuadores neumáticos y la formación de óxidos en las tuberías. Se seleccionó el modelo IWD125 de Atlas Copco, el cual incorpora tecnología “zero loss”, que permite la purga automática cuando el nivel de agua alcanza el umbral de detección sin pérdida de aire durante la descarga, mejorando la eficiencia del sistema.

7.4 Diseño hidráulico del piping

El diseño hidráulico de la red de aire comprimido se desarrolló con el objetivo de garantizar que todos los puntos de consumo dispongan de la presión y el caudal requeridos, minimizando simultáneamente las pérdidas de carga y el consumo energético del compresor. Para ello se adoptaron los criterios de diseño recomendados por las normas de potencia fluida neumática y por la literatura especializada en sistemas de aire comprimido (ASME, 2022; International Organization for Standardization [ISO], 2010, 2013; Atlas Copco, 2023).

La configuración propuesta se basa en dos anillos de distribución independientes, cada uno alimentado por su respectivo estanque acumulador. Ambos acumuladores reciben aire comprimido desde el compresor principal mediante una línea de alimentación común. Esta disposición permite sectorizar la planta, reducir las pérdidas de presión por distancia, mejorar el

equilibrio hidráulico del sistema y disponer de capacidad de amortiguamiento frente a variaciones de consumo en cada zona. Véase Anexo 11.

7.4.1 Dimensionamiento

El cálculo de las pérdidas de presión se efectuó siguiendo una metodología secuencial, apoyada en la planilla de cálculo (véase Anexo 17). El procedimiento aplicado fue el siguiente:

1. Levantamiento de datos geométricos y operacionales

- Para el análisis de la red, se consideraron 4 tramos (véase Anexo 12):
 - Sala de compresores – Secador
 - Secador – Estanques acumuladores
 - Anillo 1
 - Anillo 2
- Se extrajeron del modelo 3D en Autodesk Inventor las longitudes reales de cada tramo y el número de accesorios por tramo (codos, tees y válvulas).
- En la hoja de cálculo de pérdidas (véase Anexo 17) se trabajó con las siguientes condiciones de operación:
 - Presión de operación en tramo Sala de compresores – Secador: 10 bar absolutos.
 - Presión de operación en tramo Secador - Acumuladores: 10 bar absolutos.
 - Presión en el anillo 1: 8,5 bar absolutos.

- Presión en el anillo 2: 9 bar absolutos.
 - Presión en bajadas de aire: 7 y 8 bar absolutos dependiendo de la presión requerida.
 - Temperatura del aire: 298,15 K (25 °C).
 - Viscosidad dinámica del aire: $1,82 \cdot 10^{-5}$ Pa·s.
- Se adoptó como criterio de diseño una pérdida de presión máxima admisible del orden de 1 bar entre la descarga del compresor y el punto más desfavorable, de modo de no comprometer la presión mínima requerida en equipos (\approx 8 bar).

2. Determinación de caudales de diseño por tramo

A partir de la contabilización de consumos neumáticos por equipos y bajadas de aire, se determinó:

- Caudal total de diseño: 1870 l/min

Luego se distribuyó este caudal por anillo:

- Anillo 1: 1500 l/min
- Anillo 2: 370 l/min

3. Definición de criterios de velocidad

De acuerdo con las recomendaciones técnicas para sistemas de aire comprimido, las velocidades máximas admisibles en líneas principales no deben superar el rango de 6 a 8 m/s, mientras que en ramales y bajadas de menor diámetro se permite un máximo de 10 a 12 m/s. Estos valores aseguran un flujo estable, evitan aceleraciones innecesarias del fluido y permiten mantener la caída de presión dentro del criterio de diseño fijado para la planta.

4. Cálculo del diámetro mínimo teórico por tramo

Tramo	Caudal [m ³ /s]	Velocidad máxima [m/s]	Diámetro mínimo [mm]
Sala compresores - Secador	0,0312	7	75,3
Secador - Estanques	0,0312	7	75,3
Anillo 1	0,0250	7	67,4
Anillo 2	0,0062	7	33,5

5. Selección de diámetros comerciales y verificación de velocidad

Tramo	Diámetro mínimo [mm]	Diámetro comercial [pulgada]	Velocidad [m/s]
Sala compresores - Secador	75,3	3	6,8
Secador - Estanques	75,3	3	6,8
Anillo 1	67,4	3	5,5
Anillo 2	33,5	2	3,0

Véase Anexo 13 y 14 para visión completa de los cálculos realizados.

7.4.2 Selección de materiales y accesorios

Los tramos Sala de compresores–Secador y Secador–Acumuladores se diseñaron con tubería de acero inoxidable AISI 316L, debido a su resistencia a la corrosión y su adecuado desempeño a presiones cercanas a 10 bar absolutos. Para los anillos y bajadas se seleccionó tubería de aluminio anodizado extruido, privilegiando su baja rugosidad, menor peso y facilidad de instalación.

Los accesorios (codos, tees, válvulas y reductores) se eligieron en materiales compatibles

con cada tramo, utilizando valores de pérdidas localizadas provenientes de catálogos técnicos.

7.4.3 Cálculo de pérdidas lineales

Tramo	Elemento	Cantidad	Largo [m]	Material	Caudal [m ³ /s]	Rugosidad [m]	ΔP [bar]
Sala compresores - Secador	Tubería recta 3"	1	48	AISI 316L	0,0312	2,E-05	0,02767
Secador - Estanques	Tubería recta 3"	1	56	AISI 316L	0,0312	2,E-05	0,03228
Anillo 1	Tubería recta 3" (anillo)	1	106	Aluminio extruido anodizado	0,0250	2,E-06	0,03185
Anillo 1	Tubería recta 1" (bajada)	11	6,5	Aluminio extruido anodizado	0,0005	2,E-06	0,00032
Anillo 1	Tubería recta 1" 1/4 (bajada)	4	6,5	Aluminio extruido anodizado	0,0059	2,E-06	0,00923
Anillo 2	Tubería recta 2" (anillo)	1	183	Aluminio extruido anodizado	0,0062	2,E-06	0,03237
Anillo 2	Tubería recta 1" (bajada)	13	9,6	Aluminio extruido anodizado	0,0004	2,E-06	0,00035
Anillo 2	Tubería recta 1/2" (bajada)	7	9,6	Aluminio extruido anodizado	0,0001	2,E-06	0,00139

Véase Anexo 17.

7.4.4 Cálculo de pérdidas en accesorios

Tramo	Elemento	ΔP [bar]
Sala compresores - Secador	Accesorios	0,00047
Secador - Estanques	Accesorios	0,00025
Anillo 1	Accesorios	0,00229
Anillo 2	Accesorios	0,00057

Véase Anexo 17.

7.4.5 Pérdidas de presión por tramo

Tramo	ΔP [bar]
Sala compresores - Secador	0,028
Secador - Estanques	0,033
Anillo 1	0,044
Anillo 2	0,035

Véase Anexo 17.

7.5 Instrumentación y seguridad

La propuesta de instrumentación considera la instalación de manómetros en cada acumulador y en puntos estratégicos de los anillos y bajadas de aire, con el fin de verificar en terreno las presiones de operación y detectar eventuales desviaciones respecto de los rangos de diseño y posibles fugas. Se considera la instalación de purgadores automáticos en los puntos bajos de la red para asegurar la eliminación continua de condensados y prevenir el ingreso de humedad a los equipos neumáticos.

En materia de seguridad, se incluyen válvulas de cierre manual en tramos principales y ramales críticos, facilitando el aislamiento de sectores ante mantenimientos o contingencias operativas

8. Evaluación económica y ciclo de vida

8.1 Estimación de costos de inversión (CAPEX)

Ítem	Cantidad	Precio unitario	Costo
Acumulador grande	1	\$2.890.000	\$2.890.000
Acumulador chico	1	\$2.450.000	\$2.450.000
Secador	1	\$7.069.950	\$7.069.950
Red y fittings	1	\$28.274.527	\$28.274.527
Purgadores acumuladores y secador	3	\$580.000	\$1.740.000
Purgadores de puntos bajos	3	\$580.000	\$1.740.000
FRL	4	\$184.000	\$736.000
Filtro coalescente	1	\$2.370.000	\$2.370.000
COSTO M.O. Y OTROS COSTOS INDIRECTOS		30%	\$14.181.143
TOTAL			\$61.451.620

8.2 Estimación de costos operacionales (OPEX) y ahorros proyectados

La evaluación económica operacional se estructuró considerando los costos anuales asociados al funcionamiento del nuevo sistema de aire comprimido y los ahorros derivados de la mejora en calidad del aire, reducción de presión y disminución de fugas. Los resultados se organizan en tres componentes: costo energético del secador, ahorro en mantenimiento y ahorro energético del compresor.

