

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA**

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE RECAMBIO DE COMPRESOR DE TORNILLO PARA
MEJORAR EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE AIRE EN UNA EMPRESA DE
MANTENCIÓN INDUSTRIAL**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno:
Nicolas Ignacio Palavecino Tapia

Profesor Guía:
Guillermo Felipe Larson Muñoz

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: análisis y propuesta de recambio de compresor de tornillo para mejorar el desempeño del sistema de aire en una empresa de mantenimiento industrial

Nombre del candidato(a): Nicolás Ignacio Palavecino Tapia

Carrera / Grado: ingeniería en mantenimiento industrial

Campus: concepción Departamento: mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Guillermo Larson Muñoz, 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**):

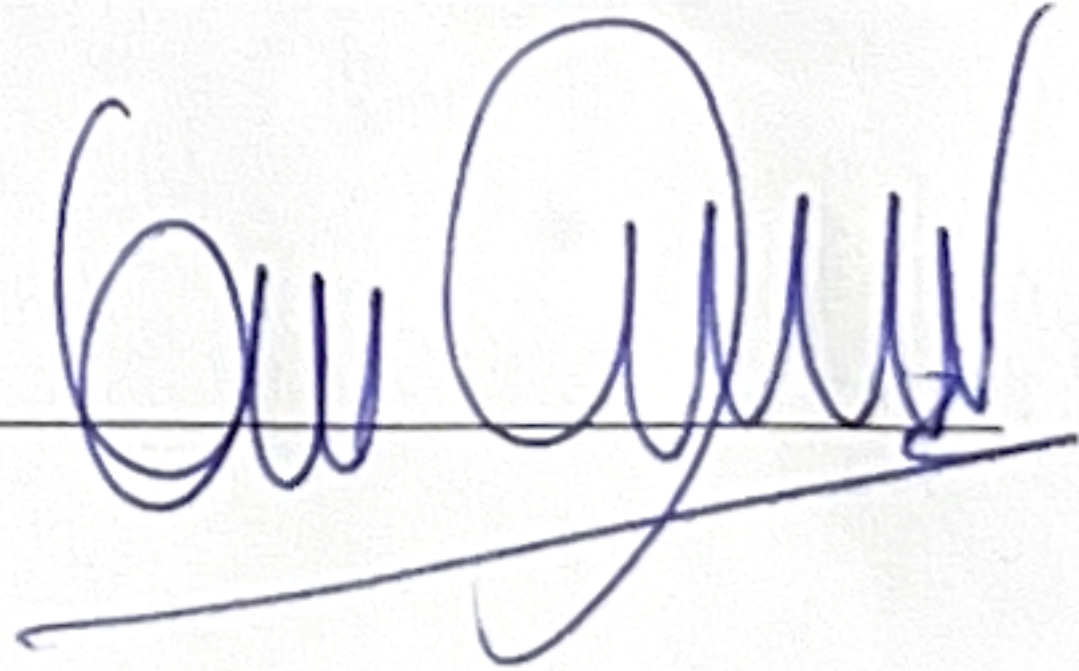
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

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

4.- FIRMAS

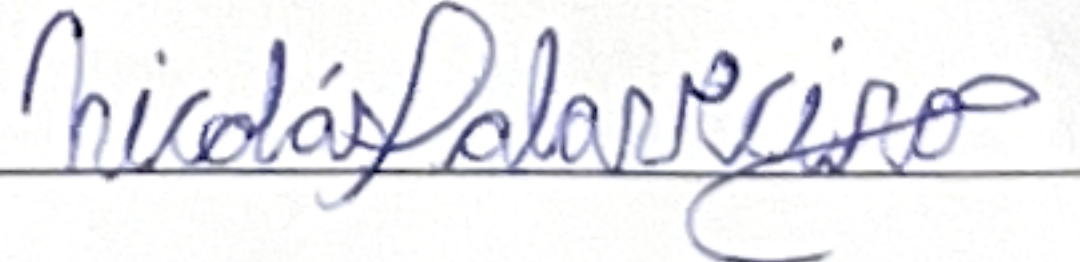
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 05/03/26

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05/03/26

Firma: 

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

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a todas las personas que formaron parte de este proceso académico. En especial, a mi familia, que me acompañó en cada etapa; su apoyo incondicional fue fundamental para seguir adelante. Gracias por motivarme día a día, impulsándome a superarme y a mantener la fortaleza incluso en los momentos más difíciles.

Asimismo, agradezco a mi profesor guía, Guillermo Larson, por su constante orientación, dedicación y paciencia. Sus conocimientos y consejos fueron clave para desarrollar este proyecto con responsabilidad y en el mejor nivel posible.

De igual manera, agradezco a mis amigos de Talca por sus palabras de aliento y por permanecer presentes a pesar de la distancia, entregándome siempre un mensaje oportuno de ánimo. Finalmente, quiero agradecer de manera especial a mi amigo Joaquín Guzmán, por estos años de amistad construida desde el primer día en la universidad, por los momentos compartidos y por su compañía a lo largo de este camino, hasta el último día.

RESUMEN

Este proyecto analiza la situación actual del sistema/equipo en estudio, identificando sus principales limitaciones operacionales y económicas. Con base en los resultados, se desarrolla una propuesta de reparación y se evalúa su factibilidad técnica mediante criterios de desempeño, confiabilidad y eficiencia. Posteriormente se evalúa la opción de un equipo nuevo como una opción de recambio para la red de aire. Finalmente, se estima el impacto esperado en costos, continuidad operativa y productividad.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general:	3
Objetivos específicos:	3
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO.	7
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	9
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	9
1.4. BENEFICIOS DEL PROYECTO.	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	13
2.1 Acerca del aire.....	14
2.2 Acerca de la presión atmosférica.....	14
2.3 Acerca del aire comprimido	15
2.4 Que contiene el aire comprimido.....	16
2.5 Que pasa cuando el aire es comprimido	16
2.6 El aire comprimido como fuente energética	17
2.7 Unidades de medida que tenemos en el aire comprimido	18
2.8 Compresor de aire	18
2.8.1 Como funciona un compresor de aire?	19
2.8.2 ¿Cuáles son los dos principios básicos de compresión?.....	19
2.9 Diferencias entre compresores desplazamiento positivo y los compresores dinámicos	19
2.9.1 Compresores de desplazamiento positivo.....	19
2.9.2 Compresores dinámicos (turbocompresores).....	20
2.10 Tipos de compresores de desplazamiento positivo	21
2.11 Tipos de compresores dinámicos	22
2.12 Tipos de compresores.....	23
2.12.1 Compresor de pistón	23
2.12.2 Compresor de tornillo.....	23
2.12.3 Compresores de tornillo exentos de aceite	24
2.12.4 Compresor de tornillo con inyección de liquido.....	25
2.12.5 Compresor de paletas rotativas	25

2.12.6 Compresor (scroll) orbitales	26
2.12.7 Compresor de uña	27
2.12.8 Compresor Centrifugo	28
2.12.9 Compresor axial	29
2.13 Partes de un compresor de tornillo	29
2.13.1 Engranaje de sincronización	30
2.13.2 Rodamiento del rotor	30
2.13.3 Separador.....	30
2.13.4 Rotor hembra.....	30
2.13.5 Empaques.....	30
2.13.6 Piñón	31
2.13.7 Canal refrigerante.....	31
2.13.8 Rotor macho	31
2.13.9 Orificio de ventilación.....	31
2.13.10 Puerto de salida.....	31
2.13.11 Orificio de drenaje	31
2.13.12 Pistón de equilibrio	31
2.14 Red de aire.....	32
2.14.1 Vapor de agua en el aire comprimido.....	32
2.14.2 Tipos de redes de aire comprimido	32
2.15 Medición de la red de tuberías	33
2.16 Depósito de aire.....	33
2.17 Tipos de depósitos de aire.....	34
2.17.1 Depósitos de aire húmedo:	34
2.17.2 Depósitos de aire seco:	34
2.18 Secado del aire comprimido.....	35
2.18.1 Secador por adsorción.....	35
2.18.2 Secador por refrigeración.....	35
2.19 Filtrado aire comprimido	36
2.19.1 Filtrado de superficie.....	36
2.19.2 Filtración con carbón activado	37
2.19.3 Filtración profunda.....	38
2.20 EFICIENCIA ENERGETICA Y DESEMPEÑO EN SISTEMAS	39
2.20.1 Eficiencia isentrópica y potencia específica	39

2.20.2	Perdidas energéticas más comunes	40
2.20.3	Indicadores de desempeño	40
2.21	MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD.....	41
2.21.1	El mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.....	41
2.21.2	Aplicación de RCM (Reliability Centered Maintenance)	43
2.22	Modos de fallas comunes en compresores de tornillo.....	43
2.23	Indicadores de mantenimiento.....	44
2.23.1	MTBF	44
2.23.2	MTTR	44
2.23.3	Disponibilidad (A)	44
2.23.4	Confiabilidad (R).....	44
2.24	Normativas.....	45
2.24.1	ISO 1217.....	45
2.24.2	ISO 8573-1.....	45
2.24.3	ISO 50001.....	46
2.24.4	Contexto nacional DS N°594	46
CAPÍTULO III: DISEÑO Y SOLUCIÓN		26
3.1	Contexto de solución	36
3.2	Diagnóstico del compresor Schulz	36
3.2.1	Conclusión del diagnostico.....	37
3.3	Cálculos de indicadores de mantenimiento	38
3.4	Tiempo total de operación	38
3.4.1	MTBF / Tiempo medio entre fallas.....	38
3.4.2	MTTR / Tiempo medio de reparación	38
3.4.3	Disponibilidad operativa	38
3.4.4	Tasa de fallas.....	39
3.4.5	Confiabilidad	39
3.5	Requerimientos para seleccionar el equipo optimo	40
3.6	Cálculos para determinar equipos	41
3.6.1	Calculo caudal equivalente.....	41
3.6.2	Velocidad real para el diámetro de la red	41
3.6.3	Numero de Reynolds.....	42
3.6.4	Factor de fricción.....	42
3.6.5	Perdida de carga	43

3.7 Calculo del tanque.....	44
3.8 Caudal equivalente del secador	44
3.9 Golpe de ariete	45
3.10 Equipos propuestos para el recambio.....	45
CAPÍTULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	84
Datos.....	85
4.1 Evaluación económica compresor pistón	85
4.1.1 Presupuesto de mantenimiento overhaul	85
4.1.2 Costo de mantenimiento anual	86
4.1.3 Consumo energético anual (KWh/año) y costo anual (CLP/año).....	86
4.1.4 Costo Mantenimiento Anual	86
4.2 Sistema nuevo de compresor de tornillo, tanque acumulador y secador de aire	86
4.2.1 Cotización de compra, instalación y traslado de los equipos	87
4.2.2 Consumo energético anual (KWh/año) y costo anual (CLP/año).....	87
4.2.3 Costo mantenimiento anual	87
4.3 Comparativo económico compresor existente con nuevo compresor propuesto	88
4.3.1 Inversión Inicial	88
4.3.2 Consumo eléctrico anual (kWh/año).....	88
4.3.3 Costo eléctrico anual.....	88
4.3.4 Costos mantenimiento anual	89
4.3.5 VAN.....	89
CONCLUSION Y RECOMENDACIONES.....	97
Recomendaciones.....	97
BIBLIOGRAFIA	99
Bibliografía.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Diagramas Ishikawa	7
Figura 1-2	Compresor de pistón actual	8
Figura 2-3	Grafico distribución de los principales componentes del aire	14
Figura 2-4	Ilustración presión atmosférica	15
Figura 2-5	Explicación aire comprimido	15
Figura 2-6	Unidades de medida aire comprimido	18
Figura 2-7	Compresor de desplazamiento positivo	20
Figura 2-8	Compresor dinámico	21
Figura 2-9	Fases compresor dinámico	22
Figura 2-10	Compresor de tornillo exento de aceite	24
Figura 2-11	Compresor lubricado con aceite	25
Figura 2-12	Compresor de paletas rotativas	26
Figura 2-13	Compresor scroll	27
Figura 2-14	Compresor de uña	28
Figura 2-15	Compresor centrifugo	28
Figura 2-16	Compresor axial	29
Figura 2-17	Componentes compresor de tornillo	30
Figura 2-18	Formula longitud de la tubería	33
Figura 2-19	Formula volumen tanque	34
Figura 2-20	Secador de adsorción por enfriamiento	35
Figura 2-21	Secador por refrigeración	36
Figura 2-22	Filtrado de superficie	37
Figura 2-23	Filtrado con carbón activado	38
Figura 2-24	Filtrado profundo	39
Figura 3-25	Requerimiento de aire comprimido	54
Figura 3-26	Requerimiento de calidad	55
Figura 3-27	Clasificación del régimen de flujo	56
Figura 3-28	Compresor de tornillo nuevo	60
Figura 3-29	Tanque acumulador de aire	61
Figura 3-30	Secador de aire	61

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1	Historial de falla compresor Schulz MSWV 60	9
Tabla 2	Tabla consumo aire del taller	9
Tabla 3	Que pasa cuando el aire es comprimido	17
Tabla 4	RCM en compresor de tornillo	43
Tabla 5	Indicadores de mantenimiento	45
Tabla 6	Diagnóstico del compresor Schulz	50
Tabla 7	Presupuesto de mantenimiento overhaul	63
Tabla 8	Costo de mantenimiento anual	64
Tabla 9	Cotización compra, instalación y traslado de equipo	65
Tabla 10	Comparativo de inversión inicial	66
Tabla 11	Comparativo mantenimiento anual	67

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

RCM	:	Mantenimiento centrado en confiabilidad
MTBF	:	Tiempo medio entre fallas
MTTR	:	Tiempo medio de reparación
ISO	:	International Organization for Standardization
ISO 1217	:	Norma para evaluación del rendimiento compresor
ISO 8573-1	:	Norma de clasificación de la Calidad del aire comprimido
ISO 50001	:	Norma de sistemas de gestion de la energía
DS N°594	:	Decreto supremo (condiciones sanitarias y ambientales)
SEC	:	Superintendencia de electricidad y combustible
FAD	:	Free air delivery (aire libre suministrado)
CFM	:	Cubic feet por minute / Pies cúbicos por minuto
HP	:	Horsepower / Caballo de fuerza
CLP	:	Peso Chileno
VAN	:	Valor actual neto
%	:	Porcentaje
°C	:	Grados Celsius
Kg/m ³	:	Kilogramos por metro cubico
cm ²	:	Centímetros cuadrados
KM	:	Kilómetros
KPA	:	Kilopascales
BAR	:	Unidad de presión
Bar(a)	:	Presión absoluta en bar
Pa	:	Pascales
kW	:	Kilowatts
Kwh	:	Kilowatt-hora
kWh/año	:	Consumo energético anual

CLP/año	:	Costos anual en pesos Chilenos
CLP/kWh	:	Tarifa eléctrica por unidad de energía
m ³ /min	:	Metros cúbicos por minuto
L/min	:	Litros por minuto
l/s	:	Litros por segundo
mm	:	Milímetros
m/s	:	Metros por segundo
K	:	Kelvin
N	:	Newton metro.
l	:	Longitud general de la tubería
Δp	:	Caída de presión permitida
p	:	Presión absoluta entrada
qc	:	Aire libre suministrado por el compresor
d	:	Diámetro interior de la tubería
V	:	Volumen del depósito de aire
qC	:	Caudal del compresor
P1	:	Presión de entrada del compresor
T1	:	Temperatura máxima de entrada del compresor
T0	:	Temperatura del aire del compresor en el depósito
fmax	:	Frecuencia máxima de carga
T	:	Tiempo total de operación
Qeq	:	Caudal equivalente
Qi	:	Caudal individual de cada herramienta o punto de consumo
Fi	:	Factor de uso o simultaneidad
l	:	Largo.
h	:	Altura.
a	:	Ancho.
p	:	Densidad del aire
a	:	Velocidad de la onda
ΔV	:	Variación brusca de velocidad
Ea	:	Energía anual consumida
Cea	:	Costo de energía anual
Cma	:	Costo de mantenimiento anual
i	:	Inversión inicial
P/A	:	Factor de conversión financiera presente/anualidad
VAN	:	Valor actual neto

INTRODUCCIÓN

En muchos talleres que operan con aire comprimido, es fundamental contar con el caudal y la presión requeridos para garantizar un trabajo adecuado y responder de manera oportuna a las exigencias de las empresas que contratan el servicio. Para que estas condiciones se cumplan, es indispensable la presencia de un compresor, cuyo rol es tomar aire del ambiente y entregarlo a través de una red de distribución, asegurando que llegue a los distintos puntos de consumo con los niveles necesarios de presión, caudal y velocidad, de modo que las herramientas conectadas puedan operar de forma óptima.