1. Costo operativo del secador

El secador seleccionado presenta un consumo eléctrico anual estimado en \$1.473.938 CLP, valor calculado a partir de su potencia nominal, horas anuales de operación y el costo promedio del kWh para la planta. Este costo constituye el principal componente del OPEX directo incorporado al nuevo sistema.

2. Ahorros en mantenimiento

La incorporación del secador y la mejora del sistema de distribución permiten reducir significativamente el ingreso de humedad al sistema neumático. Esto extiende la vida útil de cilindros, válvulas y equipos auxiliares, disminuyendo tanto fallas como reemplazos preventivos.

A partir del análisis histórico de gastos en repuestos se determinaron los siguientes ahorros:

Ítem	Costo actual	% Ahorro	Ahorro Anual
Cambios por fallas	\$17.346.625	30%	\$ 5.203.987
Cambios preventivos	\$15.606.639	40%	\$ 6.242.655
TOTAL			\$11.446.643

3. Ahorro energético por reducción de presión y disminución de fugas

La mayor eficiencia del sistema permite operar la red a una presión promedio 0,9 bar inferior. Conforme a parámetros internacionalmente aceptados, cada bar de reducción equivale a un ahorro aproximado de 7–8% del consumo energético del compresor. Para este análisis se adoptó un valor conservador de 7,2% de ahorro.

Adicionalmente, la mejora en la red proyecta una disminución de fugas del 10%, valor coherente con la literatura para sistemas sometidos a renovación parcial.

Costo actual energía	Reducción	Reducción presión de	% Ahorro	Ahorro Anual
----------------------	-----------	----------------------	----------	--------------

compresor	Fugas	funcionamiento		
\$31.030.272	10%	7,2%	17,2%	\$ 5.337.207

A este flujo se le resta el consumo anual estimado del secador lo que resulta en un ahorro anual de \$3.863.269 en costos de energía eléctrica.

8.3 Flujo de caja y horizonte de evaluación

El análisis económico del proyecto se desarrolló mediante la construcción de un flujo de caja con un horizonte de evaluación de 10 años, considerando como desembolso inicial la inversión total requerida para la implementación del nuevo sistema de aire comprimido. Para la actualización de los flujos futuros se aplicó una tasa de descuento del 10%, valor coherente con la práctica industrial para proyectos de activos productivos con riesgo acotado y vida útil superior a una década.

Ítem	0	1	2	...	10
Inversión inicial	-\$61.451.620			...	
Ahorro energético		\$3.863.269	\$3.863.269	...	\$3.863.269
Ahorro mantenimiento		\$11.446.643	\$11.446.643	...	\$11.446.643
Flujo neto	-\$61.451.620	\$15.309.912	\$15.309.912	...	\$15.309.912

Flujo Neto					
Acumulado	-\$61.451.620	-\$46.141.708	-\$30.831.796	...	\$91.647.498

Véase completo en Anexo 20.

8.4 Indicadores financieros (VAN, TIR, Payback)

VAN	TIR	Payback [años]
\$32.621.161	21%	4,0

Tabla 1: Resumen de principales indicadores económicos. Elaboración propia.

A partir del flujo de caja proyectado a 10 años y utilizando una tasa de descuento del 10%, se obtuvieron los indicadores financieros del proyecto. El Valor Actual Neto (VAN) asciende a \$32.621.161 CLP, reflejando que los beneficios descontados superan ampliamente la inversión inicial. La Tasa Interna de Retorno (TIR) es del 21%, superior a la tasa de descuento utilizada, lo que confirma la conveniencia económica de la iniciativa. El periodo de recuperación (Payback) se estima en 4,0 años, concordante con la magnitud de los flujos netos anuales. Estos resultados evidencian que el proyecto es financieramente viable y genera valor durante su vida útil prevista.

8.5 Análisis de sensibilidad (energía, horas de operación, tasa de descuento)

Variable	Escenario	VAN [CLP]	TIR	Payback [años]
Precio Energía	-10%	\$30.247.349	20,5%	4,12
Precio Energía	Base	\$32.621.161	21,3%	4,01
Precio Energía	+10%	\$34.994.972	22,1%	3,92
Horas de operación	-20%	\$27.873.538	19,8%	4,23
Horas de operación	Base	\$32.621.161	21,3%	4,01
Horas de operación	+20%	\$37.368.784	22,8%	3,82
Tasa descuento	8%	\$41.279.135	21,3%	4,01
Tasa descuento	10%	\$32.621.161	21,3%	4,01
Tasa descuento	12%	\$25.052.796	21,3%	4,01

Tabla 2: Análisis de Sensibilidad. Elaboración propia.

El análisis de sensibilidad presenta un comportamiento coherente de los indicadores financieros frente a las variaciones en las tres variables críticas del modelo: precio de la energía, horas de operación y tasa de descuento. Los resultados permiten evaluar la robustez del proyecto y la magnitud del riesgo económico asociado a cada parámetro.

1. Sensibilidad al precio de la energía

La variación en el costo del kWh muestra un efecto directo y proporcional sobre los beneficios energéticos del proyecto. Cuando el precio disminuye en un 10%, el VAN cae a \$30.247.349 CLP, mientras que un aumento del 10% eleva el VAN a \$34.994.972 CLP. La TIR oscila entre 20,5% y 22,1%, en línea con la magnitud del ahorro energético proyectado. El Payback varía levemente entre 4,12 y 3,92 años, lo que demuestra que la rentabilidad del proyecto se mantiene sólida aun en escenarios adversos de precios eléctricos.

2. Sensibilidad a las horas anuales de operación

La variación en las horas de funcionamiento del sistema afecta directamente el consumo base del compresor y, por ende, el ahorro energético anual. Con una reducción del 20% en las horas, el VAN disminuye a \$27.873.538 CLP y la TIR baja a 19,8%, extendiendo el Payback a

4,23 años. En contraste, un aumento del 20% en horas operativas eleva el VAN a \$37.368.784 CLP, con una TIR de 22,8% y un Payback reducido a 3,82 años. Esto confirma que las horas de operación constituyen una variable relevante, aunque el proyecto conserva VAN positivo en todo el rango analizado.

3. Sensibilidad a la tasa de descuento

La tasa de descuento muestra el impacto más significativo sobre el VAN, tal como es esperable en proyectos con flujos constantes en el tiempo. Con una tasa del 8%, el VAN asciende a \$41.279.135 CLP, mientras que al aumentar la tasa al 12%, el VAN disminuye a \$25.052.796 CLP. La TIR permanece constante en torno a 21,3%, ya que este indicador depende del flujo y no del descuento aplicado. El Payback, al no incorporar actualización de flujos, también permanece invariable. Esto confirma que la viabilidad económica es robusta incluso frente a tasas de descuento superiores a las normalmente empleadas en proyectos industriales.

8.6 Evaluación de costo del ciclo de vida (LCC)

La evaluación del costo del ciclo de vida permite estimar el costo total de propiedad del sistema de aire comprimido durante su horizonte de operación. El LCC incorpora costos de inversión, costos de operación y costos de mantenimiento a lo largo del periodo definido. Para este estudio se adoptó un horizonte de 10 años, coherente con la vida útil técnica de los equipos principales y con el marco utilizado en la evaluación financiera del proyecto.

En el cálculo del LCC se consideran los siguientes costos: inversión inicial, energía y mantenimiento. Otros costos potenciales fueron evaluados, pero se excluyen explícitamente bajo criterios técnicos:

- 1) Los costos de ingeniería, instalación y puesta en marcha ya se encuentran incorporados

dentro del CAPEX mediante el ítem de “costos indirectos”.

- 2) La instalación se ejecutará durante el periodo de baja estacional de la planta, en el cual no existe producción, por lo que no se generan costos de oportunidad ni pérdidas productivas.
- 3) Los costos de monitoreo, inspecciones y controles se encuentran absorbidos por la estructura de costos operativos vigente.
- 4) Los equipos principales tienen una vida útil superior a 10 años, por lo que no se consideran costos de reemplazo dentro del horizonte de evaluación.
- 5) Tampoco se contabilizan costos de fin de vida, dado que el sistema permanecerá en operación más allá del periodo considerado.

La interpretación del análisis LCC debe considerar que, además de los costos directos evaluados, el sistema actual incorpora una serie de costos por ineficiencia o no confiabilidad que influyen en su desempeño económico real. Estos incluyen fallas recurrentes, desgaste prematuro de componentes y variaciones en la calidad del aire, pero también efectos operativos de mayor impacto, como detenciones no programadas, retrasos productivos y pérdidas de producción, elementos que generan costos adicionales a lo largo de la vida útil del sistema (Dziaduch, 2010).

Barberá et al. (2012) señalan que estos factores, aun cuando no se cuantifiquen explícitamente, incrementan de forma estructural los costos de operación y afectan la continuidad del proceso productivo. En contraste, la alternativa propuesta reduce estos riesgos al mejorar la estabilidad de presión, la calidad del aire y la confiabilidad del sistema, lo que implica una disminución de los costos por ineficiencia.

Así, los resultados del LCC deben interpretarse considerando que la alternativa mejorada no solo reduce costos energéticos y de mantenimiento, sino también el impacto económico asociado a las interrupciones y al menor desempeño confiable del sistema actual.

8.6.1. Costo del ciclo de vida del sistema actual

El sistema actual genera costos anuales derivados del consumo energético del compresor y del mantenimiento asociado a fallas y recambios preventivos.

- Costo energético anual actual:

$$C_{energía} = \$31.030.272 \text{ CLP/año}$$

- Costo de mantenimiento anual actual:

Cambios por fallas: \$17.346.625

Cambios preventivos: \$15.606.639

$$C_{mantenimiento} = \$31.953.264 \text{ CLP/año}$$

Además de estos costos, las fallas del sistema actual producen detenciones no planificadas, reducción de la capacidad productiva y destrucción del negocio. Esto se traduce en costos por ineficiencia que no se considerarán en el análisis debido a la falta de datos para estimarlos correctamente y a que el foco del rediseño apunta a los ahorros energéticos y de mantenimiento ya considerados.

- El costo total del sistema actual a 10 años es:

$$LCC_{actual} = 10 \times (31.060.272 + 32.953.264)$$

$$LCC_{actual} = \$639.835.360 \text{ CLP}$$

8.6.2. Costo del ciclo de vida del sistema rediseñado

El proyecto introduce un secador, una red renovada y mejoras en la calidad del aire que reducen el ingreso de humedad y las fugas, lo que se refleja en menores costos energéticos y de mantenimiento.

- Inversión inicial:

$$C_{inversión} = \$61.451.620 \text{ CLP}$$

- Costo energético anual mejorado:

Ahorro energético total corresponde a un 17,2% correspondiente a un 10% por reducción de fugas y un 7,2% por reducción de la presión de operación.

$$C_{energía\ nuevo} = 31.030.272 \times (1 - 0.172)$$

$$C_{energía\ nuevo} = \$25.693.065 \text{ CLP/año}$$

- Costo de mantenimiento anual mejorado:

-30% ahorro en cambios por fallas: \$5.203.987

-40% ahorro en mantenimiento preventivo: \$6.242.655

$$C_{mant\ nuevo} = 31.953.264 - 5.203.987 - 6.242.655$$

$$C_{mant\ nuevo} = \$21.506.621 \text{ CLP/año}$$

Tal como se mencionó en el punto 8.6.1, se suman a los costos ya mencionados los relativos a costos por ineficiencia. Debido a la mejora proyectada en la confiabilidad del sistema se tendrá un ahorro extra causado por la disminución de detenciones no programadas a causa de

fallas en el sistema neumático y, por tanto, menores costos por ineficiencia. Este ahorro extra no se considerará dentro del análisis cuantitativo, pero se debe tener en cuenta al momento de evaluar la factibilidad económica del proyecto.

- El costo total del sistema mejorado a 10 años es:

$$LCC_{nuevo} = 61.451.620 + 10 \times (25.693.065 + 21.506.621)$$

$$LCC_{nuevo} = \$533.448.480 \text{ CLP}$$

El proyecto reduce el costo total de propiedad del sistema en aproximadamente \$106.000.000 CLP durante el horizonte de 10 años, equivalente a una disminución del 16,6% respecto del sistema actual. Este resultado confirma que las mejoras propuestas no solo generan beneficios económicos anuales (ahorros energéticos y de mantenimiento), sino que además disminuyen de manera sustancial los costos estructurales del sistema de aire comprimido a lo largo de su ciclo de vida útil.

El análisis demuestra que la inversión inicial se compensa ampliamente con los ahorros acumulados y que la solución propuesta constituye una alternativa económicamente favorable y sostenible en el largo plazo.

9. Conclusiones y recomendaciones

9.1 Conclusiones técnicas

El análisis integral del sistema de aire comprimido de AquaChile Planta Cardonal evidencia que la infraestructura actual presenta deficiencias estructurales, operativas y normativas que comprometen la confiabilidad, eficiencia energética y calidad del aire suministrado. Los hallazgos más relevantes indican la existencia de estanques acumuladores con corrosión avanzada y sin certificación conforme a ASME Sección VIII, ausencia de secado y filtración en etapas, configuración heterogénea y obsoleta de la red de distribución, presencia de fugas, acumulación de condensado y caídas de presión que impactan directamente el desempeño de maquinaria crítica del proceso.

El compresor principal GA75VSD FF opera con capacidad suficiente para cubrir la demanda, pero su funcionamiento continuo y sin redundancia genera un riesgo elevado de indisponibilidad operacional. Las fallas detectadas en actuadores neumáticos, la oxidación interna y los reemplazos frecuentes de cilindros confirman que el sistema actual no garantiza los requisitos mínimos de calidad del aire definidos por ISO 8573-1 ni los estándares sanitarios de NCh 2861 aplicables a plantas de proceso alimentario.

El rediseño propuesto, basado en dos anillos independientes alimentados por estanques acumuladores normados, una línea principal en acero inoxidable 316L y anillos en aluminio anodizado, permite resolver las limitaciones estructurales identificadas al mejorar el equilibrio hidráulico, reducir las pérdidas de carga totales y asegurar la presión mínima de servicio en los puntos más desfavorables. Los cálculos hidráulicos demuestran que las caídas de presión se mantienen por debajo de 0,1 bar por tramo principal y bajo los límites recomendados para redes industriales.

La incorporación de un secador refrigerativo FD260 VSD, filtración coalescente en

etapas y purgadores automáticos con tecnología de descarga sin pérdida garantiza un suministro de aire con punto de rocío estable y libre de humedad arrastrada, condición fundamental para prolongar la vida útil de los actuadores y reducir fallas. La estandarización de materiales, la instalación de válvulas de aislamiento y la sectorización del sistema mejoran la mantenibilidad y la seguridad operativa conforme a ASME B31.3, ISO 4414 y DS N°10/2012.

En síntesis, el rediseño propuesto entrega un sistema normativamente conforme, energéticamente más eficiente, estructuralmente confiable y apto para las exigencias del entorno alimentario, superando de manera integral las limitaciones observadas en el diagnóstico.

9.2 Conclusiones económicas

La evaluación económica demuestra que la alternativa de rediseño presenta una rentabilidad positiva y una reducción significativa del costo total de propiedad (LCC) del sistema neumático. El proyecto requiere una inversión inicial (CAPEX) de \$61.451.620 CLP, compuesta por acumuladores certificados, secador refrigerativo, nueva red de distribución, filtros, purgadores e instalaciones asociadas.

El análisis de OPEX evidencia que el sistema mejorado disminuye los costos de mantenimiento anuales debido a la reducción de fallas en cilindros y componentes neumáticos, alcanzando un ahorro consolidado estimado de \$11.446.643 CLP por año. Asimismo, la disminución de fugas y la operación a una presión promedio 0,9 bar menor producen un ahorro energético equivalente al 17,2% del consumo eléctrico del compresor, descontando el costo anual de operación del secador.

Respecto a los Costos de Ineficiencia, la mejora en la confiabilidad del sistema disminuye las paradas no programadas y las bajas en productividad a causa de fallas en la red neumática, que si bien tiene impacto en los ahorros anuales, no se compara con los ya

mencionados en mantenimiento y energía.