Actualmente, el taller cuenta con un compresor marca Shulz MSWV 60, el cual presenta signos de desgaste y una disminución en su rendimiento. Esta situación afecta directamente la continuidad operativa, incrementa las paradas imprevistas y, en consecuencia, impacta en los costos y en los tiempos de ejecución de los trabajos.

En este contexto, el proyecto busca realizar un análisis del compresor actualmente en operación, con el fin de determinar qué tan viable resulta repararlo o si, por el contrario, es más conveniente reemplazarlo por un equipo nuevo. Esta evaluación considera que ambas alternativas implican costos y tiempos asociados, tanto por concepto de reparación como por la adquisición e instalación de un nuevo compresor.

El análisis considera aspectos técnicos como la capacidad de entrega de aire, la presión de trabajo, la compatibilidad con los sistemas actuales y el potencial de ahorro energético. Además, se incorpora una evaluación económica para estimar el retorno de la inversión y los beneficios esperados en el mediano y largo plazo.

La intención no es únicamente reemplazar un equipo, sino mejorar el sistema de aire en su conjunto, buscando una operación más confiable, con menor consumo y un funcionamiento más limpio y ordenado. En ese sentido, esta propuesta responde a una necesidad técnica real del taller, con un enfoque práctico, aplicable y orientado a resultados.

OBJETIVOS

Objetivo general:

El objetivo general tiene como propósito realizar una evaluación técnica y económica para determinar la factibilidad de ejecutar un mantenimiento mayor al compresor de pistón actualmente en operación, o bien reemplazarlo por un compresor de tornillo nuevo. Esta evaluación buscará comparar ambas alternativas en función del estado del equipo, el desempeño requerido por el taller y los costos asociados a cada opción (inversión, operación, mantención y eventuales detenciones). Con ello, se pretende definir la alternativa más conveniente para mejorar el desempeño, la confiabilidad y la disponibilidad del sistema de aire comprimido, asegurando la continuidad operativa del taller en el mediano y largo plazo.

Objetivos específicos:

- Diagnosticar el estado actual del equipo que se encuentra trabajando. Se observará cómo trabaja el compresor y la red: su rendimiento, el consumo eléctrico, la frecuencia con que falla y la estabilidad de la presión. Con esa información se describirá la situación de partida y se explicará, en términos simples, cómo estos problemas afectan la continuidad del servicio y los costos de la empresa.
- Definir qué debe cumplir el nuevo equipo. Se establecerán el caudal y la presión necesarios, las condiciones del lugar donde operará y la compatibilidad con la infraestructura ya instalada. Este marco de requisitos servirá como guía práctica para que la solución elegida se ajuste a la operación sin generar cambios innecesarios.
- Comparar y contrastar alternativas del mercado. Se revisarán opciones disponibles y se evaluarán sus ventajas en eficiencia, confiabilidad, soporte posventa y costo total en el tiempo. Con esa comparación se llegará a una recomendación clara, respaldada por criterios transparentes y fáciles de comunicar.
- Elaborar la propuesta de reemplazo. Aquí se seleccionará el equipo óptimo y sus accesorios, se estimarán los costos de adquisición e instalación, se propondrá un plan de implementación con plazos y responsables, y se destacarán los beneficios operativos esperados. Además, se incluirá un resumen financiero que muestre de forma directa los ahorros y el tiempo estimado de recuperación de la inversión.

- Proyectar el ahorro de energía, la mejora en la continuidad del servicio y la reducción de paradas, junto con sus efectos económicos. Finalmente, se definirán metas y un mecanismo sencillo de verificación posterior para confirmar que los beneficios comprometidos efectivamente se cumplan.

CAPÍTULO I:
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa donde se desarrolla este proyecto se dedica a la mantención industrial, un rubro que exige precisión, confiabilidad y equipos que estén siempre listos para responder. En este contexto, el compresor tipo tornillo juega un rol fundamental, ya que es el encargado de alimentar la red que distribuye aire comprimido y fluidos, necesarios para operar herramientas, equipos de limpieza, pruebas neumáticas y otros servicios clave que la empresa ofrece a sus clientes.

Sin embargo, en el último tiempo, el compresor actual ha empezado a mostrar serias señales de deterioro. Se han registrado caídas de presión, fluctuaciones en su rendimiento, sobrecalentamientos y un consumo eléctrico más alto de lo habitual. A esto se suma que ha sido necesario intervenirlo con mantenimientos correctivos con mayor frecuencia, lo que genera detenciones no planificadas y, en consecuencia, afecta la productividad del equipo de trabajo.

Estas fallas no solo implican más costos, sino también un impacto directo en la calidad del servicio que la empresa puede ofrecer. Para una organización que depende tanto de la eficiencia de sus propios sistemas, seguir operando con un equipo en estas condiciones representa un riesgo constante. Además, el compresor ya no responde adecuadamente a la demanda actual: su tecnología quedó atrás y no se ajusta al ritmo y exigencias que hoy enfrenta la empresa.

Frente a esta situación, se hace evidente la necesidad de buscar una solución que no solo permita reemplazar el compresor, sino que garantice una mejora real en el sistema. La idea no es cambiar por cambiar, sino encontrar un equipo que esté a la altura de lo que la empresa necesita: confiabilidad, eficiencia energética, bajo mantenimiento y compatibilidad con el trabajo diario.

Este proyecto nace precisamente de esa necesidad concreta: evaluar la situación actual y proponer una alternativa de recambio que sea técnicamente adecuada, económicamente viable y que permita a la empresa seguir creciendo, cumpliendo con sus clientes y asegurando que su operación no se vea interrumpida por un problema que, con planificación, tiene solución.

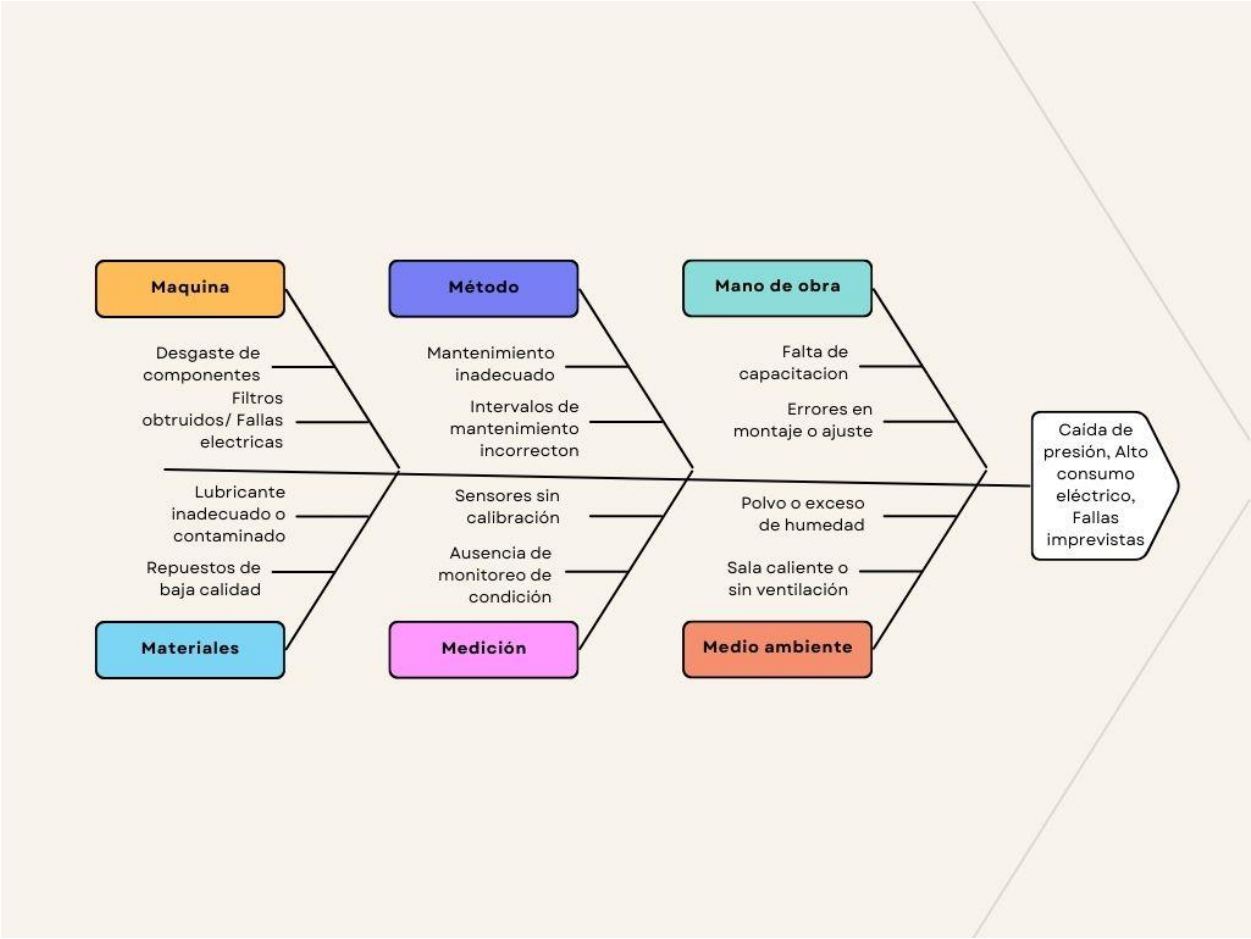


Ilustración 1-1: Diagrama Ishikawa

Fuente: Elaboración Propia

1.1 **ANTECEDENTES DEL PROYECTO.**

Tenemos un taller que actualmente opera con un compresor de pistón Shulz MSWV 60, el cual ha presentado un historial de fallas recurrentes durante los últimos años. Estas fallas han generado costos de mantenimiento elevados, además de paradas imprevistas que afectan la continuidad operativa del taller y la disponibilidad del suministro de aire comprimido.

En este contexto, el proyecto busca evaluar la factibilidad de continuar operando con el equipo actual, considerando que las fallas observadas han ido evolucionando desde eventos leves hacia condiciones más críticas. Para ello, se analizarán dos alternativas principales: (1) ejecutar un mantenimiento mayor/completo que permita recuperar su desempeño y confiabilidad, o (2) reemplazarlo por un compresor de tornillo nuevo, con el objetivo de mejorar la disponibilidad, reducir riesgos de detenciones y optimizar los costos en el mediano y largo plazo.



Ilustración 1-2: Compresor de pistón actual

Fuente: <https://www.servicomp.cl>

TABLA HISTORIAL DE FALLA COMPRESOR SHULZ MSWV 60					
Nº	FECHA	HORA	MODO DE FALLA	DESCRIPCION DE LA FALLA (SINTOMA)	TIEMPO DETENIDO (MIN)
1	19-08-2023	15:05	Ventilacion deficiente (sobretemperatura)	Se calienta, olor a quemado	120
2	07-12-2023	10:50	Bajo nivel de aceite	Ruido metálico leve	120
3	22-03-2024	9:25	Empaque de culata con fuga	Soplido en cabezal, no alcanza presión objetivo	340
4	18-07-2024	16:30	Válvulas de descarga gastadas	Presion sube lento. Ciclos largos , calentamiento	300
5	30-10-2024	11:05	Anillos de pistón desgastados	Mayor consumo de aceite, baja compresion , caida rendimiento	600
6	14-02-2025	8:40	Rodamiento con desgaste	Vibración/ruido crecientes, tendencia a falla mecánica	480
7	03-11-2025	9:00	Bobinado de motor con aislamiento degradado	Olor fuerte, baja potencia, disparo inmediato	1440
8	07-01-2026	13:50	Falla mecánica mayor (gripado)	Ruido fuerte, se traba, no gira el conjunto	2880

Tabla 1: Tabla historial de falla compresor Shullz mswv 60

Fuente: Elaboración Propia

Este taller cuenta con el siguiente listado de herramientas neumáticas, las cuales se conectan directamente a la red de aire abastecida por el compresor. Dado que su operación depende del suministro de aire comprimido, estas herramientas resultan críticas para el funcionamiento del taller. A partir de sus consumos nominales, se estima un **consumo teórico total de 1.463 L/min.**

El taller tiene dimensiones de 20 metros de ancho por 40 metros de largo y se encuentra en un recinto cerrado.

Herramienta	Consumo (L/min)
Llave impacto 3/4"	200
Llave impacto 1"	380
Lijadora orbital	150
Pistola de pintura	283
Taladro neumático	150
Gata neumática	200
Pistola engrase	100
TOTAL, teórico (todo a la vez)	1 463 L/min

Tabla 2: Tabla consumo aire del taller

Fuente: Elaboración Propia

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

El proyecto nace a partir de una necesidad concreta del taller: contar con un suministro de aire comprimido estable y confiable, ya que gran parte de las actividades de mantención dependen directamente de este recurso. En la situación actual, el taller opera con un compresor de pistón que, con el paso del tiempo, ha comenzado a evidenciar desgaste y pérdida de rendimiento, lo que se traduce en fallas recurrentes, detenciones inesperadas y un aumento de intervenciones correctivas. Esta condición no solo incrementa los costos asociados al mantenimiento, sino que también afecta la continuidad del trabajo y la capacidad de respuesta frente a los servicios comprometidos con clientes.

En este contexto, el proyecto se orienta a analizar el estado del equipo existente y el desempeño real del sistema de aire, con el objetivo de sustentar una decisión técnica y económicamente razonable entre dos alternativas: realizar un mantenimiento mayor al compresor actual o reemplazarlo por un compresor de tornillo nuevo. Para ello, se levantará información operativa del taller, considerando variables como presión de trabajo requerida, demanda de consumo (caudal), horas de operación, condiciones de instalación y requerimientos mínimos de calidad del aire, además del análisis del historial de fallas y tiempos de detención.