El flujo de caja proyectado a 10 años muestra flujos netos anuales del orden de \$15,3 millones, con un Valor Actual Neto (VAN) de \$32.621.161 CLP y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 21%, superior a la tasa de descuento utilizada (10%). El periodo de recuperación simple se estima en 4 años, valor consistente con proyectos industriales de eficiencia energética.

El análisis de sensibilidad confirma la robustez económica del proyecto ante variaciones en el precio de la energía, las horas de operación y la tasa de descuento. En todos los escenarios simulados, el VAN permanece positivo y la TIR se mantiene sobre el mínimo aceptable, evidenciando que la inversión conserva su conveniencia incluso bajo condiciones adversas.

Finalmente, el análisis de costo del ciclo de vida (LCC) indica que el proyecto reduce aproximadamente un 16,6% del costo total de propiedad en comparación con el sistema actual, equivalente a una disminución acumulada cercana a \$106 millones durante el horizonte evaluado.

En conjunto, los resultados económicos son concluyentes: la alternativa propuesta es rentable, reduce costos estructurales, disminuye riesgos operativos y genera ahorros progresivos significativos para la planta.

9.3 Recomendaciones de implementación

La implementación del nuevo sistema de aire comprimido debe ejecutarse bajo un enfoque secuencial y controlado que asegure la continuidad operativa de la planta y el cumplimiento de los estándares técnicos y normativos definidos. Se recomienda iniciar con la sustitución de los equipos críticos: acumuladores certificados ASME, secador FD260 VSD y filtración coalescente, debido a su impacto directo en la confiabilidad y en la calidad del aire suministrado. La incorporación de los estanques acumuladores nuevos debe realizarse posterior

a la certificación y prueba hidrostática, asegurando el cumplimiento del DS N°10/2012.

La instalación de la red de distribución en acero inoxidable y aluminio anodizado debe ejecutarse durante el periodo de baja productiva ya contemplado, evitando interferencias con las líneas activas y mitigando riesgos operacionales. En este proceso se deben respetar las pendientes de diseño, la ubicación estratégica de los purgadores automáticos y la correcta colocación de válvulas de aislamiento, garantizando accesibilidad y mantenibilidad. El desmontaje de tuberías deterioradas, uniones en PVC, mangueras transitorias y accesorios corroídos debe realizarse antes de la puesta en servicio del nuevo anillo.

Una vez concluida la instalación mecánica, se recomienda realizar pruebas de presión y estanqueidad conforme a ASME B31.3, asegurando que las caídas de presión no superen los valores obtenidos en el diseño hidráulico. El sistema debe verificarse adicionalmente en condiciones de carga variable para validar la estabilidad de presión en los puntos más alejados de los anillos.

Finalmente, se recomienda efectuar un mantenimiento mayor al compresor GA75VSD FF con el fin de asegurar su condición operativa como equipo principal. La reactivación del compresor GA75P como respaldo debe realizarse únicamente cuando se completen las correcciones pendientes y se implemente un sistema básico de secuenciación o coordinación operativa que evite sobrepresiones o ciclos ineficientes.

9.4 Propuestas de mejora continua y monitoreo

Las mejoras introducidas por el proyecto deben complementarse con un sistema permanente de monitoreo y gestión que garantice la eficiencia energética y operacional del sistema a largo plazo. Se recomienda incorporar medición digital de presión y caudal en los puntos estratégicos de la red, de modo que la planta cuente con una línea base energética y

operativa conforme a ISO 11011. Esta instrumentación permitiría detectar caídas de presión, sobreconsumo y fugas incipientes, mejorando la capacidad de diagnóstico y reduciendo costos de mantenimiento.

Se sugiere implementar programas periódicos de inspección y limpieza de filtros coalescentes, verificación de punto de rocío y control del estado de los purgadores automáticos, ya que estos elementos inciden directamente en la vida útil de cilindros y válvulas. La ejecución sistemática de estos controles debe integrarse al plan de mantenimiento preventivo existente, registrando valores de presión, consumo y reemplazos para generar trazabilidad técnica.

También se recomienda establecer un programa formal de detección y reparación de fugas al menos una vez por trimestre, empleando dispositivos ultrasónicos o monitoreo comparativo de caudal. Esta medida, sustentada en el diagnóstico previo, permite mantener las pérdidas bajo niveles controlados y optimizar la energía demandada por el compresor.

Finalmente, el sistema debe avanzar gradualmente hacia un esquema de supervisión centralizada mediante PLC o plataforma SCADA, permitiendo gestionar alarmas, registrar tendencias y facilitar el mantenimiento predictivo. La integración futura de un módulo de secuenciación o control inteligente de compresores permitiría complementar las mejoras actuales y asegurar un desempeño estable, energético y técnicamente robusto durante la vida útil del sistema.

10. Anexos

10.1 Fichas técnicas de equipos actuales y propuestos

-BAADER 581 (fileteadora):

Aire comprimido	
- Acometida	: 3/8" (diámetro interior de manguera de 13 mm)
- Presión de servicio	: 6 bar
- Consumo	: 12 l/min
- Calidad	: ISO 8573-1, clase 7.4.3 - ver apartado 16

Anexo 1: Extracto de ficha técnica de BAADER 581 (1/2)

16 Calidad del aire comprimido

16.1 Exigencias

- según DIN ISO 8573-1, clase 7.4.3 (apartado 16.2)
- preparado sin medios agresivos
- Temperatura del aire comprimido: +5°C a +50°C (41°F a 122°F)
- Temperatura de entorno (unidad de mantenimiento, purgador del agua de vapor automático): +5°C a +50°C (41°F a 122°F)
- Temperatura de entorno (unidad de mantenimiento, purgador del agua de vapor manual): -10°C a +50°C (14°F a 122°F)
- Presión de toma (unidad de mantenimiento): máx. 12 bares (174 psi)



Fundamentalmente las máquinas BAADER están dimensionadas para la clase de contenido de aceite 3.

De operar, no obstante, una instalación con aire comprimido oleaginoso (>10mg/m3), hay que continuar alimentándola con aire comprimido oleaginoso.

¡La aplicación de aceite¹⁾ (>10mg/m3) conduce a "lixiviar" la lubricación de vida útil necesaria para el servicio con aire comprimido conteniendo poco aceite!

El **punto de rocío de la presión** es la determinación de la temperatura a la que puede enfriarse el aire comprimido, sin que condense el vapor de agua contenido en ella. El punto de rocío de la presión varía con la presión de aire.

¹⁾ ¡Observar la admisibilidad de productos alimenticios (H1)!

Anexo 2: Extracto de ficha técnica de BAADER 581 (2/2)

-BAADER 518 (volteadora):

Compressed air	
- connection	: D = 10 mm (inner hose diameter 7 mm)
- working pressure	: 2.5 bar max.
- consumption	: approx. 5 Liter/min
- quality	: ISO 8573-1, class 7.4.3 - cf. section 14 -

Anexo 3: Extracto de ficha técnica de BAADER 518

-BAADER 988:

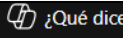

Aire comprimido	
- acometida:	¾" (diámetro interior de la manguera 19 mm)
- presión de servicio:	6,0 bares (bloque de válvulas) o bien 4,5 bares (motores de aire comprimido)
- consumo:	400 - 1600 l/min (aire descomprimido, según la cantidad de herramientas - un motor de aire comprimido gasta 200 l/min, aprox.)
- calidad:	ISO 8573-1, clase 7.4.3 - véase párrafo 14 -

Anexo 4: Extracto de ficha técnica de BAADER 988

-MULTIVAC:

<p>Aire comprimido Consumo aprox. 2.500 lt/min, a una presión constante de 7 bar, aire limpio y seco</p>

Anexo 5: Extracto de ficha técnica de Selladora Continua R-535 (MULTIVAC) (1/2)

Aire comprimido		
Presión máx. de entrada	10 bar	
Presión mín. de entrada	7 bar	
Presión del sistema	7 bar	
Presión efectiva Calentar lámina	1 bar a 2 bar	
16.07.2012		177
		
Aire comprimido		
Presión efectiva Formado	1 bar a 2 bar	
Presión efectiva Soldadura	6 bar	
Diámetro interno del tubo de acometida	De 3/4 " a 1 "	
Contenido máx. de aceite sobrante	0,01 mg/m ³	
Grado máx. de humedad	6 g/m ³	
Tamaño máx. de partículas	0,1 µm	
Densidad máx. de partículas	0,1 mg/m ³	
Temperatura de entrada*	15 °C	
* Si en la red de aire comprimido existen temperaturas inferiores a 3 °C, es preciso utilizar un secador de adsorción.		

Anexo 6: Extracto de ficha técnica de Selladora Continua R-535 (MULTIVAC) (2/2)

-I-CUT 130:

Consumo:	
131009SPA-5	
I-Cut 130 Manual del Usuario	
Consumo eléctrico	8 kW
Agua	½ pulgada, 0-5 l/mn
Consumo de aire, soporte de producto activo	0 l/mn
Consumo de aire, TrimSort	0,32 l/recorrido de 50 mm de longitud adelante y atrás de 6 bares

Anexo 7: Extracto de ficha técnica I-CUT 130

-MARELEC (balanza dinámica):

- **Compressed air**
The **compressed** air used for the pockets has to be dry (max dew point must be. 10° below ambient temperature). Install a **compressed** air dryer to prevent that water comes into cylinders or valve terminals.

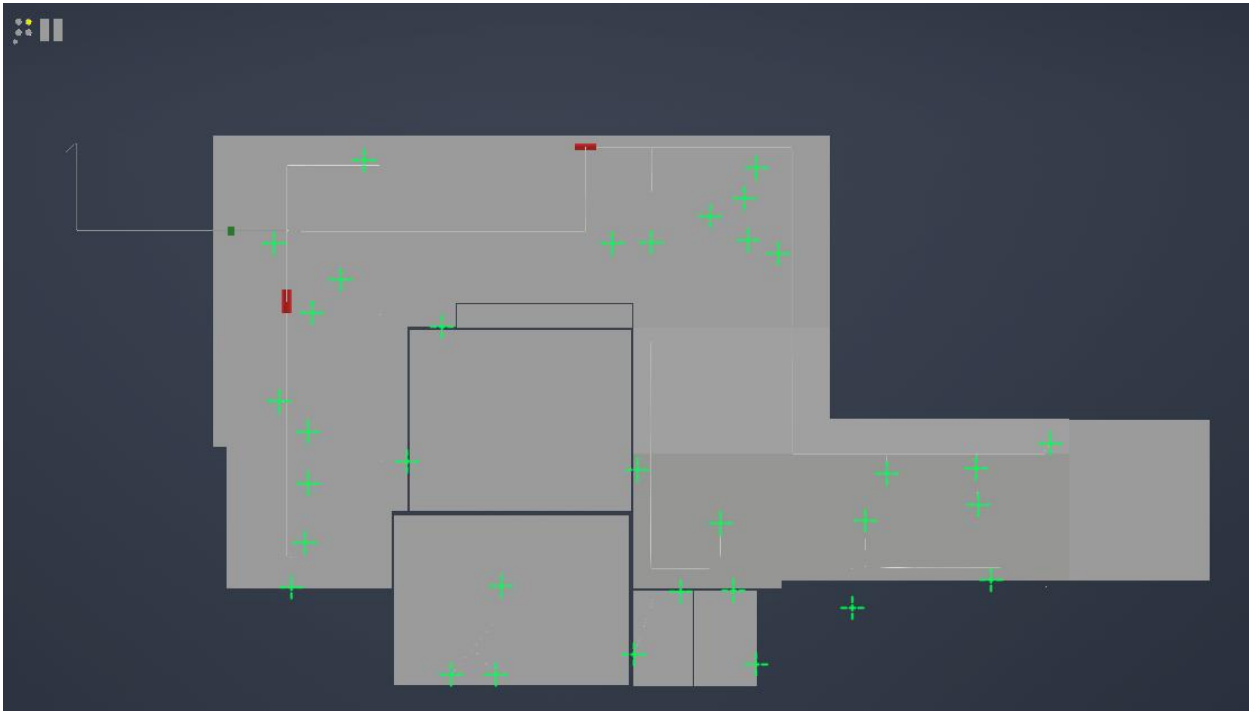
Anexo 8: Extracto de ficha técnica Balanza dinámica Marelec

-Secador Frigorífico FD 260 VSD

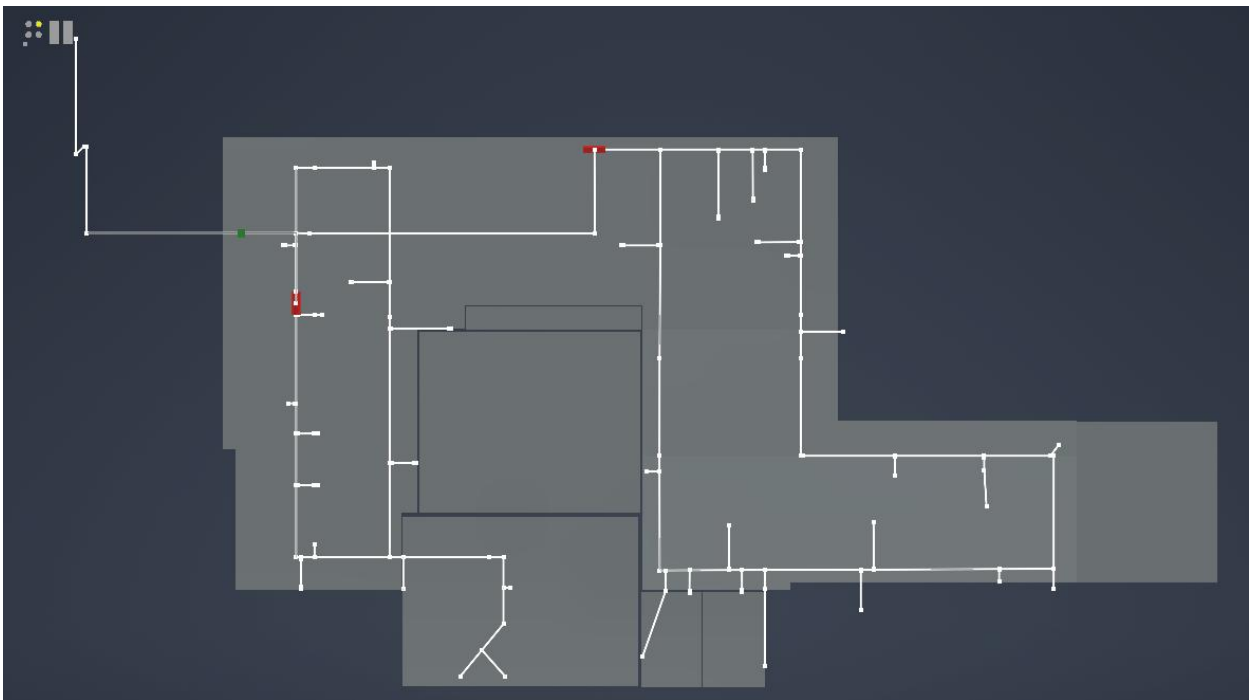
Technical specifications FD VSD 100-300																		
Model	Maximum inlet conditions at full flow (ambient/ inlet)	Inlet flow with a pressure dew point of 3°C/37.4°F		Pressure drop at full flow		Power consumption		Max. working pressure		Compressed air connections	Dimensions						Weight	
		°C	l/s	cfm	bar	psi	kW	hp	bar		psi	Length		Width		Height		kg
FD 100 VSD	46	100	212	0.16	2.3	0.66	0.90	14.5	210	G 1 1/2 F (NPT for UL version)	805	31.69	962	37.87	1040	41	130	287
FD 140 VSD	46	140	297	0.11	1.6	1.04	1.41	14.5	210	G 2 F (NPT for UL version)	805	31.69	962	37.87	1040	41	130	287
FD 180 VSD	46	180	381	0.18	2.6	1.54	2.09	14.5	210	G 2 F (NPT for UL version)	805	31.69	962	37.87	1040	41	134	295
FD 220 VSD	46	220	466	0.14	2	1.77	2.41	14.5	210	G 2 1/2 F (NPT for UL version)	805	31.69	962	37.87	1040	41	143	315
FD 260 VSD	46	260	551	0.1	1.5	1.9	2.58	14.5	210	G 2 1/2 F (NPT for UL version)	805	31.69	962	37.87	1040	41	150	331
FD 300 VSD	46	300	636	0.18	2.6	2.64	3.59	14.5	210	G 2 1/2 F (NPT for UL version)	805	31.69	962	37.87	1040	41	165	364