A partir de los antecedentes recopilados, se definirá el alcance y costo estimado de una reparación mayor, evaluando sus beneficios esperados y sus limitaciones (por ejemplo, probabilidad de reincidencia de fallas, tiempos de detención y vida útil remanente). En paralelo, se desarrollará una propuesta de recambio a tecnología de tornillo, dimensionada según la demanda del taller y considerando la compatibilidad con la infraestructura existente y los componentes auxiliares necesarios para asegurar un funcionamiento estable. Finalmente, se realizará una comparación integral de ambas alternativas mediante criterios técnicos (desempeño, confiabilidad, continuidad, riesgos) y económicos (inversión, operación, mantención y costos por detenciones), con el propósito de entregar una recomendación clara, justificable y aplicable para mejorar la disponibilidad del sistema de aire del taller en el mediano y largo plazo.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

Este proyecto nace de la necesidad de evitar paradas imprevistas y asegurar la continuidad operativa de la red de aire. A su vez, esta necesidad se relaciona directamente con una preocupación económica: reducir los costos de mantención, lograr un mayor ahorro energético y disminuir las pérdidas asociadas a detenciones inesperadas.

Desde el punto de vista técnico, el cambio o la reparación del equipo no responde a una casualidad, sino a la intención de mejorar el servicio de manera integral, asegurando estabilidad en la presión, estabilidad en el caudal y una mayor confiabilidad del sistema.

Finalmente, la seguridad también forma parte central de esta propuesta de recambio, ya que se busca minimizar el riesgo operacional y avanzar hacia un escenario en el que las fallas críticas se eliminen o se reduzcan al nivel más bajo posible.

1.4. BENEFICIOS DEL PROYECTO.

Al implementar el proyecto, se espera tener mejoras visibles en el funcionamiento del taller. Por el lado técnico, si tenemos un aire confiable y disponible. Con una presión y caudal mas estables, evitando que tengamos variaciones en la red. La mejora también se podría apreciar en la humedad de la red y en la filtración. En la parte económica, bajar los costos asociados a fallas o paradas repentinas, será el principal beneficio que tendremos. Se disminuirá las reparaciones correctivas, repuestos, mano de obra y el tiempo detenido el equipo, donde el taller no puede realizar los trabajos, por ende no hay ingresos en esos horarios. También tendremos un mejor consumo energético. Por último, el proyecto también aporta en la gestión, porque impulsa un registro más ordenado de fallas y el seguimiento de indicadores como MTBF y MTTR, lo que permite tomar decisiones con datos y no solo por experiencia. Incluso, como efecto adicional, una operación más eficiente puede contribuir a reducir consumo eléctrico y residuos asociados al uso de aceite y componentes.

CAPÍTULO II:
MARCO TEÓRICO

2.1 Acerca del aire

La vida en la Tierra depende de una envoltura gaseosa llamada atmósfera, que rodea y protege al planeta como una gran “burbuja” y se extiende aproximadamente 1.000 km hacia el espacio. Lo que comúnmente conocemos como aire corresponde a una mezcla de gases formada principalmente por nitrógeno y oxígeno, junto con una proporción variable de vapor de agua. Además, contiene pequeñas cantidades de gases inertes y, de manera desafortunada, también incorpora contaminantes, especialmente hidrocarburos generados por actividades humanas. En condiciones normales, la composición del aire se mantiene prácticamente constante hasta alrededor de dos millas de altitud. (Chicago Pneumatic)

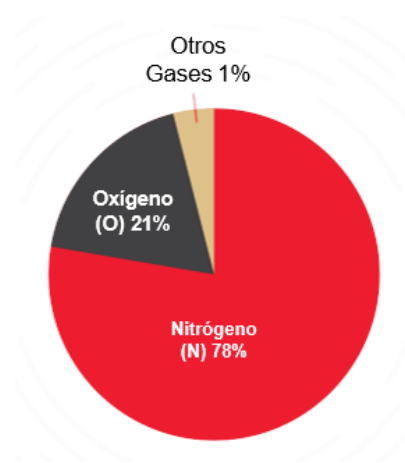


Ilustración 2-3: Grafico Distribución de los principales componentes del aire

Fuente: Guía del aire comprimido Chicago Pneumatic

2.2 Acerca de la presión atmosférica

A nivel del mar, el aire presenta una densidad aproximada de 1,2 kg/m³, lo que implica que la superficie terrestre y los cuerpos ubicados sobre ella están sometidos a una fuerza que se conoce como presión atmosférica. Esta presión puede entenderse como el efecto del peso de una columna de aire cuya base es de 1 cm² y que se extiende desde el suelo hasta el límite superior de la atmósfera, a cerca de 1.000 km de altura. A medida que aumenta la altitud, la presión disminuye, ya que existe menos aire sobre nosotros; de forma aproximada, se reduce a la mitad cada 5 km, razón por la cual se suele decir que en altura “el aire es más delgado”. (Chicago Pneumatic)

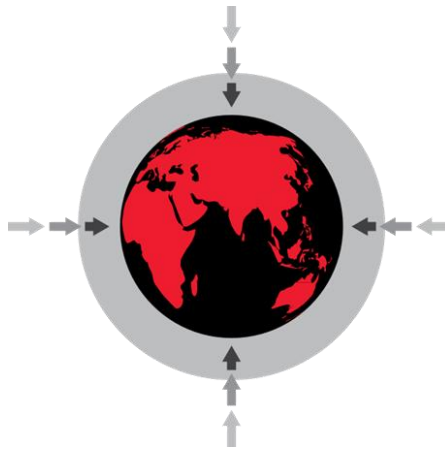


Ilustración 2-4: Ilustración presión atmosférica

Fuente: Guía del aire comprimido Chicago Pneumatic

2.3 Acerca del aire comprimido

“A diferencia de los líquidos, el aire se puede comprimir; es decir, un volumen dado de aire puede reducirse con una mayor presión dentro del nuevo volumen como resultado. La compresión se lleva a cabo en una máquina con una fuente de energía, un compresor. En su forma más simple, un compresor puede ser una bomba de aire para balones de fútbol con un ser humano como fuente de energía.

El aire se introduce en el balón y se comprime a aproximadamente 1/4 de su volumen original. Por lo tanto, la presión del aire dentro del balón aumenta hasta cuatro veces la presión atmosférica. Hemos puesto aire en el balón.” (Chicago Pneumatic)



Ilustración 2-5: Ilustración explicación aire comprimido

Fuente: Guía del aire comprimido Chicago Pneumatic

2.4 Que contiene el aire comprimido

El aire comprimido generado por un compresor conserva, en esencia, los mismos componentes presentes en el aire ambiente que se aspira. Sin embargo, durante la compresión también se incrementa la concentración de vapor de agua, por lo que el aire a la salida del compresor tiende a ser húmedo. En el caso de compresores lubricados con aceite, es habitual que el aire comprimido arrastre además pequeñas trazas de aceite provenientes del sistema de lubricación. Dado que los requerimientos varían según la aplicación del aire comprimido, no todos los niveles de contaminación resultan aceptables en todos los procesos. Por esta razón, con frecuencia es necesario mejorar su calidad mediante secado (para disminuir la humedad) y filtrado (para retener aceite, partículas y otros contaminantes). La calidad final del aire comprimido puede clasificarse en distintas clases, de acuerdo con un sistema de referencia internacional. (Chicago Pneumatic)

2.5 Que pasa cuando el aire es comprimido

CALOR	VAPOR DE AGUA
La energía que se entrega al compresor durante su operación termina transformándose prácticamente en su totalidad en calor a lo largo del proceso de compresión, independiente del tipo de equipo utilizado. En consecuencia, la generación total de calor es, en términos generales, equivalente a la potencia de entrada del compresor. Para dimensionar su magnitud, incluso un compresor de tamaño reducido, con un motor de 3 kW, puede liberar una cantidad de calor comparable a la de una estufa tipo sauna. Desde una perspectiva de eficiencia global del sistema, este calor puede aprovecharse mediante esquemas de recuperación, por ejemplo, para calefacción de áreas cercanas o usos térmicos locales. No obstante, para evitar problemas de sobrecalentamiento y asegurar un funcionamiento confiable, el sistema de refrigeración debe estar adecuadamente diseñado;	Tras la etapa de compresión y un enfriamiento inicial, el aire comprimido suele quedar saturado de vapor de agua, alcanzando una humedad relativa del 100%. A medida que este aire circula por los elementos de enfriamiento del sistema de aire comprimido, parte del vapor se transforma en agua líquida debido a la disminución de temperatura. La temperatura a la cual comienza esta condensación se conoce como punto de rocío. Como consecuencia, el condensado se acumula en estanques, separadores y también en tuberías de la red. La cantidad de agua condensada que se genera depende principalmente de cuatro variables: (1) el contenido de vapor de agua presente en el aire ambiente, (2) el volumen de aire que es comprimido, (3) la magnitud de la reducción de temperatura del aire luego de la compresión y (4) la presión a la que se mantiene el aire comprimido

normalmente se utiliza enfriamiento por aire y, en aplicaciones específicas, enfriamiento por agua. (Chicago Pneumatic)	dentro del sistema. (Chicago Pneumatic)
---	---

Tabla 3: Que pasa cuando el aire es comprimido

Fuente: Chicago Pneumatic

2.6 El aire comprimido como fuente energética

Aprovechar el aire comprimido como fuente de energía presenta diversas ventajas. Por una parte, se trata de un medio energético limpio y seguro, y por otra, su aplicación es muy versátil, ya que puede emplearse en tareas tan variadas como accionar herramientas neumáticas y cilindros, transportar materiales o incluso contribuir a procesos de enfriamiento. No obstante, para producir aire comprimido se requiere una fuente externa de energía que accione el compresor, generalmente mediante un motor eléctrico o un motor de combustión interna. Desde el punto de vista físico, la energía teórica necesaria para comprimir un determinado volumen de aire hasta una presión específica está definida por las leyes termodinámicas y no puede modificarse arbitrariamente. Sin embargo, en la operación real existen pérdidas de energía asociadas al proceso de compresión, lo que incrementa el consumo total del sistema. Por ello, resulta relevante analizar el consumo específico de potencia del compresor, entendido como la potencia efectiva requerida para comprimir un volumen de aire a una presión determinada, considerando además las pérdidas internas del equipo. Como referencia, para comprimir aire hasta aproximadamente 700 kPa (7 bar) en un compresor industrial moderno, suele requerirse del orden de 6,5 kW por m³/min; adicionalmente, un aumento o disminución de 100 kPa (1 bar) en la presión de trabajo se traduce típicamente en una variación cercana al 7% en la potencia demandada. (Chicago Pneumatic)

2.7 Unidades de medida que tenemos en el aire comprimido

UNIDADES

Presión atmosférica

En el sistema internacional de unidades, Pa (Pascal) es la unidad básica de presión aceptada.

Como 1 pascal en aire comprimido es una cantidad muy pequeña de presión, normalmente usamos la unidad:

kPa (1 kilopascal = 1000 Pa)

o

MPa (1 megapascal = 1000 kPa)

La presión general del aire sobre la superficie terrestre se puede especificar de diferentes formas, con más o menos el mismo significado:

1 atm (atmósfera) = 1 kp/cm² (kilopondio/cm²)

100 kPa (kilopascal) = 1 bar

Aire comprimido

La presión del aire comprimido normalmente se especifica como sobrepresión; es decir, presión por encima de la presión atmosférica normal. Esto suele estar implícito, pero a veces se aclara con una (e), kPa(e).

La presión de funcionamiento de un compresor generalmente se especifica como sobrepresión.

La capacidad del compresor

La capacidad de un compresor; es decir, la cantidad de aire comprimido que se puede suministrar por unidad de tiempo; especificado en:

l/min (litros/min), l/seg (liters/segundo) o m³/min (metros cúbicos/minuto).

La capacidad se refiere al aire expandido a presión atmosférica.

Una (N) antes del dispositivo; p.ej. (N) l/seg significa "normal" y significa que la especificación de volumen se aplica a una presión ambiental y una temperatura específicas. En la mayoría de los casos prácticos, (N) l/seg es equivalente a l/seg.

Ilustración 2-6: Unidades de medida aire comprimido

Fuente: Guia del aire comprimido Chicago Pneumatic

2.8 Compresor de aire

Un compresor de aire, en simple, es una máquina que captura el aire del ambiente, lo reduce de volumen al comprimirlo y después lo entrega de vuelta con mucha más fuerza. Como ese aire sale a alta presión, la energía que transporta se puede aprovechar para hacer funcionar herramientas neumáticas, soplar y limpiar superficies, o inflar distintos elementos.

En términos de uso, el aire comprimido puede llegar a cumplir un rol parecido al de un motor eléctrico, y por eso en algunos trabajos se prefiere como alternativa, ya que normalmente se considera una opción más económica y segura, además de basarse en un sistema más simple desde el punto de vista tecnológico. Lo más destacable es que el compresor es bastante versátil, porque sirve para varias tareas. (Garcia, 2023)

2.8.1 Como funciona un compresor de aire?

“Visto de cerca la tecnología que rige el funcionamiento de estas herramientas eléctricas es bastante sencillo: recoger el aire del ambiente, comprimirlo y luego expulsarlo con fuerza. En este proceso intervienen **tres operaciones claves**:

1. **Aspiración del aire a través de un filtro:** el cual lo lleva a un tanque de acumulación.
2. **Compresión a través de diversos mecanismos (depende del tipo de compresor):** una vez en el estanque. Un pistón, tornillo o espiral se activa para ejercer fuerza mecánica al aire acumulado.
3. **Expulsión del aire a través de un presostato:** Es la parte final del mecanismo que permite la liberación del aire comprimido con la fuerza que se requiera, pudiéndose controlar mediante un manómetro. ” (Garcia, 2023)

2.8.2 ¿Cuáles son los dos principios básicos de compresión?

“Existen dos principios genéricos de compresión del aire (o gas): la compresión de desplazamiento positivo y la compresión dinámica. Estos principios se basan en la teoría de cómo se comprime y descarga el aire. En la compresión de desplazamiento positivo, el aire se aspira en una o varias cámaras de compresión, donde queda confinado. El volumen de cada cámara disminuye gradualmente y el aire se comprime internamente. Cuando la presión ha alcanzado la relación de presiones establecida, se abre una lumbrera o una válvula y el aire se descarga en el sistema de salida debido a la reducción continua del volumen de la cámara de compresión. En la compresión dinámica, el aire se aspira entre los álabes de un rodete que gira con rapidez y acelera a gran velocidad. A continuación, el gas se descarga a través de un difusor, donde la energía cinética se convierte en presión estática.” (Atlas Copco, s.f.)

2.9 Diferencias entre compresores desplazamiento positivo y los compresores dinámicos

2.9.1 Compresores de desplazamiento positivo

- “Caudal constante
- Mayor presión
- Funcionamiento a baja velocidad
- Aplicaciones mas pequeñas y estables
- Diseño más sencillo” (Atlas Copco, s.f.)

Los compresores de desplazamiento positivo tienen la característica de entregar aire constante, incluso si ocurre algún tipo de cambio en la presión del sistema. Tiene como funcionamiento encerrar un volumen de aire y reducirlo mediante una acción mecánica, utilizando mecanismos como pistones o tornillos rotativos.

Este tipo de compresores puede alcanzar mayores relaciones de compresión a bajas velocidades, por lo cual son más utilizados en aplicación de menor escala y condiciones de operación estables, como en procesos de manufactura y sector automotriz. En conclusión, tienen una construcción simple, lo que favorece una operación confiable y facilita su mantenimiento. (Atlas Copco, s.f.)