Anexo 9: Extracto de catálogo de secadores con especificaciones técnicas

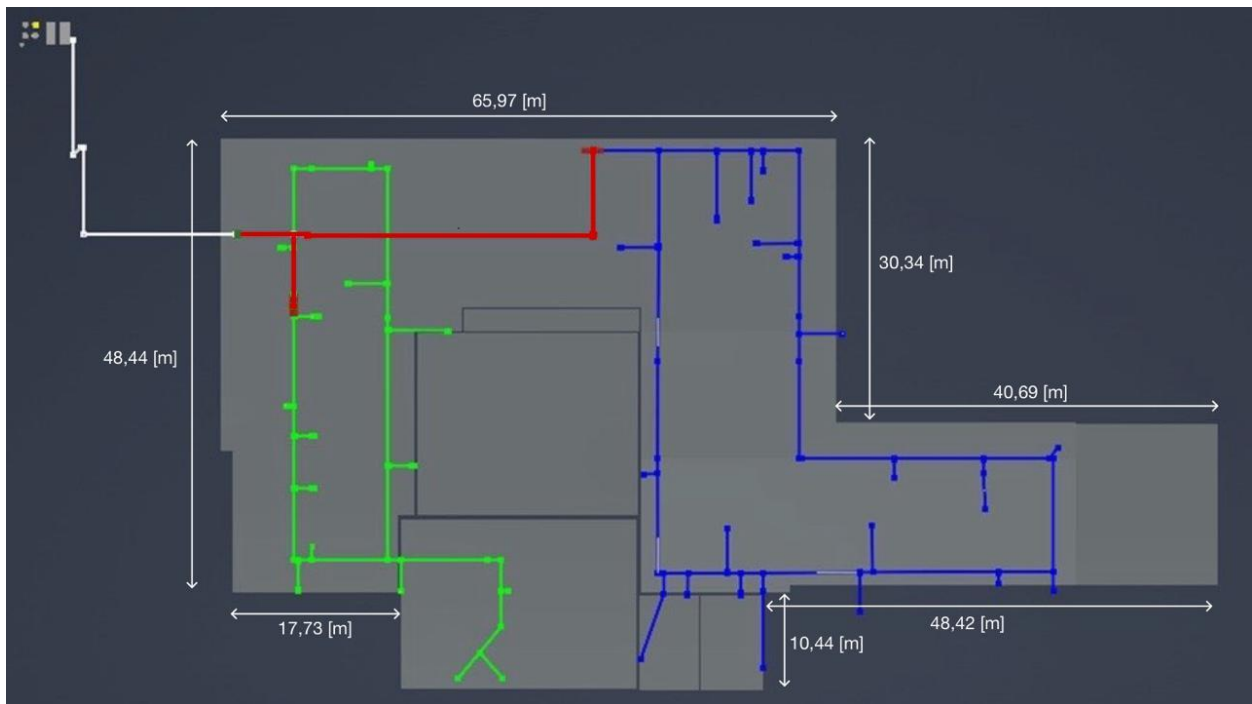
10.2 Planos de distribución del sistema propuesto



Anexo 10: Vista superior de modelo 3D con ubicación de las bajadas de aire



Anexo 11: Vista superior de modelo 3D con diseño de red propuesta



Anexo 12: Vista superior de modelo 3D con tramos identificados por colores

10.3 Cálculos hidráulicos y de eficiencia energética

BAJADA	PRESION	CAUDAL pres [l/min]	ÁREA mínimo [mm ²]	DIÁMETRO MIN [mm]	Diámetro mínimo [inch]	tubería seleccionada [inch]	tubería seleccionada [mm]	v
13	6 bar	0,32	0,76	0,985	0,039 1"		25,4	0,01
9	7 bar	357	661	29	1,142 1" 1/4		31,75	7,52
20	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
21	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
34+15+25	6 bar	340	630	28	1,115 1" 1/4		31,75	7,16
12	0,5 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
33	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
32	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
31	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
11	7 bar	357	661	29	1,142 1" 1/4		31,75	7,52
30	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
10	7 bar	357	661	29	1,142 1" 1/4		31,75	7,52
ANILLO 1	7,5 bar	1500,00	3571	67	2,655 3"		76,2	5,48
34+15+25	34 6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
	15 6 bar	170	405	23	0,894 1"		25,4	5,59
	25 6 bar	170	405	23	0,894 1"		25,4	5,59

Anexo 13: Cálculos para dimensionamiento de tuberías Anillo 1
























BAJADA	PRESION	CAUDAL pres [l/min]	ÁREA mínimo [mm ²]	DIÁMETRO MIN [mm]	Diámetro mínimo [inch]	tubería seleccionada [inch]	tubería seleccionada [mm]	v
16	6 bar	13	32	6	0,250 1"		25,4	0,44
17	6 bar	13	32	6	0,250 1"		25,4	0,44
19	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
7	6 bar	17	40	7	0,283 1/2"		12,7	2,24
18	6 bar	13	32	6	0,250 1"		25,4	0,44
4	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
3	6,6 bar	9	21	5	0,202 1/2"		12,7	1,14
2	6 bar	9	21	5	0,202 1/2"		12,7	1,14
1	6 bar	2	4	2	0,088 1/2"		12,7	0,22
24	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
5	8 bar	9	21	5	0,202 1/2"		12,7	1,14
23	6 bar	7	16	4	0,177 1/2"		12,7	0,88
26	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
22	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
6	8 bar	9	21	5	0,202 1/2"		12,7	1,14
28	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
27	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
29	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
8	6 bar	270	643	29	1,126 1"		25,4	8,88
14	6 bar	0	0	0	0,000 1"		25,4	0
ANILLO 2	8,5 bar	370,00	685	30	1,163 2"		50,8	3,04

Anexo 14: Cálculos para dimensionamiento de tuberías Anillo 2

Tabla No 6 Pérdida de carga en válvulas de diferentes diá Ha= K (V²/2g)

Pulg	Válvula de compuerta						Válvula de Bola						Válvula de Mariposa						
	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"
K	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.12	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.86	0.81	0.81	0.77	0.68
D (mm)	30.40	44.60	57.40	69.50	84.60	108.70	160.10	30.40	44.60	57.40	69.50	84.60	108.70	160.10	57.40	69.50	84.60	108.70	160.10
Q l/s																			
0.250	0.001																		
0.500	0.004	0.001						0.002							0.002	0.001			
0.750	0.010	0.002	0.001					0.004	0.001						0.004	0.002	0.001		
1.000	0.017	0.003	0.001					0.007	0.001						0.007	0.003	0.001		
1.250	0.027	0.005	0.002	0.001				0.011	0.002	0.001					0.010	0.004	0.002	0.001	
1.500	0.039	0.007	0.003	0.001	0.001			0.015	0.003	0.001					0.015	0.006	0.003	0.001	
1.750	0.053	0.010	0.004	0.002	0.001			0.021	0.004	0.001	0.001				0.020	0.009	0.004	0.001	
2.000	0.070	0.013	0.005	0.002	0.001			0.027	0.005	0.002	0.001				0.026	0.012	0.005	0.002	
2.250	0.088	0.016	0.006	0.003	0.001			0.034	0.006	0.002	0.001				0.033	0.015	0.007	0.002	
2.500	0.109	0.020	0.007	0.003	0.001	0.001		0.042	0.008	0.003	0.001	0.001			0.041	0.018	0.008	0.003	0.001
2.750	0.132	0.024	0.009	0.004	0.002	0.001		0.051	0.009	0.003	0.001	0.001			0.050	0.022	0.010	0.003	0.001
3.000	0.157	0.028	0.010	0.004	0.002	0.001		0.061	0.011	0.004	0.002	0.001			0.059	0.026	0.012	0.004	0.001
3.250	0.184	0.033	0.012	0.005	0.002	0.001		0.072	0.013	0.005	0.002	0.001			0.069	0.030	0.014	0.005	0.001
3.500	0.214	0.038	0.014	0.006	0.003	0.001		0.083	0.015	0.006	0.002	0.001			0.080	0.035	0.016	0.006	0.001
3.750	0.245	0.044	0.016	0.007	0.003	0.001		0.095	0.018	0.006	0.002	0.001			0.092	0.040	0.018	0.006	0.001
4.000	0.279	0.050	0.018	0.008	0.004	0.001		0.109	0.020	0.007	0.003	0.001			0.105	0.046	0.021	0.007	0.001
4.250	0.315	0.057	0.021	0.009	0.004	0.002		0.123	0.023	0.008	0.003	0.001	0.001		0.119	0.052	0.024	0.008	0.002
4.500	0.353	0.064	0.023	0.010	0.005	0.002		0.137	0.025	0.009	0.004	0.002	0.001		0.133	0.058	0.027	0.009	0.002
4.750	0.394	0.071	0.026	0.011	0.005	0.002		0.153	0.028	0.010	0.004	0.002	0.001		0.148	0.065	0.030	0.010	0.002
5.000	0.436	0.078	0.029	0.012	0.006	0.002		0.170	0.031	0.011	0.004	0.002	0.001		0.164	0.072	0.033	0.011	0.002
5.250	0.481	0.087	0.032	0.014	0.006	0.002		0.187	0.035	0.013	0.005	0.002	0.001		0.181	0.079	0.036	0.013	0.002
5.500	0.528	0.095	0.035	0.015	0.007	0.003		0.205	0.038	0.014	0.005	0.002	0.001		0.198	0.087	0.040	0.014	0.003
5.750	0.577	0.104	0.038	0.016	0.007	0.003	0.001	0.224	0.042	0.015	0.006	0.003	0.001		0.217	0.095	0.043	0.015	0.003
6.000	0.628	0.113	0.041	0.018	0.008	0.003	0.001	0.244	0.045	0.016	0.006	0.003	0.001		0.236	0.104	0.047	0.016	0.003

Anexo 15: Tabla de pérdida de carga en válvulas

Clase de resistencia alzada	Diámetros de las tuberías (") (mm)	3/8	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6
		10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150
	manguito de unión	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,15	0,20	0,25
	cono de reducción	0,20	0,30	0,50	0,65	0,85	1,00	1,30	2,00	2,30	3,00	4,00	5,00
	codo o curva de 45.º	0,20	0,34	0,43	0,47	0,56	0,70	0,83	1,00	1,18	1,25	1,45	1,63
	curva de 90.º	0,18	0,33	0,45	0,60	0,84	0,96	1,27	1,48	1,54	1,97	2,61	3,43
	codo de 90.º	0,38	0,50	0,63	0,76	1,01	1,32	1,71	1,94	2,01	2,21	2,94	3,99
	"te" de 45.º	1,02	0,84	0,90	0,96	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30
	"te" arqueada o de curvas ("pantalones")	1,50	1,68	1,80	1,92	2,40	3,00	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	6,60
	"te" confluencia de ramal (paso recto)	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20
	"te" derivación a ramal	1,80	2,50	3,00	3,60	4,10	4,80	5,00	5,50	6,20	6,90	7,70	8,90
	válvula retención de batiente de pistón	0,20	0,30	0,55	0,75	1,15	1,50	1,90	2,65	3,40	4,85	6,60	8,30
	válvula retención paso de escuadra	1,33	1,70	2,32	2,85	3,72	4,67	5,75	6,91	8,40	11,1	12,8	15,4
	válvula retención paso de escuadra	5,10	5,40	6,50	8,50	11,50	13,0	16,5	21,0	25,0	36,0	42,0	51,0
	válvula de compuerta abierta	0,14	0,18	0,21	0,26	0,36	0,44	0,55	0,69	0,81	1,09	1,44	1,70
	válvula de paso recto y asiento inclinado	1,10	1,34	1,74	2,28	2,89	3,46	4,53	5,51	6,69	8,80	10,8	13,1
	válvula de globo	4,05	4,95	6,25	8,25	10,8	13,0	17,0	21,0	25,0	33,0	39,0	47,5
	válvula de escuadra o ángulo (abierto)	1,90	2,55	3,35	4,30	5,60	6,85	8,60	11,1	13,7	17,1	21,2	25,5
	válvula de asiento de paso recto	—	3,40	3,60	4,50	5,65	8,10	9,00	—	—	—	—	—
	intercambiador	—	—	—	2,1	5	12,5	13,2	14,2	25	—	—	—
	radiador	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,75	6,50	7,00	7,50	8,00	10,00
	radiador con valvulería	3,75	4,40	5,25	6,00	6,75	7,50	8,80	10,10	11,40	12,70	14,00	15,00
	caldera	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,75	6,50	7,00	7,50	8,00	10,00
	caldera con valvulería	3,00	4,20	4,90	5,60	6,30	7,00	8,00	8,75	9,50	10,00	11,00	12,00
	contador general individual o divisionario	4,5 m.c.d.a. 10 m.c.d.a.											

Anexo 16: Tabla con pérdida de cargas en accesorios

	Elemento	diámetro [m]	Cantidad	Largo [m]	Caudal [m³/s]	rugosidad [m]	P[bar] abs	T[K]	Densidad [kg/m³]	v[m/s]	Reynolds	t	delta presion [bar]	h_acc[bar]	Caidas tramo [bar]	costo unitario	Costo total
TRAMO 1: SALA COMPRESOR- SECADOR	tubería recta acero 3"	0,0762	1	48	0,0312	0,000015	10	298,15	11,686	6,83	3,34.E+05	0,0161	0,02767		0,02813	300000	\$2.400.000
	codo 90	0,0762	6											4,1.E-04		40000	\$240.000
	codo 45	0,0762	1											5,2.E-05		20000	\$20.000
	Válvulas esfera 3"	0,0762	3											1,0.E-05		250000	\$750.000
TRAMO 2: SECADOR ACUMULADORES	tubería recta acero	0,0762	1	56	0,0312	0,000015	10	298,15	11,686	6,83	3,34.E+05	0,0161	0,03228		0,03253	300000	\$2.800.000
	codo 90	0,0762	3											2,0.E-04		40000	\$120.000
	Válvulas esfera 3"	0,0762	4											1,4.E-05		250000	\$1.000.000
	T3"	0,0762	1											3,5.E-05		49000	\$49.000
TRAMO 3: ANILLO 1 ACUMULADOR TUNEL	tubería recta aluminio 2"	0,0762	1	106	0,0250	0,0000015	8,5	298,15	9,933	5,48	2,28.E+05	0,0153	0,03185		0,04369	300000	\$5.300.000
	codo 90 3"	0,0762	7											2,5.E-04		40000	\$280.000
	codo 90 1"	0,0254	55											7,0.E-06		6000	\$330.000
	codo 90 1" 1/4	0,03175	17											6,4.E-04		8500	\$144.500
	Válvulas esfera 3"	0,0762	7											2,0.E-05		250000	\$1.750.000
	Válvulas esfera 1"	0,0254	11											1,8.E-05		15200	\$167.200
	Válvulas esfera 1" 1/4	0,03175	4											1,7.E-04		22890	\$91.560
	tubería recta 1"	0,0254	11	6,5	0,0005	0,0000015	7	298,15	8,181	1,02	1,16.E+04	0,0298	0,00032		100000	\$1.191.667	
	tubería recta 1" 1/4	0,03175	4	6,5	0,0059	0,0000015	8	298,15	9,349	7,43	1,21.E+05	0,0175	0,00923		120000	\$520.000	
	T3"		2											1,6.E-04		49000	\$98.000
	T3"-> 1"		11											7,6.E-04		57000	\$627.000
	T3"-> 1" 1/4		4											2,7.E-04		56000	\$224.000
	TRAMO 4: ANILLO 2 ACUMULADOR FILETE	tubería recta 2"	0,0508	1	183	0,0062	0,0000015	9	298,15	10,518	3,04	8,93.E+04	0,0185	0,03237		0,03468	190000
codo 90 2"		0,0508	9											1,1.E-04		15000	\$135.000
codo 90 1"		0,0254	52											4,1.E-05		6000	\$312.000
codo 90 1/2"		0,127	28											2,4.E-05		4000	\$112.000
Válvulas esfera 2"		0,0508	11											2,0.E-04		40600	\$446.600
Válvulas esfera 1"		0,0508	13											3,0.E-05		15200	\$197.600
Válvulas esfera 1/2"		0,127	7											1,6.E-05		5400	\$37.800
tubería recta 1"		0,0254	13	9,6	0,0004	0,0000015	7	298,15	8,181	0,85	9,70.E+03	0,0313	0,00035		100000	\$2.080.000	
tubería recta 1/2"		0,127	7	9,6	0,0001	0,0000015	7	298,15	8,181	1,13	6,44.E+03	0,0353	0,00139		48000	\$537.600	
T2"-> 1"			13											5,8.E-05		26000	\$388.000
T2"-> 1/2"			7											3,1.E-05		23000	\$161.000
T2"			1											5,0.E-05		19000	\$19.000
																	\$28.274.527