Ilustración 2-7: Compresor de desplazamiento positivo

Fuente: AtlasCopco

2.9.2 Compresores dinámicos (turbocompresores)

- “Caudal variable
- Presión variable
- Mayor velocidad
- Aplicaciones de gran volumen
- Diseño avanzado” (Atlas Copco, s.f.)

En los compresores dinámicos, el incremento de presión se produce mientras el gas se encuentra en movimiento. El rodete giratorio impulsa el gas, aumentando su velocidad, la cual posteriormente se convierte en presión al pasar por un difusor donde el flujo se desacelera. Según la dirección del desplazamiento del gas, estos equipos pueden clasificarse en axiales o radiales. A diferencia de los compresores de desplazamiento positivo, los compresores dinámicos presentan una alta sensibilidad al cambio de presión, ya que pequeñas variaciones en la presión de operación generan cambios significativos en el caudal. Cada rodete trabaja dentro de un rango limitado de flujo: si se supera el límite superior, el gas alcanza velocidades cercanas al régimen sónico; mientras que al descender bajo el límite inferior, la contrapresión puede provocar flujo inverso, originando vibraciones, ruidos y posibles daños mecánicos. (Atlas Copco, s.f.)



Ilustración 2-8: Compresor dinámico

Fuente: AtlasCopco

2.10 Tipos de compresores de desplazamiento positivo

- **Compresores (de pistón) alternativos:** Son compresores que utilizan pistones accionados por un cigüeñal para comprimir el aire en un cilindro.
- **Compresores (scoll) orbitales:** Estos compresores utilizan dos espirales intercaladas para comprimir el aire suavemente.
- **Compresores de tornillo rotativo:** Son compresores que utilizan dos tornillos helicoidales giratorios para comprimir el aire de forma continua.

- **Compresores de uña rotativos:** Estos compresores utilizan dos rotores dentados contra rotatorios y sin contacto para comprimir el aire.
- **Compresores de paletas rotativas:** Son compresores que utilizan un rotor con paletas que se deslizan hacia dentro y hacia fuera para comprimir el aire dentro de una cavidad cilíndrica.

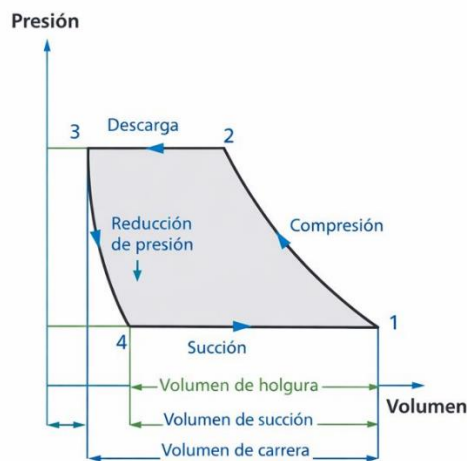


Ilustración 2-9: Fases Compresor dinámico

Fuente: AtlasCopco

Como muestra la ilustración 1-9, el ciclo del compresor se desarrolla en cuatro etapas. Primero ocurre la succión, cuando el pistón desciende y permite la entrada de aire a presión ambiente, aumentando el volumen dentro del cilindro. Luego se inicia la compresión: el pistón asciende con las válvulas cerradas, el aire queda atrapado, disminuye su volumen y la presión aumenta progresivamente. Cuando la presión interna supera la presión de la red o del estanque, se abre la válvula de descarga y el aire comprimido es expulsado, manteniéndose la presión casi constante hasta que el pistón alcanza el punto más alto. Finalmente, al comenzar el nuevo descenso, el aire retenido en el volumen de holgura se expande y provoca una reducción de presión antes de reiniciar la succión; esta última fase representa una pérdida de eficiencia, ya que no aporta directamente a la producción de aire comprimido.

2.11 Tipos de compresores dinámicos

- **Compresores centrífugos:** son compresores que utilizan un rodete giratorio para acelerar y convertir la velocidad del aire en presión a través de un difusor.

- **Compresores axiales:** estos compresores comprimen el aire a medida que fluye en paralelo al eje de rotación. Se suelen utilizar en motores a reacción y aplicaciones de alta velocidad.

2.12 Tipos de compresores

2.12.1 Compresor de pistón

El compresor alternativo o de pistón es uno de los equipos más antiguos y extendidos en la industria. Se comercializa en distintas versiones, como simple o doble efecto, lubricado o libre de aceite, y con diferentes cantidades de cilindros dispuestos en varias configuraciones. Salvo en algunos modelos muy pequeños con cilindros verticales, en los equipos de menor tamaño suele predominar la disposición en V. En cambio, en compresores grandes de doble efecto es frecuente la configuración en L, donde el cilindro de baja presión se ubica en posición vertical y el de alta presión en posición horizontal, debido a las ventajas que ofrece y que la han consolidado como una solución habitual. Los compresores lubricados generalmente operan con lubricación por salpicadura o mediante lubricación a presión. Además, la mayoría incorpora válvulas autoaccionadas, las cuales abren y cierran automáticamente por la diferencia de presión existente a ambos lados del elemento de cierre. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

2.12.2 Compresor de tornillo

El desarrollo del compresor rotativo de tornillo se consolidó durante la década de 1930, impulsado por la necesidad industrial de contar con equipos capaces de entregar un caudal alto y continuo, manteniendo un desempeño estable incluso ante variaciones en la presión de operación. El elemento compresor está conformado principalmente por dos rotores helicoidales, macho y hembra que giran en sentidos opuestos y van reduciendo progresivamente el volumen del aire atrapado entre ellos y la carcasa, produciendo así el aumento de presión.

Este tipo de compresor posee una relación de compresión interna definida por su geometría, la cual depende de parámetros como la longitud del conjunto, el paso de los tornillos y el diseño de la abertura de descarga; por esta razón, para alcanzar el máximo rendimiento, dicha relación debe ser coherente con la presión de trabajo requerida por el sistema. En general, los compresores de tornillo operan sin válvulas y presentan un funcionamiento mecánicamente equilibrado, lo que permite trabajar a altas velocidades de eje y lograr

grandes caudales en equipos compactos. No obstante, la diferencia de presión entre succión y descarga genera una carga axial que debe ser soportada por los rodamientos del equipo. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

2.12.3 Compresores de tornillo exentos de aceite

Los primeros compresores de tornillo se caracterizaban por utilizar rotores de perfil simétrico y operar sin inyección de líquido refrigerante dentro de la cámara de compresión, razón por la cual se les denominó compresores de tornillo exentos de aceite o secos. En los modelos actuales de alta velocidad, los rotores suelen incorporar perfiles asimétricos, lo que permite mejorar la eficiencia energética al disminuir las pérdidas por fugas internas. Para mantener la sincronización entre los rotores —que giran en sentidos opuestos— se emplean habitualmente engranajes externos, evitando el contacto directo entre ellos y con la carcasa; de esta manera, no se requiere lubricación en la zona de compresión y el aire obtenido puede considerarse libre de aceite. Tanto los rotores como la carcasa se fabrican con tolerancias muy ajustadas, con el objetivo de reducir el paso de aire desde la zona de alta presión hacia la de aspiración. No obstante, la relación de compresión interna se encuentra condicionada por el aumento de temperatura entre succión y descarga, lo que explica que estos equipos se diseñen con frecuencia en múltiples etapas y con refrigeración intermedia, a fin de alcanzar mayores relaciones de presión manteniendo un funcionamiento seguro y eficiente. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

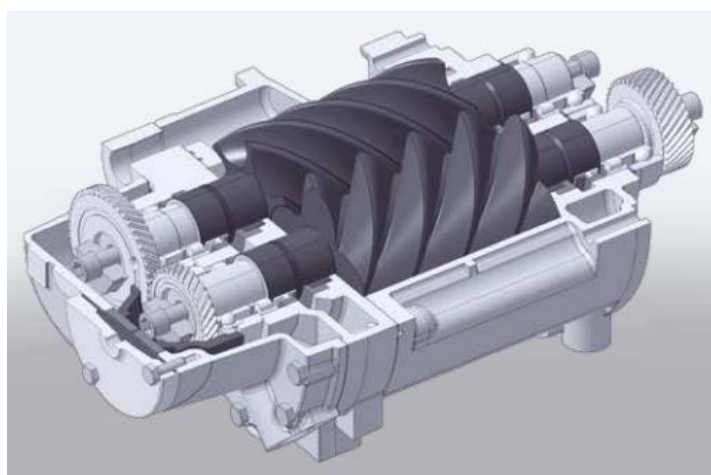


Ilustración 2-10: Compresor de tornillo exento de aceite

Fuente: Manual del aire comprimido Atlas Copco

2.12.4 Compresor de tornillo con inyección de líquido

En los compresores de tornillo con inyección de líquido, se incorpora un fluido dentro de la cámara de compresión —y en algunos diseños también hacia la zona de rodamientos— con el propósito de mejorar el desempeño del equipo. Este líquido cumple funciones clave: disipar el calor, lubricar los componentes móviles, reducir la temperatura del aire durante la compresión y sellar holguras internas, disminuyendo así las fugas de retorno hacia la aspiración. En la práctica industrial, el fluido más utilizado es el aceite, principalmente por su capacidad de lubricación y sellado; no obstante, existen aplicaciones donde se emplean otros medios, como agua o polímeros, dependiendo de los requerimientos del proceso. Gracias a este mecanismo, es posible diseñar compresores de tornillo con inyección de líquido para alcanzar relaciones de compresión elevadas, siendo común que una sola etapa sea suficiente para trabajar hasta aproximadamente 14 bar, e incluso cerca de 17 bar; sin embargo, operar en estos rangos suele implicar una disminución de la eficiencia energética del sistema. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

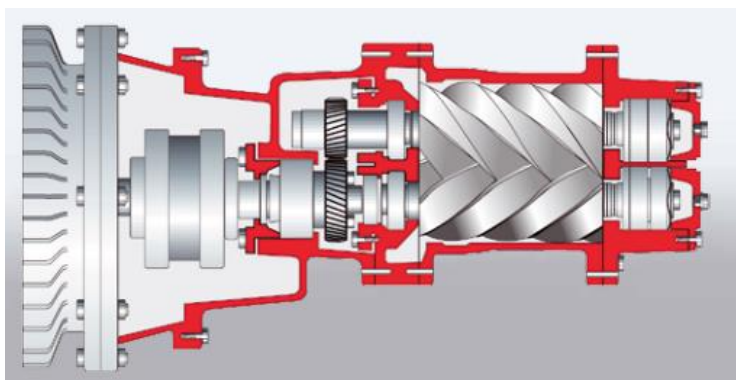


Ilustración 2-11: Compresor lubricado con aceite

Fuente: Manual del aire comprimido Atlas Copco

2.12.5 Compresor de paletas rotativas

Los compresores de paletas rotativas (también llamados de paletas deslizantes) corresponden a equipos de desplazamiento positivo que comprimen aire o gas mediante un conjunto de paletas instaladas en un rotor. Se emplean en distintas aplicaciones industriales debido a su funcionamiento estable, buena eficiencia y confiabilidad operativa. Ambos términos describen el mismo tipo de compresor: la denominación “paletas rotativas” enfatiza el movimiento del conjunto durante el giro, mientras que “paletas deslizantes” destaca el desplazamiento radial que realizan las paletas dentro del rotor. Su operación se basa en un principio simple: el rotor gira dentro de una carcasa con una cavidad cilíndrica, pero se encuentra excéntrico respecto al centro. Como consecuencia, durante la rotación las paletas se desplazan hacia adentro y hacia afuera, formando cámaras de volumen variable. Estas cámaras capturan aire en la zona

de admisión y, al avanzar el giro, el volumen disponible se reduce progresivamente, lo que incrementa la presión del aire hasta alcanzar el nivel requerido, para finalmente ser descargado por la salida del compresor. (Atlas Copco, s.f.)

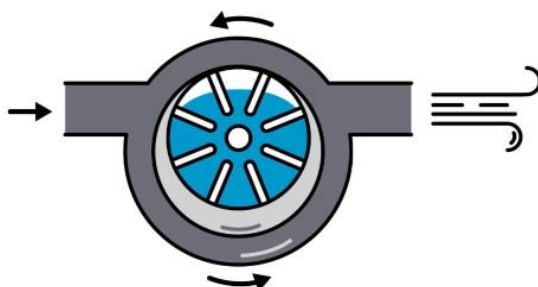


Ilustración 2-12: Compresor de paletas rotativas

Fuente: Atlas copco

2.12.6 Compresor (scroll) orbitales

El compresor scroll, también denominado compresor de espiral corresponde a un equipo de desplazamiento positivo que realiza la compresión del aire o gas de manera interna y progresiva. Puede encontrarse en versiones lubricadas o libres de aceite; estas últimas son especialmente convenientes en aplicaciones donde se exige aire de alta calidad, ya que evitan la presencia de aceite dentro de la cámara de compresión y reducen el riesgo de contaminación del sistema. Su configuración se basa en dos espirales acopladas: una espiral fija, anclada a la carcasa, y una espiral móvil, accionada por un motor. Durante la operación, la espiral móvil se desplaza mediante un movimiento orbital excéntrico, generalmente generado por un mecanismo tipo cigüeñal de carrera corta, sin producir contacto metal-metal directo.

El ciclo de trabajo se inicia cuando el movimiento orbital genera una zona de succión que permite la entrada de aire a través del puerto de admisión. A medida que la espiral móvil continúa su trayectoria, se forman cavidades selladas en forma de "media luna" entre ambas espirales, donde el aire queda atrapado. Posteriormente, estas cavidades se desplazan hacia el centro reduciendo su volumen de manera gradual, lo que provoca el aumento continuo de la presión hasta alcanzar el nivel requerido. Finalmente, el aire comprimido se evacua por un conducto ubicado en la zona central, incorporando comúnmente una válvula antirretorno para impedir el flujo inverso. Un aspecto relevante de este diseño es que la disposición geométrica y el desfase del movimiento contribuyen a una operación más estable, mientras que la compresión interna y progresiva tiende a disminuir fugas, ya que se mantienen diferencias de presión menores entre las cavidades. En conjunto, estas características permiten que el compresor scroll entregue un funcionamiento eficiente, confiable y con baja generación de

vibraciones, especialmente en configuraciones exentas de aceite orientadas a aire de mayor pureza. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

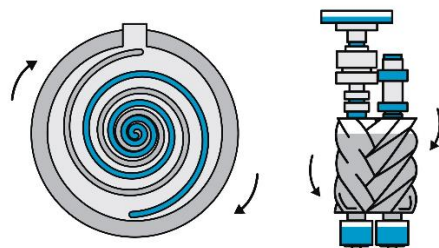


Ilustración 2-13: Compresor Scoll

Fuente: Atlas copco

2.12.7 Compresor de uña

El elemento compresor de un compresor de uña está constituido por dos rotores que giran en sentidos opuestos dentro de una cámara de compresión, generando el aumento de presión mediante un proceso cíclico. Este ciclo puede describirse en tres etapas principales: aspiración, compresión y descarga. En la fase de aspiración, el aire ingresa a la cámara hasta que la geometría de los rotores interrumpe el paso, sellando la entrada. Posteriormente, durante la compresión, el aire previamente admitido queda confinado y su volumen se reduce progresivamente conforme continúa la rotación, incrementándose así la presión. En esta etapa, la abertura de descarga permanece cerrada, ya que uno de los rotores la mantiene bloqueada, mientras que en la zona opuesta del conjunto se habilita nuevamente la admisión para incorporar aire fresco, permitiendo un funcionamiento continuo por sectores dentro de la cámara.