Anexo 17: Cálculos de pérdidas en cada tramo

10.4 Cotizaciones y presupuestos de proveedores

Fecha de cotización	Vencimiento	Vendedor	Contacto
05/11/2025	05/12/2025	ventas2@ditter.cl	+569 7143 2159

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPUESTOS	IMPORTE
[529150] MS4-LFR-1/4-D6-ERV-AS - UNIDAD DE FILTRO Y REGULADOR - FESTO	1,00 Unidades	155.425,00	IVA 19%	\$ 155.425
Subtotal				\$ 155.425
IVA 19%				\$ 29.531
Total				\$ 184.956

Anexo 18: Extracto de cotización de unidad FRL

Agradecemos su contacto y el interés en incluir nuestros servicios y costos en la estimación de su proyecto de tesis.

Adjuntamos la presente cotización con **valores netos estrictamente referenciales**:

- Estanque Acumulador 2000 lt.: USD 4.900 c/u.
- Filtros de línea (se requieren de 2 en cada línea): USD 200 c/u.
- Secador Frigorífico (capacidad 284 l/s): USD 7.500
- Purgador Temporizado (sugerido para cada filtro):USD 200 c/u
- Separador de Condensados: USD 250.

Anexo 19: Extracto de correo con cotización de componentes Dantechique

10.5 Tablas complementarias del análisis financiero y LCC

Ítem	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión inicial	-\$61.451.620										
Ahorro energético		\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269	\$3.863.269
Ahorro mantenimiento		\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643	\$11.446.643
Flujo neto	-\$61.451.620	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912	\$15.309.912
Flujo acumulado	-\$61.451.620	-\$46.141.708	-\$30.831.796	-\$15.521.884	-\$211.973	\$15.097.939	\$30.407.851	\$45.717.763	\$61.027.675	\$76.337.586	\$91.647.498

Anexo 20: Flujo de caja completo para 10 años

11. Referencias

- Aignep S.p.A. (2020). *Aluminum Piping Systems Catalogue*. Aignep.
- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2022). *Guía de eficiencia energética en sistemas de aire comprimido*. Gobierno de Chile.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2021). *ASME B31.3 – Process Piping*. ASME.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2021). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII – Pressure Vessels*. ASME.
- Atlas Copco AB. (2013). *Compressed Air Manual* (8th ed.). Atlas Copco.
- Atlas Copco AB. (2020). *FD Refrigerated Dryer Series – Product Data Sheet*. Atlas Copco.
- Atlas Copco AB. (2020). *GA VSD+ Oil-Injected Screw Compressor Series – Technical Specifications*. Atlas Copco.
- BAADER Group. (2018). *BAADER 518 Technical Data Sheet*. BAADER.
- BAADER Group. (2018). *BAADER 581 Technical Data Sheet*. BAADER.
- BAADER Group. (2018). *BAADER 988 Technical Data Sheet*. BAADER.
- Barberá, L., Crespo, A., Viveros, P., & Stegmaier, R. (2012). *Advanced model for maintenance management in a continuous improvement cycle: Integration into the business strategy*. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 3(1), 47–63.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2012). *Engineering Economy* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Bolton, W. (2021). *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering* (8th ed.). Pearson Education.
- British Retail Consortium (BRCGS). (2020). *Global Standard for Food Safety*. BRCGS.

- Camozzi Automation S.p.A. (2021). *Air Treatment Units FRL – Product Guide*. Camozzi Automation.
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (2022). *Informe anual de desempeño energético sector industrial*. CNE.
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (2024). *Reporte de precios de energía eléctrica en Chile*. CNE.
- DOE / Oak Ridge National Laboratory. (2012). *Compressed Air Sourcebook for Industry*. U.S. Department of Energy.
- Dziaduch, I. (2010). *Unreliability costs in Life Cycle Cost Analysis (LCCA) – Comparison of calculation methods*. Summer Safety and Reliability Seminars (SSARS), 75–82.
- European Compressed Air Society (EUCAS). (2020). *Energy Efficiency in Compressed Air Systems*. EUCAS.
- Festo AG & Co. KG. (2021). *DSNU Standard Cylinder Series – Technical Documentation*. Festo.
- Gitman, L., & Zutter, C. (2015). *Principles of Managerial Finance* (14th ed.). Pearson.
- Hydraulic & Pneumatic Technical Institute. (2017). *Pneumatic Systems: Principles and Maintenance*. Industrial Press.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2020). *NCh 2861:2020 – Sistemas de aire comprimido para uso alimentario*. INN.
- International Energy Agency. (2020). *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals and Practices*. IEA.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). *ISO 14040:2006 – Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). *ISO 14044:2006 –*

Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2008). *ISO 15686-5: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing.* ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2010). *ISO 4414:2010 – Pneumatic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components.* ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2010). *ISO 8573 (Partes 1-9):2010 – Compressed air — Contaminants and purity classes.* ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2012). *ISO 1217:2012 – Displacement compressors — Acceptance tests.* ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2013). *ISO 11011:2013 – Compressed air — Energy efficiency — Assessment.* ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2014). *ISO 50002:2014 – Energy audits — Requirements with guidance for use.* ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2014). *ISO 50006:2014 – Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines and energy performance indicators.* ISO.

International Organization for Standardization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 — General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.* ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 22000:2018 – Food safety management systems.* ISO.

Kaeser Kompressoren SE. (2018). *Compressed Air Engineering Manual.* Kaeser.

Keller, R. (2018). *Compressed Air Systems: A Guidebook on Energy and Cost Savings.* Springer.

- Mackay, J. (2014). *Industrial Compressed Air Systems: Energy Efficiency and Optimization*. Elsevier.
- Marelec Food Technologies. (2019). *Dynamic Weigher Technical Specifications*. Marelec.
- Microsoft Corporation. (2023). *Excel Technical Documentation: Engineering Functions*. Microsoft.
- Ministerio de Energía. (2016). *Política Energética Nacional 2050*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Energía de Chile. (2023). *Reporte anual de precios y costos eléctricos industriales*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Salud (MINSAL). (1996). *Decreto Supremo N°977: Reglamento Sanitario de los Alimentos*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Salud (MINSAL). (1999). *Decreto Supremo N°594: Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Salud (MINSAL). (2003). *Decreto Supremo N°148: Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Salud (MINSAL). (2012). *Decreto Supremo N°10: Reglamento de seguridad para calderas, autoclaves y equipos sometidos a presión*. Gobierno de Chile.
- Mohan, S., & Raghavan, A. (2020). *Design of Industrial Compressed Air Systems*. Elsevier.
- MULTIVAC Sepp Haggenmüller SE & Co. KG. (2019). *R-535 Continuous Thermoforming Packaging Machine — Technical Documentation*. MULTIVAC.
- National Fluid Power Association. (2015). *NFPA/T3.6.8: Pneumatic fluid power — Systems standard*. NFPA.
- Newnan, D. G., Lavelle, J. P., & Eschenbach, T. G. (2016). *Engineering Economic*

- Analysis* (13th ed.). Oxford University Press.
- Park, C. S., & Sharp-Bette, G. (1990). *Advanced Engineering Economics*. Addison-Wesley.
- Parker Hannifin Corporation. (2019). *Pneumatic Division Product Catalogue*. Parker.
- Ross, S., Westerfield, R., & Jaffe, J. (2019). *Corporate Finance* (12th ed.). McGraw-Hill.
- SEC – Superintendencia de Electricidad y Combustibles. (2023). *Informe anual de tarifas eléctricas en Chile*. SEC.
- Stephan, J., & Stoessel, F. (2019). *Industrial Pneumatics: Principles and Applications*. Festo Didactic SE.
- Stewart, W. (2010). *The Compressed Air Operations Manual*. McGraw-Hill.