La etapa de descarga ocurre cuando el movimiento de los rotores libera la lumbrera de salida, expulsando el aire comprimido hacia el sistema. Para asegurar el correcto acoplamiento entre ambos rotores y evitar contacto directo, estos se mantienen sincronizados mediante un tren de engranajes. En equipos exentos de aceite, la relación máxima de presión alcanzable se encuentra condicionada por el incremento de temperatura entre la succión y la descarga; por esta razón, cuando se requiere operar a presiones superiores, suele ser necesario emplear múltiples etapas con enfriamiento intermedio, de modo de controlar la temperatura y mantener la eficiencia y confiabilidad del proceso. (Atlas Copco, s.f.)

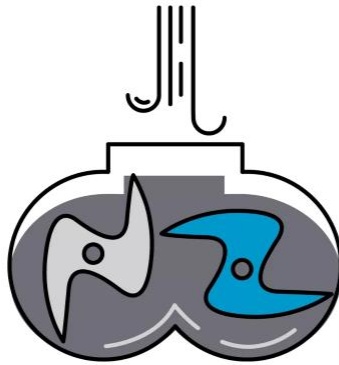


Ilustración 2-14: Compresor de uña

Fuente: Atlas copco

2.12.8 Compresor Centrifugo

El compresor centrífugo corresponde a una máquina de compresión dinámica en la que el incremento de presión se obtiene mediante la conversión de energía cinética en energía de presión. En su operación, el aire es admitido hacia el rodete, donde los álabes en rotación le transfieren energía y aumentan significativamente su velocidad; posteriormente, el flujo atraviesa el difusor, componente que reduce de forma controlada la velocidad del aire y transforma dicha energía cinética en presión estática. A continuación, la voluta o colector de geometría similar a una concha, recibe el aire comprimido proveniente del difusor y lo conduce hacia la descarga. Dado que la elevación de presión alcanzable en una sola etapa es acotada, estos equipos suelen implementarse en configuraciones multietapa, alcanzando típicamente hasta 2,5 bar en una etapa, entre 2,5 y 5,5 bar en dos etapas, entre 6 y 13 bar en tres etapas y, en arreglos de cuatro a ocho etapas, presiones considerablemente mayores que pueden aproximarse a 205 bar, dependiendo del diseño y la aplicación. (Atlas Copco, s.f.)



Ilustración 2-15: Compresor Centrifugo

Fuente: Atlas copco

2.12.9 Compresor axial

Los compresores axiales se caracterizan por presentar un flujo predominantemente axial, es decir, el aire se desplaza en dirección paralela al eje del compresor a través de sucesivas hileras de álabes rotativos y estacionarios. En este proceso, los álabes móviles incrementan progresivamente la velocidad del aire, mientras que los álabes fijos actúan como difusores, transformando parte de la energía cinética en aumento de presión. Debido a las fuerzas generadas en sentido longitudinal, estos equipos suelen incorporar un dispositivo de equilibrio (tambor de balance) con el fin de compensar el empuje axial. En comparación con los compresores centrífugos, los axiales tienden a ser más compactos y livianos para una misma capacidad, y normalmente operan a mayores velocidades de rotación. Se emplean principalmente en aplicaciones que requieren caudales elevados y continuos con incrementos de presión relativamente moderados, como sistemas de ventilación industrial. Asimismo, por su alta velocidad de operación, resultan adecuados para integrarse con turbinas de gas, tanto en generación eléctrica como en sistemas de propulsión aeronáutica. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)



Ilustración 2-16: Compresor Axial

Fuente: Alkenza

2.13 Partes de un compresor de tornillo

Contar con todos los componentes del sistema que se describirán más adelante es fundamental, ya que cada uno cumple una función específica que permite que el compresor de tornillo opere en condiciones adecuadas y suministre aire comprimido de forma eficiente, segura y continua al proceso. La correcta integración y mantención de estos elementos contribuye a minimizar pérdidas energéticas, reducir caídas de presión en la red, controlar la temperatura de operación y disminuir el riesgo de fallas mecánicas que puedan afectar la disponibilidad del sistema.

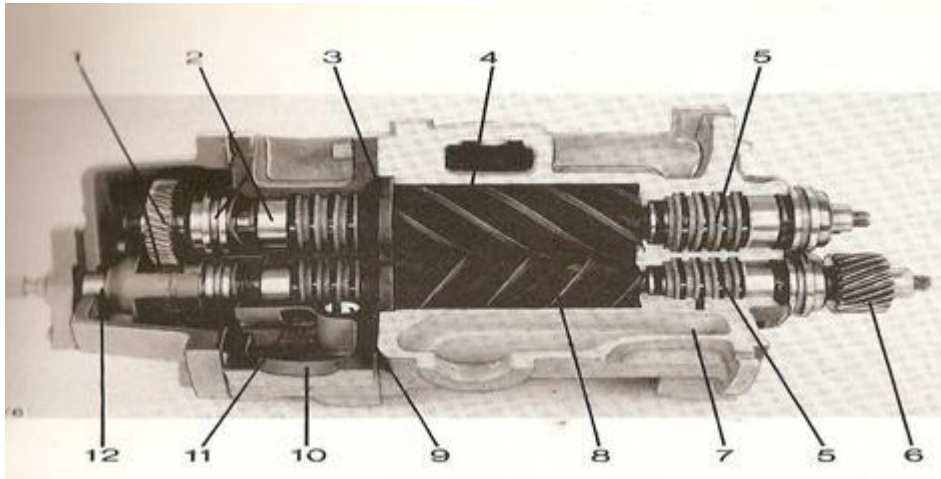


Ilustración 2-17: Componentes compresor de tornillo

Fuente: Kaeser compresores

2.13.1 Engranaje de sincronización

“Los tornillos no se encuentran en contacto, este engranaje es el responsable de que ambos tornillos giren en el sentido correspondiente” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.2 Rodamiento del rotor

“Encargado del eje principal del rotor” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.3 Separador

“Mantiene separados los tornillos) de la zona de transmisión donde se ubican engranajes de sincronización y rodamientos” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.4 Rotor hembra

“Formado por espacios llamados alvéolos” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.5 Empaques

“No permite que algún fluido salga por el compresor” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.6 Piñón

“Responsable del movimiento del sistema” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.7 Canal refrigerante

“Se encarga de mantener la temperatura estable” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.8 Rotor macho

“Formado por lóbulos” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.9 Orificio de ventilación

“Trabaja en equipo con el canal refrigerante con el mismo objetivo.” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.10 Puerto de salida

“Permite la salida de fluidos” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.11 Orificio de drenaje

“Permite la salida de fluidos de la cámara compresora” (Kaeser compresores, s.f.)

2.13.12 Pistón de equilibrio

“Mantiene a los ejes a la misma distancia” (Kaeser compresores, s.f.)

2.14 Red de aire

Es fundamental asegurar que el aire comprimido tenga la calidad correcta. Si el producto final entra en contacto con aire contaminado, los costos por rechazos pueden aumentar hasta niveles inaceptables, haciendo que una alternativa aparentemente económica termine siendo la más costosa. Por ello, la calidad del aire debe ajustarse a las exigencias del proceso productivo y, cuando sea posible, considerar también requerimientos futuros. El aire comprimido puede arrastrar contaminantes no deseados, como agua (en gotas o vapor), aceite (en forma de gotas o aerosol) y partículas de polvo. Según el uso que se le dé, estas impurezas pueden perjudicar el rendimiento del proceso, afectar la calidad del producto e incrementar los costos operacionales. El propósito del tratamiento del aire es entregar al usuario el nivel de pureza necesario para su aplicación. Cuando se define con claridad el rol del aire comprimido dentro del proceso, se facilita la elección de una solución que sea a la vez eficiente y costo-efectiva. Para ello, es clave determinar, por ejemplo, si el aire tendrá contacto directo con el producto o si se tolera cierta neblina de aceite en el ambiente de trabajo. En consecuencia, se requiere un enfoque sistemático para seleccionar el equipamiento más adecuado. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

2.14.1 Vapor de agua en el aire comprimido

“El aire de la atmósfera contiene siempre humedad en forma de vapor de agua. Lo mismo sucede con el aire comprimido. Esta circunstancia puede ocasionar problemas, como por ejemplo: altos costes de mantenimiento, reducción de la vida útil y deterioro del rendimiento de las herramientas, elevado índice de rechazos en el caso de pintura por pulverización e inyección de plásticos, aumento de las fugas, perturbaciones en el sistema de control y en la instrumentación, reducción de la vida útil de las tuberías debido a la corrosión y, en definitiva, una instalación más cara. El agua se puede separar utilizando refrigeradores posteriores, separadores de condensación, secadores frigoríficos y secadores de adsorción” (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

2.14.2 Tipos de redes de aire comprimido

Red abierta: Corresponde a un sistema de tuberías que se subdividen progresivamente para alimentar distintos puntos de consumo. Su principal beneficio es el menor costo, ya que, por lo general, requiere menos longitud de tubería o manguera que otras disposiciones. Habitualmente se organiza a partir de una línea principal de distribución, desde la cual se generan derivaciones que conducen el aire hacia ramales o líneas secundarias. (Chicago Pneumatic, s.f.)

Red cerrada: Se caracteriza por una disposición en anillo, donde la conducción forma un circuito. Esta configuración facilita las labores de operación y mantenimiento, debido a que es posible aislar un punto o sector sin detener el suministro en el resto de la red. En comparación con la red abierta, su implementación puede ser más exigente, porque el trazado permite que el aire circule por más de un camino, generando cambios en el sentido del flujo. Por ello, algunos equipos que requieren conexión en una única dirección pueden presentar restricciones de funcionamiento o incluso quedar temporalmente inoperativos. (Chicago Pneumatic, s.f.)

2.15 Medición de la red de tuberías

“Las redes fijas de distribución de aire comprimido deben dimensionarse para que las caídas de presión en los tubos no superen los 0,1 bar. Esta medición se refiere al punto de consumo más alejado del compresor. Al calcular la presión, deben tenerse en cuenta las mangueras flexibles conectadas, los acoplamientos y otros accesorios. La mayor caída se produce con frecuencia en estas conexiones.” (Atlas Copco, s.f.)

$$l = \frac{\Delta p \times d^5 \times p}{450 \times q_c^{1.85}}$$

Ilustración 2-18: Formula longitud de la tubería

Fuente: www.atlascopco.com

“La mayor longitud permitida en la red de tuberías para una determinada pérdida de carga se calcula mediante la siguiente ecuación.

l = longitud general de la tubería (m)

Δp = caída de presión permitida (bar)

p = presión absoluta de entrada (bar(a))

q_c = aire libre suministrado del compresor (FAD) (l/s)

d = diámetro interior de la tubería (mm).” (Atlas Copco, s.f.)

2.16 Depósito de aire

En una instalación de aire comprimido se incorporan uno o más depósitos cuyo volumen se define según el caudal del compresor, el sistema de regulación y la demanda de los equipos; estos recipientes almacenan aire, estabilizan la presión al amortiguar pulsaciones, favorecen el enfriamiento y permiten separar y acumular condensados, por lo que deben incluir un sistema de purga para evacuar el agua, y su dimensionamiento puede estimarse mediante

una ecuación aplicable únicamente a compresores con control de carga/descarga. (Atlas Copco, s.f.)

$$V = \frac{0.25 \times q_c \times p_1 \times T_0}{f_{max} \times (p_U - p_L) \times T_1}$$

Ilustración 2-19: Formula volumen tanque

Fuente: www.atlascopco.com

V = volumen del depósito de aire (l)

qC = FAD del compresor (l/s)

p1 = presión de entrada del compresor (bar(a))

T1 = temperatura de entrada máxima del compresor (K)

T0 = temperatura del aire del compresor en el depósito (K)

(pU - pL) = diferencia de presión establecida entre carga y descarga

fmax = frecuencia máxima de carga (se aplica 1 ciclo cada 30 segundos a los compresores Atlas Copco).

2.17 Tipos de depósitos de aire

Existen distintos tipos de depósitos de aire diseñados para adaptarse a los requerimientos de cada aplicación. Entre los más utilizados se encuentran los **depósitos de aire húmedo** y los **depósitos de aire seco**.

2.17.1 Depósitos de aire húmedo: Se ubican entre el compresor y el secador. Su función es almacenar aire comprimido sin tratamiento, contribuyendo a mejorar el desempeño del secador al favorecer la separación de humedad antes de que el aire continúe hacia el sistema. Con ello, el proceso de secado puede realizarse de manera más eficiente. (Atlas Copco, s.f.)

2.17.2 Depósitos de aire seco: Almacenan aire comprimido ya tratado y, por lo general, se instalan después del secador. Su objetivo principal es conservar la calidad del aire seco y asegurar una entrega estable y confiable, lo que ayuda a mantener un funcionamiento continuo y consistente de la instalación. (Atlas Copco, s.f.)

2.18 Secado del aire comprimido

El secado del aire comprimido tiene como propósito remover la humedad presente en el sistema. Disponer de aire seco disminuye la probabilidad de corrosión en la red de distribución y en los componentes asociados, además de contribuir a una mejor operación y mantenimiento de la maquinaria y las herramientas neumáticas conectadas. En términos generales, este tratamiento se realiza principalmente mediante dos tecnologías: el secado por refrigeración (en frío) y el secado por adsorción. (Chicago Pneumatic)

2.18.1 Secador por adsorción

El secador por adsorción está compuesto por dos recipientes a presión que contienen un material desecante, habitualmente óxido de aluminio, gel de sílice o una combinación de ambos. El aire comprimido ingresa a uno de los recipientes y, al entrar en contacto con el desecante, se reduce su contenido de humedad hasta alcanzar un punto de rocío aproximado de -25°C o incluso menor. La mayor parte del aire ya seco se envía directamente a la red de aire comprimido, mientras que una fracción menor (aproximadamente entre 3 % y 15 %) se deriva al segundo recipiente, donde se expande hasta presión atmosférica. Este aire expandido se utiliza para regenerar el desecante, ya que absorbe la humedad retenida en el material y posteriormente se descarga al ambiente junto con dicha humedad. Transcurrido un intervalo determinado, ambos recipientes intercambian sus funciones, lo que permite mantener un proceso de secado continuo. Debido a que este tipo de secador es sensible a la presencia de aceite y agua en el aire comprimido, debe instalarse previamente un filtro separador de aceite y condensado. (Chicago Pneumatic)

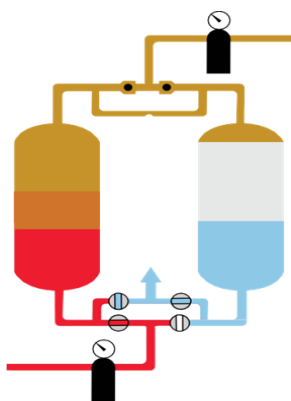


Ilustración 2-20: *Secador de adsorción con regeneración por enfriamiento*

Fuente: Manual aire comprimido chicago Pneumatic

2.18.2 Secador por refrigeración

El secador por refrigeración (secado en frío) incorpora un sistema frigorífico compuesto, en términos generales, por un compresor de refrigeración, un intercambiador de calor y un fluido refrigerante. Durante su operación, el aire comprimido se enfría aproximadamente en un

rango de 0 a 6 °C, lo que provoca la condensación del vapor de agua; posteriormente, el condensado se separa de forma automática.

Este equipo permite obtener un punto de rocío del aire comprimido cercano a +3 a +10 °C, valor que suele ser suficiente para evitar la formación de condensación en aplicaciones ubicadas en ambientes interiores calefaccionados. Entre sus ventajas se encuentran su instalación sencilla, bajo consumo energético relativo y una menor sensibilidad a la presencia de aceite en comparación con otros métodos de secado. No obstante, se recomienda instalar un filtro separador de aceite aguas abajo del secador para disminuir el contenido de aceite residual en el aire suministrado. (Chicago Pneumatic)

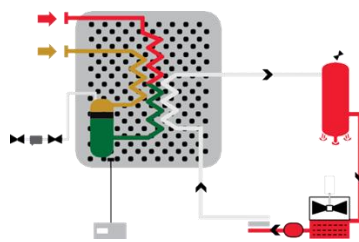


Ilustración 2-21: *Secador por refrigeración*

Fuente: Manual aire comprimido chicao Pneumatic

2.19 Filtrado aire comprimido

La incorporación de filtros en una instalación de aire comprimido permite reducir la concentración de contaminantes hasta valores compatibles con los requerimientos del aire de servicio, e incluso eliminarlos prácticamente por completo cuando la aplicación lo exige. Para la purificación de aire comprimido y gases se emplean, de manera predominante, tres mecanismos de filtración: filtración superficial, filtración en profundidad y filtración mediante carbón activado. (Chicago Pneumatic)

2.19.1 Filtrado de superficie

El filtro de superficie funciona bajo un principio similar al de un tamiz, donde las partículas con dimensiones mayores que las aberturas del elemento filtrante quedan retenidas en la superficie, mientras que las de menor tamaño atraviesan el medio. De este modo, el tamaño de poro del material filtrante determina la capacidad de separación de partículas hasta un límite específico.

A medida que las aberturas se obstruyen por la acumulación de contaminantes, se produce una pérdida de presión en el sistema, lo que hace necesario limpiar o sustituir el elemento filtrante. Entre los materiales comúnmente empleados en este tipo de filtros se encuentran la celulosa, el polietileno y el metal sinterizado. (Chicago Pneumatic)

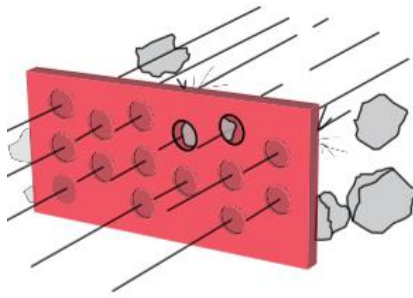


Ilustración 2-22: *Filtrado de superficie*

Fuente: Manual aire comprimido chicago Pneumatic

2.19.2 Filtración con carbón activado

La filtración con carbón activado permite remover vapores de aceite y ciertos compuestos gaseosos presentes en el aire comprimido, obteniéndose así un aire de mejor calidad, sin olor ni sabor. En términos generales, el carbón activado contenido en el elemento filtrante puede retener aceite hasta una cantidad cercana al 15 % de su masa, momento en el cual el material alcanza su saturación y debe sustituirse el cartucho o elemento del filtro.

Para que este sistema opere de manera eficiente, es necesario instalar previamente un filtro de profundidad, cuya función es separar las gotas de aceite antes de que el aire llegue al carbón activado. Además, el aire comprimido debe someterse a un proceso de secado antes de esta etapa de filtración, con el fin de evitar que la humedad reduzca la capacidad de adsorción del carbón. (Chicago Pneumatic)

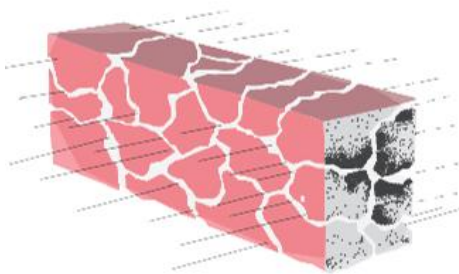


Ilustración 2-23: *Filtrado con carbón activado*

Fuente: Manual aire comprimido chicago Pneumatic

2.19.3 Filtración profunda

La filtración profunda permite separar el aceite y las partículas presentes en el aire comprimido mediante un elemento filtrante compuesto por fibras de vidrio. En este proceso, las gotas de aceite son retenidas por las fibras, luego atraviesan el material por efecto de la presión y, finalmente, son evacuadas a través de una válvula de drenaje ubicada en la parte inferior de la carcasa del filtro. Por su parte, las partículas sólidas quedan atrapadas en los espacios existentes entre las fibras.

A medida que el medio filtrante se va saturando debido a la acumulación de contaminantes, se produce una caída de presión a través del filtro, lo que indica la necesidad de reemplazar el elemento filtrante. La eficiencia de separación de aceite aumenta cuando el aire comprimido se encuentra a baja temperatura (aproximadamente +20 °C o inferior) y cuando la velocidad de paso del aire a través del filtro se mantiene dentro del rango adecuado. (Chicago Pneumatic)

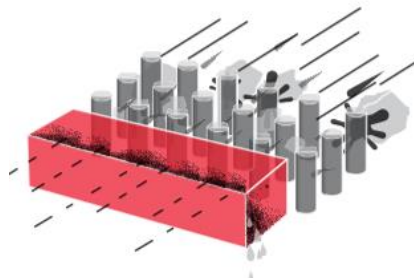


Ilustración 2-24: *Filtrado profundo*

Fuente: Manual aire comprimido chicago Pneumatic

2.20 EFICIENCIA ENERGETICA Y DESEMPEÑO EN SISTEMAS

2.20.1 Eficiencia isentrópica y potencia específica

La eficiencia isentrópica "es una relación entre las energías real e ideal de un compresor de aire. Su valor está expresado en porcentual y cuando mayor es el porcentaje será más eficiente en transformar la energía eléctrica en aire comprimido. Dado que no existe una compresión ideal debido a la coexistencia de pérdidas, que podemos enumerarlas: dentro del bloque compresor en los compresores a tornillos lubricados la potencia consumida en su eje incluye pérdidas internas tales como fricciones generadas por la película de aceite de refrigeración entre los rotores y la carcasa, en los compresores reciprocantes la fricción del aceite entre los aros y la camisa del pistón, los cambios de velocidad de las masas en movimiento durante la compresión, resistencia de caudal por pérdidas de presión en la entrada y salida del bloque compresor, pérdidas de caudal másico debido a los cambios de densidad del aire debido al calentamiento del aceite en los compresores lubricados y no lubricados. También podemos mencionar como pérdidas, la eficiencia del tipo de control interno del compresor y el grado de eficiencia en los motores eléctricos de accionamiento y de ventilación, pérdidas de presión en el tanque separador aire-aceite, diferencial de presión de filtros separador y de aceite, los enfriadores de aire y aceite, tuberías, mangueras y accesorios de unión, pérdidas de caudal másico por cambios en la densidad del aire aspirado para la compresión al producirse su calentamiento dentro de la cabina del compresor." (Ghiglia, 2021)

Potencia específica "también llamada energía específica, es la energía que proporciona el consumo de total de potencia consumida por cada unidad de caudal efectivo de aire entregado. Está representada en unidades de kilowatt por cada metro cúbico por minuto (kW/m³/min) o kilo Watt por cada cien pies cúbicos por minuto (kW/100 cfm) de aire comprimido. La Potencia Específica es la relación entre el trabajo real y el caudal volumétrico real entregado por el compresor de aire comprimido. Es una relación estándar y debe estar vinculado a los protocolos de medición y debe compararse con la misma presión de diseño y es utilizada para calcular los costos específicos del aire comprimido cuando se conoce el caudal volumétrico y el tiempo operativo y su unidad está dada en valor moneda (Peso, Dólar Estadunidense, Euro, etc.) por cada metro cubico o pie cúbico de aire comprimido." (Ghiglia, 2021)

2.20.2 Pérdidas energéticas más comunes

Las pérdidas energéticas más comunes en un sistema de compresor de tornillo y red de aire comprimido se deben principalmente a ineficiencias mecánicas, fugas y malas condiciones de operación. En primer lugar, las fugas son la causa más frecuente, representando hasta un 30% del consumo total de energía del sistema. Ocurren en conexiones, mangueras, válvulas o acoples, y provocan que el compresor trabaje más tiempo para mantener la presión, aumentando el gasto eléctrico. El sobredimensionamiento del compresor también genera pérdidas importantes: un equipo con capacidad superior a la demanda real opera en ciclos de carga y descarga frecuentes, lo que disminuye la eficiencia isentrópica y eleva el consumo energético sin necesidad productiva. Las variaciones de presión dentro de la red, por mal dimensionamiento de tuberías o acumulación de condensado, causan caídas de rendimiento en los puntos de uso y obligan al compresor a trabajar a presiones más altas, lo que incrementa el costo energético. Finalmente, las pérdidas por condensado y temperatura se producen cuando el aire comprimido no se seca o enfría adecuadamente, generando humedad que deteriora válvulas y equipos, además de aumentar la densidad del aire y las pérdidas por fricción. En conjunto, estos factores reducen la eficiencia global del sistema y deben controlarse mediante un mantenimiento preventivo, detección de fugas, correcto dimensionamiento y tratamiento del aire comprimido. (Atlas Copco Airpower Nv, 2014)

2.20.3 Indicadores de desempeño

En un sistema de aire comprimido, los indicadores energéticos sirven para entender cuánta electricidad se necesita para producir el aire que realmente utiliza la operación. Gracias a estos parámetros es posible saber si el compresor está trabajando de forma conveniente o si existen pérdidas que están encareciendo el proceso. Por ejemplo, al relacionar la potencia consumida con el caudal entregado, se puede observar qué tan exigido está el equipo en un momento determinado; si se requiere demasiada energía para generar poco aire, eso refleja una operación poco eficiente. De manera similar, cuando se analiza la energía total en función de la masa de aire producida, se obtiene una visión más amplia del desempeño del sistema a lo largo del tiempo, lo que permite comparar equipos, periodos de trabajo o condiciones de operación. En términos generales, estos indicadores ayudan a evaluar no solo el comportamiento del compresor, sino también el efecto de fugas, sobrecargas, pérdidas térmicas y problemas en la red, por lo que resultan útiles para detectar oportunidades de mejora y fundamentar acciones como ajustes operacionales, mantenimiento y control de pérdidas.

2.21 MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD

2.21.1 El mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo

Son estrategias complementarias orientadas a asegurar la continuidad y eficiencia operativa de los equipos industriales.

El **mantenimiento correctivo** corresponde a una estrategia en la que el equipo se interviene únicamente cuando ya se ha producido una falla. Su principal atractivo es que evita costos asociados a inspecciones frecuentes y a actividades preventivas planificadas, por lo que suele considerarse conveniente en componentes de bajo valor y poca criticidad, donde una detención inesperada no genera impactos significativos en la continuidad operacional. En estos casos, puede resultar más económico reparar o reemplazar tras la avería que implementar un programa de mantenimiento más complejo. Sin embargo, aún bajo este enfoque, es recomendable mantener acciones básicas y rutinarias como lubricación, engrase o cambio de piezas menores, para extender la vida útil del activo, salvo cuando se trate de equipos cercanos al término de su ciclo de vida. El problema central del mantenimiento correctivo es su carácter reactivo: las fallas ocurren sin aviso y, al no existir una planificación previa, es común que los tiempos de respuesta aumenten por falta de repuestos, coordinación y disponibilidad de personal. Esto puede traducirse en mayores horas de detención y costos indirectos superiores a los esperados. Además, si la reparación se limita a “devolver el equipo a funcionamiento” sin abordar la causa raíz, existe una alta probabilidad de recurrencia de la misma falla, lo que termina reduciendo la confiabilidad y generando intervenciones repetitivas en periodos cada vez más cortos. (gestionsigweb, 2019)

El mantenimiento preventivo consiste en aplicar acciones planificadas con el objetivo de reducir la probabilidad de fallas y, con ello, disminuir la necesidad de reparaciones imprevistas, buscando mantener la disponibilidad y el desempeño del equipo con un costo global controlado. Para implementar esta estrategia se establecen rutinas periódicas de revisión, ajuste y recambio de componentes que presentan desgaste o deterioro, antes de que su condición afecte el funcionamiento. Dentro de estas rutinas, las inspecciones cumplen un rol central, ya que implican revisar el estado de los elementos del equipo mediante intervenciones que pueden requerir desmontajes parciales o totales. Durante estas revisiones se reemplazan piezas que no cumplen con los requisitos operacionales o que evidencian degradación, y en algunos casos se realizan sustituciones de forma preventiva basadas en horas de operación o vida útil estimada, con el fin de disminuir el riesgo de falla. La definición de los intervalos de inspección es determinante para la efectividad del mantenimiento preventivo: si se programan con demasiada frecuencia, se generan costos innecesarios y recambios prematuros; si se espacian en exceso, aumenta la probabilidad de fallas inesperadas. Su principal desventaja, por tanto, se relaciona con los costos directos de

inspección y, especialmente, con las detenciones programadas, que en ciertos procesos pueden significar pérdidas relevantes. Además, aunque el mantenimiento preventivo reduce el riesgo, no lo elimina por completo, ya que siempre existe la posibilidad de una falla entre intervalos de revisión. (gestionsigweb, 2019)

Mantenimiento predictivo Es una pieza fundamental de cualquier estrategia de mantenimiento basada en condición es planificar correctamente las actividades que se ejecutarán en planta, porque un programa bien estructurado permite anticiparse a los problemas y abordar sus causas antes de que se transformen en fallas. Para que este plan sea realmente efectivo, conviene respaldarlo con un historial de mantenimiento que registre tiempos reales de ejecución, cantidad de personal involucrado y recursos utilizados, de manera que el programa se vaya ajustando y mejorando con la experiencia. Este enfoque suele generar ahorros importantes, ya que al detectar desviaciones en etapas tempranas se pueden preparar con anticipación las reparaciones, coordinar repuestos, materiales y mano de obra, y reducir detenciones no programadas; además, al apoyarse en la observación de variables vinculadas al deterioro del equipo, permite aprender del comportamiento operativo e identificar patrones que ayudan a disminuir la repetición de fallas. Sin embargo, su aplicación exige contar con indicadores medibles y representativos del estado del activo y la capacidad de monitorearlos de forma confiable, considerando que no existe un parámetro único capaz de describir con total certeza la condición del equipo y que la vigilancia permanente no siempre es viable por costos y complejidad, por lo que en la práctica se recurre a monitoreos periódicos y se reserva el seguimiento continuo para equipos de alta criticidad. (gestionsigweb, 2019)

2.21.2 Aplicación de RCM (Reliability Centered Maintenance)

Modo de falla	Función principal del equipo	Causas de la falla	Consecuencias de la falla	Tareas de mantenimiento	Indicadores de desempeño
Filtros obstruidos	Suministrar aire comprimido limpio y a presión constante	Contaminación	Alto	Cambio de filtros preventivo	MTBF • MTTR Disponibilidad
Desgaste de cojinetes		Falta de lubricación	Medio	Análisis de vibraciones	Eficiencia energética
Desalineación de rotores		Montaje incorrecto	Bajo	Inspección funcional	Eficiencia energética
Falla de válvula de admisión		Sobreconsumo de energía	Bajo	Prueba de apertura y cierre	MTBF • MTTR Disponibilidad
Fuga en la red de aire		Pérdida de presión en la red	Bajo	Detección e inspección de fugas	Eficiencia energética
Falla del sistema de control		Desconexión intempestiva		Comprobación de relés y sensores	MTBF Disponibilidad

Tabla 4: RCM en compresor de tornillo

Fuente: Elaboración propia

2.22 Modos de fallas comunes en compresores de tornillo

En los compresores de tornillo, los modos de falla más habituales suelen estar asociados a una operación fuera de condiciones recomendadas, prácticas de mantenimiento insuficientes y el desgaste natural de elementos clave. Entre ellos, destacan las pérdidas de aire en uniones, sellos y componentes de control, que reducen la presión disponible en la red y obligan al equipo a operar durante más tiempo para sostener la demanda, elevando el consumo eléctrico y el esfuerzo del sistema. Otro problema recurrente es el incremento anormal de temperatura, normalmente ligado a restricciones en filtros, deficiencias en el enfriamiento o niveles/condición inadecuada del lubricante, situación que acelera el deterioro de sellos y puede comprometer el funcionamiento del conjunto de rotores. Asimismo, el deterioro de rodamientos aparece con frecuencia cuando existe lubricación deficiente, ingreso de contaminantes o desalineación, manifestándose a través de vibraciones, ruido y una caída progresiva del rendimiento mecánico. A lo anterior se suma la degradación del aceite por humedad, polvo o partículas metálicas, lo que disminuye su capacidad de lubricación y sellado, intensificando el desgaste interno y afectando la eficiencia del proceso de compresión. En conjunto, estas fallas impactan la confiabilidad y el desempeño energético del sistema, por lo que resulta clave su control mediante estrategias preventivas y predictivas (por ejemplo, inspecciones programadas, control de temperatura, monitoreo de vibraciones y análisis de lubricante), con el fin de asegurar continuidad operacional y extender la vida útil del equipo. (tec tecnologia en compresión de occidente, 2024)

2.23 Indicadores de mantenimiento

2.23.1 MTBF (Mean Time Between Failures – Tiempo Medio Entre Fallas)

Cuanto mayor sea el MTBF, **más confiable** es el equipo, ya que significa que opera durante más tiempo sin fallar. Permite determinar la frecuencia con que ocurren fallas como sobrecalentamiento, fugas o desgaste de rodamientos, ayudando a planificar mantenimientos preventivos. (Toro, 2023)

$$MTBF = \frac{TIEMPO\ TOTAL\ DE\ OPERACION}{NUMERO\ DE\ FALLAS}$$

2.23.2 MTTR (Mean Time To Repair – Tiempo Medio de Reparación)

Un MTTR bajo indica **alta mantenibilidad**, es decir, que las reparaciones se ejecutan de forma rápida y eficiente. Permite evaluar la eficacia del equipo técnico y la facilidad de acceso a componentes críticos (filtros, sellos, rodamientos). (Toro, 2023)

$$MTTR = \frac{TIEMPO\ TOTAL\ DE\ REPARACION}{NUMERO\ DE\ REPARACIONES}$$

2.23.3 Disponibilidad (A)

Indica el porcentaje de tiempo que el equipo está en condiciones de operar respecto al total del tiempo considerado. Es clave para medir la continuidad del suministro de aire comprimido al taller, especialmente en procesos críticos que no pueden detenerse. (Toro, 2023)

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

2.23.4 Confiabilidad (R)

Es la probabilidad de que un equipo funcione sin fallas durante un período determinado de tiempo bajo condiciones específicas. Permite estimar el riesgo de fallas imprevistas y definir intervalos óptimos de mantenimiento predictivo. (Toro, 2023)

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

Indicador	Que mide	Valor ideal	Uso en mantenimiento
MTBF	Tiempo promedio entre fallas	Alto	Evalúa confiabilidad
MTTR	Tiempo promedio de reparación	Bajo	Evalúa mantenibilidad
Disponibilidad (A)	Porcentaje de tiempo operativo	> 90%	Evalúa eficiencia operativa
Confiabilidad (R)	Probabilidad de operar sin fallas	Alta	Evalúa riesgo de falla

Tabla 5: Indicadores de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

2.24 Normativas

2.24.1 ISO 1217

La ISO 1217 es una referencia técnica utilizada para evaluar el desempeño de compresores de aire de desplazamiento positivo, incluyendo los compresores de tornillo. En términos prácticos, la norma define cómo deben realizarse las pruebas y mediciones para obtener resultados consistentes y comparables, considerando variables como caudal entregado, presión de descarga, potencia absorbida y el rendimiento del equipo. Para ello, establece condiciones de referencia y criterios de ensayo (por ejemplo, relacionadas con temperatura, presión atmosférica y humedad), de manera que los valores reportados no dependan únicamente del contexto puntual de medición, sino que representen el comportamiento del compresor bajo un marco estandarizado. En aplicaciones industriales, esta norma se utiliza como apoyo para contrastar el desempeño declarado por el fabricante, sustentar comparaciones entre alternativas y respaldar análisis técnicos en estudios de eficiencia energética o en proyectos de reemplazo y modernización de equipos. (Gonzalez, s.f.)

2.24.2 ISO 8573-1

La **norma ISO 8573-1** define los **niveles de calidad del aire comprimido**, clasificándolo según el contenido máximo permitido de partículas sólidas, humedad y aceite. Establece un sistema de clases que van desde 0 (máxima pureza) hasta 9, con límites expresados en micrómetros, mg/m³ y ppm. Esta norma es esencial para asegurar que el aire comprimido utilizado en los procesos industriales sea adecuado a las exigencias de cada aplicación, evitando daños en herramientas, instrumentación o productos. En el caso de los compresores de tornillo, su cumplimiento garantiza la entrega de aire seco y limpio, protegiendo la red de distribución y prolongando la vida útil de los equipos. (Gonzalez, s.f.)

2.24.3 ISO 50001

La **norma ISO 50001** proporciona un marco de referencia para la implementación de **sistemas de gestión energética** dentro de las organizaciones. Su propósito es promover la eficiencia energética mediante la medición, control y mejora continua del consumo de energía. En lo referente a sistemas de aire comprimido, esta norma impulsa la identificación de pérdidas, la corrección de fugas, el control de presiones y el mantenimiento adecuado del compresor. Además, fomenta la creación de indicadores energéticos (como kW/m³/min) y la capacitación del personal para una gestión responsable del consumo eléctrico. La adopción de esta norma contribuye directamente a la reducción de costos operativos y al cumplimiento de políticas de sostenibilidad industrial. (Gonzalez, s.f.)

2.24.4 Contexto nacional DS N°594

En el contexto nacional, los reglamentos chilenos también son relevantes. **El Decreto Supremo N°594** del Ministerio de Salud establece normas sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, incluyendo límites de ruido, temperatura y calidad del aire, aspectos directamente relacionados con la operación de compresores industriales. Además, otras disposiciones del Ministerio de Energía y la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) promueven la eficiencia energética y la seguridad en equipos a presión. En conjunto, estas normativas garantizan que los sistemas de aire comprimido operen con seguridad, eficiencia y sostenibilidad, cumpliendo con estándares internacionales y la legislación chilena vigente. (Biblioteca del congreso nacional de Chile/BCN, 2000)

CAPÍTULO III:
DISEÑO Y SOLUCIÓN

3.1 Contexto de solución

Para comprender la propuesta de solución, es necesario que el nuevo equipo cumpla con los requerimientos del taller en cuanto a la demanda de aire comprimido. En este sentido, se realizará una comparación entre dos alternativas: por un lado, un mantenimiento completo del compresor que actualmente se encuentra en operación y, por otro, la incorporación de un equipo nuevo en reemplazo del existente. Además, la evaluación incluirá el recálculo del tanque de aire y la selección del secador de aire correspondiente.

3.2 Diagnóstico del compresor Schulz

Aspecto evaluado	Observación técnica	Conclusión / Estado
Rendimiento volumétrico (caudal de aire)	El caudal entregado es inferior al valor nominal (60 CFM). El tiempo de carga del estanque ha aumentado notoriamente.	Perdida de eficiencia por desgaste interno (válvulas y pistones)
Consumo eléctrico	El consumo supera en un 15-20% el valor esperado para 15 HP. El motor opera con mayor carga debido a fugas y baja eficiencia	Alto consumo energético, funcionamiento ineficiente
Temperatura de operación	SE registran temperaturas elevadas en la carcasa y cabezales. Indicios de deficiencia en el sistema de refrigeración y lubricación.	Riesgo de sobrecalentamiento, lubricación deficiente
Presión de trabajo	Variaciones frecuentes entre 8 y 12 bar. Sin estabilidad en la red de aire.	Inestabilidad del sistema, afecta equipos neumáticos
Fallas recurrentes	Fugas de aceite, vibraciones excesivas y ruidos anómalos durante la operación.	Desgaste en rodamientos, sello y válvulas
Mantenimiento histórico	Registros de reparaciones frecuentes y reemplazos parciales sin solución definitiva.	Mantenimiento correctivo elevado, bajo tiempo medio entre fallas (MTBF)

Condición general del equipo	Desgaste estructural evidente, bajo desempeño y alta demanda energética.	Compresor en mal estado
------------------------------	--	-------------------------

Tabla 6: Diagnostico del compresor Schulz

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Conclusión del diagnostico

A partir del diagnóstico realizado, se concluye que no resulta conveniente mantener el compresor actual como solución principal mediante nuevas reparaciones, ya que el deterioro observado no corresponde a una falla puntual, sino a un desgaste general del equipo. En primer lugar, se evidencia una disminución del rendimiento volumétrico, debido a que el compresor entrega un caudal inferior al nominal (60 CFM) y requiere más tiempo para cargar el tanque, lo que sugiere desgaste interno en componentes como válvulas, pistones y sellos. Asimismo, se identificó un consumo eléctrico entre 15 y 20% superior al esperado para un motor de 15 HP, lo que refleja una operación ineficiente desde el punto de vista energético.

Por otra parte, las altas temperaturas de operación registradas en la carcasa y los cabezales, junto con indicios de deficiencias en lubricación y refrigeración, incrementan el riesgo de sobrecalentamiento y fallas de mayor gravedad. A esto se suma la inestabilidad en la presión de trabajo (variaciones entre 8 y 12 bar), condición que afecta el funcionamiento de la red neumática y de los equipos del taller. Del mismo modo, la presencia de fugas de aceite, vibraciones excesivas y ruidos anómalos confirma un estado de desgaste mecánico avanzado. Finalmente, el historial de mantenimiento muestra que se han realizado reparaciones frecuentes y reemplazos parciales sin una solución definitiva, lo que se traduce en una baja confiabilidad operativa y un reducido tiempo medio entre fallas (MTBF).

En consecuencia, el compresor se encuentra en un estado de baja eficiencia, alta demanda energética y limitada confiabilidad, por lo que la alternativa más conveniente desde el punto de vista técnico es su reemplazo por un equipo nuevo. No obstante, podría considerarse un mantenimiento solo como medida transitoria, con el objetivo de mantener la operación mientras se concreta el recambio. Para sustentar esta decisión en la tesis, se recomienda comparar las alternativas de mantenimiento integral y reemplazo considerando variables como costo inicial, consumo energético, costos de mantenimiento, frecuencia de fallas, tiempos de detención, estabilidad de presión y vida útil esperada.

3.3 Cálculos de indicadores de mantenimiento

Para realizar estos cálculos, se considerará que el compresor que se encuentra actualmente en el taller es un equipo marca Schulz modelo MSWS 60 con presión máxima de 12 bar y desplazamiento teórico de 1700 L/MIN.

Este equipo trabaja 8 horas a la semana y los 7 días de la semana.

3.4 Tiempo total de operación

8 H/DIA X 365 DIAS

T= 2920 H

El tiempo total de operación es de 2012 horas, este resultado indica el tiempo efectivo de funcionamiento anual del año.

3.4.1 MTBF / Tiempo medio entre fallas

$$MTBF = \frac{TIEMPO\ TOTAL\ DE\ OPERACION}{NUMERO\ DE\ FALLAS}$$

$$MTBF = \frac{2920}{16} = 182,5\ HORAS$$

El compresor presenta un promedio aproximado de una falla por 182,5 horas de Trabajo, si hacemos la equivalencia en días, tenemos, aproximadamente 23 días de operación.

3.4.2 MTTR / Tiempo medio de reparación

Tiempo promedio de reparación: 16 x 8 = 128 HORAS

$$MTTR = \frac{128}{16} = 8\ HORAS$$

Cada vez que el compresor de aire Schulz MSWS 60 presente una falla, estará sin funcionar una jornada laboral completa, viéndose muy afectada la disponibilidad operacional del equipo y llevando la producción a cero ese día.

3.4.3 Disponibilidad operativa

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$A = \frac{182,5}{182+8} = 0.960$$

$$A = 96\%$$

El equipo se encuentra sin funcionar un 4%. Este nivel de disponibilidad no es el óptimo, es esencial el compresor en la red de aire. Todo esto provoca detenciones inesperadas.

3.4.4 Tasa de fallas

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

$$\lambda = \frac{1}{182,5} = 0.0055 \text{ FALLAS/HORAS}$$

$$0.0055 \times 24 = 0.13 \text{ FALLAS/ DÍA}$$

$$\frac{1}{0.13} = 7.7 \text{ DÍAS}$$

El equipo nos refleja que tiene entre 7 y 8 fallas en días calendario. Nos da como evidencia que existe un deterioro considerable.

3.4.5 Confiabilidad

$$(R)^t = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

Confiabilidad jordana de 8 horas.

$$R(8) = e^{-\frac{8}{182,5}} = 0.957$$

$$R(8) = 95.7\%$$

Confiabilidad una semana 56 horas.

$$R(56) = e^{-\frac{56}{182,5}} = 0.736$$

$$R(56) = 73.6\%$$

Confiabilidad de un mes 240 horas

$$R(240) = e^{-\frac{240}{182,5}} = 0.268$$

$$R(240) = 26.8\%$$

Al calcular la confiabilidad nos podemos dar cuenta que el equipo puede completar una jornada de trabajo, pero al ser exigido durante un mes, sería difícil que no tenga detenciones por fallas, evidenciando que tiene una muy baja confiabilidad a mediano plazo.

3.5 Requerimientos para seleccionar el equipo optimo

- **Dimensionamiento del compresor:** Verificar si la capacidad del equipo actual es adecuada o insuficiente, y aproximar el caudal necesario para la operación real.
- **Estimación de fugas:** Repetir la medición en condiciones de bajo o nulo consumo (o aislando equipos) para aproximar el caudal asociado a pérdidas por fugas.
- **Evaluación del volumen de almacenamiento:** Identificar si el tamaño del estanque es coherente con la demanda; caídas de presión muy rápidas pueden indicar falta de volumen de acumulación o presencia de consumos pico elevados.
- **Medición de mejoras:** Comparar resultados antes y después de acciones de optimización (por ejemplo, reparación de fugas o ajustes en puntos de soplado), permitiendo cuantificar el impacto de dichas medidas. (Chicago Pneumatic)

REQUERIMIENTOS DE AIRE COMPRIMIDO		COMPRESOR
Operación intermitente: (un turno, max. 4 horas/día) • Cantidad de aire comprimido 50-800 l/min • Presión operativa 100-800 kPa (1-8 bar) • Presión operativa 700-3,000 kPa (7-30 bar)		Compresor de pistón de una etapa (con tanques de aire)
(Turno único) • Cantidad de aire comprimido 100 l/min • Electric. more • Presión operativa 500-1,300 kPa (5-13 bar)		Compresor de pistón de varias etapas (con tanques de aire)
Operación continua: • Capacidad 100 l/min y más • Presión operativa 500-1,300 kPa (5-13 bar)		Compresor de tornillo con tanques de aire

Ilustración 3-25: Requerimiento de aire comprimido

Fuente: Guia del aire comprimido Chicago Pneumatic

REQUERIMIENTOS DE CALIDAD		EQUIPO OPCIONAL
Aire operativo para herramientas neumáticas en habitaciones climatizadas.		Secador
- Aire de trabajo en habitaciones sin calefacción o tuberías al aire libre. Aire operativo para mecánica y electrónica de precisión hasta -70 en el punto de rocío - Al usar el secador como post-filtro. Cuando se utiliza un secador de adsorción y prefiltros. Al pintar con spray, chorrear y limpiar.		Secador de adsorción
- Aire respirable, (usando secadores fríos o de adsorción). Aire de laboratorio. - Aire operativo para mecánica de precisión y electrónica.		Filtros separadores + Filtro de carbón activado
- El condensado aceitoso no puede ser liberado en el sistema de alcantarillado. - Por un compresor limpio y un medio ambiente sano.		Separador de aceite-agua

Ilustración 3-26: Requerimiento de calidad

Fuente: Guia del aire comprimido Chicago Pneumatic

3.6 Cálculos para determinar equipos

3.6.1 Calculo caudal equivalente

$$Q_{eq} = \sum (Q_i \times F_i)$$

$$Q_{eq} = 480(0.8) + 300(0.5) + 250(0.5) + 350(0.8) + 450(0.8) + 200(0.5) + 150(0.5)$$

$$Q_{eq} = 384 + 150 + 125 + 280 + 360 + 100 + 75$$

$$Q_{eq} = 1474 \text{ L/min}$$

Herramientas continuas: 0.8

Herramientas intermitentes: 0.5

El taller necesita aproximadamente 1500 L/min para funcionar de manera óptima.

3.6.2 Velocidad real para el diámetro de la red

$$D = 0.038 \text{ m}$$

$$V = 1 + \frac{4 \times Q}{\pi \times D}$$

$$V = 1 + \frac{4 (0.02457)}{\pi (0.038^2)}$$

$$V = \frac{0.09828}{0.004534}$$

$$\mathbf{V = 21.67 \text{ m/s}}$$

- Ligeramente por encima del recomendado (20 m/s), pero totalmente tolerable en redes cortas y en anillo.
- El anillo reduce la carga efectiva, bajando la velocidad real hacia cada punto.

3.6.3 Numero de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$Re = \frac{(11) (21,7) (0,038)}{1,9 \times 10^{-5}} \approx \frac{9,1}{1,9 \times 10^{-5}} \approx 4,8 \times 10^{-5}$$

Con los valores utilizados en el cálculo, se obtiene un **número de Reynolds** del orden de $4,8 \times 10^5$. Este valor permite concluir que el aire circula en la tubería bajo un **régimen turbulento**, ya que supera ampliamente el rango de transición comúnmente considerado, el cual se sitúa aproximadamente en $Re \approx 4000$.

- ▶ Número adimensional
- ▶ Predice la turbulencia del flujo
- ▶ **< 2000:** *Flujo laminar*
- ▶ **2000-3000:** *Probable flujo turbulento*
- ▶ **> 3000:** *Flujo turbulento*

Ilustración 3-27: Clasificación del régimen de flujo (según Reynolds)

Fuente: www.goconqr.com

3.6.4 Factor de fricción

$$f = 0,25 \left[\log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3,7 D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}$$

$$\frac{\epsilon}{3,7 D} \approx \frac{1,5 \times 10^{-6}}{3,7 \times 0,038} \approx 1,1 \times 10^{-5}$$

$$\frac{5,74}{Re^{0,9}} \approx 4,4 \times 10^{-5}$$

$$\approx 5,5 \times 10^{-5}$$

$$\log_{10}(5,5 \times 10^{-5}) \approx -4,26$$

$$f = 0,25 (-4,26)^{-2} \approx \mathbf{0,0138}$$

Del cálculo realizado se obtuvo un factor de fricción de Darcy aproximado de $f \approx 0,0138$. Este valor es característico de un flujo turbulento en una tubería prácticamente lisa, lo que indica que la rugosidad interna de la conducción tiene poca influencia en la resistencia al paso del aire. En consecuencia, las pérdidas de presión por fricción en los tramos rectos de la tubería son relativamente bajas, por lo que, si se presentan caídas de presión importantes en la red de aire comprimido, estas se deben principalmente a la velocidad del flujo o a pérdidas locales producidas por accesorios como codos, válvulas, filtros y el secador, más que al material o estado superficial de la tubería.

3.6.5 Pérdida de carga

$$HL = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

$$HL = 0.0138 \times \frac{50}{0.038} \times \frac{(21.67)^2}{2(9.81)}$$

$$\frac{(21.67)^2}{19.62} = \frac{469.5}{19.62} = 23.94$$

$$HL = 0.0138 (1315.8)(23.9) = 434 \text{ m}$$

$$\Delta P = \frac{H_f}{10^5} = \mathbf{0.47 \text{ bar}}$$

Este resultado muestra que, a lo largo de la conducción, se produce una caída de presión apreciable dentro de la red de aire comprimido. Una pérdida cercana a 0,5 bar no puede considerarse menor, ya que en la mayoría de los sistemas neumáticos las presiones de trabajo habituales se encuentran entre 6 y 8 bar. En consecuencia, esta caída representa aproximadamente entre un 6% y un 8% de la presión disponible, atribuida únicamente al transporte del aire por la tubería.

3.7 Calculo del tanque

$$V = \frac{t \times Q}{7}$$

$$Q = 2500 \frac{L}{min} = 2.5 \frac{M^3}{min}$$

$$V = \frac{0.33 \times 2.5}{7} = 0.118 m^3$$

$$0.118 \times 4 = 0.47 m^3 = \mathbf{470 L}$$

Se considerará la incorporación de un tanque acumulador de 600 litros, con el objetivo de aumentar la capacidad de almacenamiento de aire comprimido y reducir la frecuencia de arranques del compresor. De este modo, se disminuye el esfuerzo operativo asociado a encendidos repetitivos y se contribuye a prolongar la vida útil del equipo.

3.8 Caudal equivalente del secador

$$Fp = \frac{7}{P_{entrada}}$$

$$Fp = \frac{7}{10} = 0.70$$

$$Q_{eq \ secado} = Q_{compre} \times Ft \times Fp$$

$$Q_{eq \ secado} = 2.5 \times 1.13 \times 0.70$$

$$Q_{eq \ secado} = \mathbf{1.975 m^3/min}$$

Fp: Corrección por presión

Ft: Corrección por temperatura

Este cálculo permite determinar el caudal real de referencia que el secador debe ser capaz de procesar bajo las condiciones de operación del sistema. En este sentido, no es suficiente considerar únicamente el caudal nominal del compresor, ya que dicho valor debe corregirse en función de la temperatura del aire a la salida del compresor y de la presión de trabajo. De esta manera, se establece que el secador a seleccionar debe contar con una capacidad igual

o superior a 1,975 m³/min, con el fin de asegurar un secado eficiente del aire comprimido y minimizar la presencia de humedad en la red.

3.9 Golpe de ariete

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta V$$

$$\Delta P = 1.2 \times 330 \times 22 = 8712$$

$$P_a = 0.087 \text{ bar}$$

ρ = densidad del aire = 1.2 kg/m³

a = velocidad de la onda $\approx$ 330 m/s (aire)

ΔV = variación brusca de velocidad (m/s)

El golpe de ariete en aire es muy bajo (0.087 bar) comparado con los 7–8 bar de trabajo, por lo que no requiere mitigación especial.

3.10 Equipos propuestos para el recambio

El secador seleccionado cuenta con una capacidad nominal del orden de 2,4 a 2,8 m³/min, la cual es superior al caudal equivalente obtenido en el cálculo. Esto significa que el equipo podrá operar con holgura, sin trabajar de forma exigida, manteniendo un margen cercano al 40%. Este margen es positivo, ya que permite un funcionamiento más estable del secador, ayuda a mantener condiciones de secado constantes (punto de rocío adecuado) y disminuye la probabilidad de que el sistema se sature en períodos de mayor demanda o temperaturas elevadas.

En consecuencia, el dimensionamiento realizado considerando la presión y temperatura reales de operación respalda que el secador será capaz de remover la humedad del aire comprimido de manera efectiva. Con ello se reduce la formación de condensado dentro de la red, lo que contribuye a prevenir la corrosión en tuberías y componentes neumáticos, además de

disminuir fallas y problemas de funcionamiento en elementos como válvulas, cilindros y herramientas. En términos generales, la selección del secador mejora la confiabilidad del sistema, reduce necesidades de mantenimiento y favorece una mayor vida útil de la instalación.



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Modelo	LG-20
Potencia Motor	20HP- 15Kw 380V (50Hz)
Presión de Trabajo	10bar - 145Psi
CFM	75
Caudal (L/min)	2100
Conexión Descarga	3/4"
Peso (Kg)	280
Nivel dB	66±2
Dimensiones (mm)	1060x748x1005
Acumulador	N/A

CARACTERÍSTICAS:

- Accionamiento directo
- Bajo nivel de ruido
- Bajo costo de Mantenimiento
- Bajo consumo eléctrico
- Alta eficiencia de trabajo
- Panel de Control Digital



HIDROCOMP SPA - Jaime Repullo 2295, Talcahuano
Teléfonos: 991201469 - 923895597



Ilustración 3-28: Compresor de tornillo nuevo

Fuente: www.hidrocomp.cl

Se propone un tanque acumulador de aire de 600 litros. Aunque el sistema podría operar con un tanque de menor capacidad, este dimensionamiento se definió considerando principalmente la vida útil del compresor.

La elección de un volumen mayor permite almacenar una mayor cantidad de aire comprimido, reduciendo la frecuencia de arranques y paradas del equipo. De esta manera, se busca que el sistema satisfaga la demanda de aire del taller y, al mismo tiempo, contribuya a prolongar la vida útil del compresor.



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Modelo	KROMAR 600
Presión de Trabajo	13bar ~ 188,5Psi
Litros	600
Conexión Descarga	1 ½"
Peso Kg	189
Dimensiones (cm)	205x65

CARACTERÍSTICAS:

- Acumulador de aire
- Posesión vertical
- Diseño para Gravedad de Agua
- Fácil de instalar
- Certificado CE
- Incluye Kit Básico de Instalación
- Válvula de Seguridad
- Válvula de Drenaje Manual
- Indicador de Presión



HIDROCOMP SPA - Jaime Repullo 2295, Talcahuano
Teléfonos: 992014469 - 923895597

Ilustración 3-29: Tanque acumulador de aire

Fuente: www.hidrocomp.cl

El secador de aire seleccionado corresponde al equipo determinado a partir del cálculo de dimensionamiento realizado. Dicho cálculo permite asegurar que el caudal de aire comprimido que circule por el sistema será tratado adecuadamente, logrando una reducción significativa de la humedad presente en la red. De esta manera, se minimiza la presencia de condensado y se contribuye a prevenir procesos de corrosión en la instalación neumática.



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Modelo	SHB-20G
Potencia	220V (50Hz)
Presión de Trabajo	10bar ~ 145Psi
Lts/min	2,6m³/min
Conexión Descarga	1"
Peso (Kg)	55
Dimensiones (mm)	730x450x840
Temperatura de Entrada	≤80°C
Punto de Rocío	2~10°C

CARACTERÍSTICAS:

- Secador de aire electrónico
- Bajo nivel de ruido
- Vida útil de tus herramientas
- Disminuye el daño
- Alta eficiencia de trabajo
- Fácil de utilizar



HIDROCOMP SPA - Jaime Repullo 2295, Talcahuano
Teléfonos: 992014469 - 923895597

Ilustración 3-30: Secador de aire

Fuente: www.hidrocomp.cl

CAPÍTULO V:
EVALUACIÓN ECONÓMICA

Como propósito de todo este estudio, se tiene buscar la mejor opción pensando en que el taller de mantenimiento tenga la mejor calidad de aire y que sea constante, no haya paradas inesperadas. Por lo cual se presentarán distintas opciones y se determinara cual es la mejor decisión para tomar.

Primero se evaluará la opción de realizar un mantenimiento overhaul al compresor de pistón que se encuentra trabajando actualmente, este mantenimiento se escogió para dejar al equipo trabajando en las mejores condiciones lo mas similar a nuevo.

Y se presentara la evaluación económica de proponer un cambio de equipo por uno de tornillo, con su conjunto tanque acumulador de aire y secador de aire. Se analizarán las distintas opciones y determinar cuál es la mejor.

Datos

Horas de operación

8 horas/día x 365 días = 2920 horas/año

Considerando una tasa eléctrica de 250 CLP/kwh

4.1 Evaluación económica compresor pistón

4.1.1 Presupuesto de mantenimiento overhaul

Componente	Costo
Motor eléctrico 15 HP	\$1.200.000
Camisas nuevas (recamisado)	\$500.000
Pistones nuevos	\$420.000
Anillos	\$180.000
Válvulas de placa	\$300.000
Rodamientos	\$200.000
Empaquetaduras y retenes	\$150.000
Mano de obra	\$700.000

Tabla 7: Presupuesto de mantenimiento overhaul

Fuente: Elaboración propia

Costo total overhaul \$3.650.000

4.1.2 Costo de mantenimiento anual

Procedimiento	Costo
Ajustes y calibración	\$300.000
Aceite y filtros	\$250.000
Reemplazo válvulas periódico	\$300.000
Detenciones operacionales	\$250.000

Tabla 8: Costo de mantenimiento anual

Fuente: Elaboración propia

Total = 1.100.000 CLP/año

4.1.3 Consumo energético anual (KWh/año) y costo anual (CLP/año)

Potencia aproximada: 15 HP = 11.2 kW

$Ea = 11.2 \times 2920 = 32.704 \text{ kWh/año}$

Se considerará una tarifa de (250 CLP/kwh)

$Cea = 32.704 \times 250 = \text{\$8.176.000 CLP/año}$

4.1.4 Costo Mantenimiento Anual

Aunque el equipo se encuentre mecánicamente renovado necesitará ajustes y remplazos frecuentes, ya sea de válvulas, lubricación, vibración, transmisión, etc.).

Se considerará el siguiente presupuesto para todos esos trabajos

$Cma = \text{\$1.100.000 CLP/AÑO}$

4.2 Sistema nuevo de compresor de tornillo, tanque acumulador y secador de aire

El compresor nuevo que se presenta es un compresor de tornillo de 20 HP que entrega 2100 L/MIN. Según todos los cálculos realizados en el diseño solución, cumple con las necesidades del taller y con la opción de agregar mas herramientas o equipos a la red de aire. También se

considerará un tanque que acumule el aire que procede el compresor y un secador de aire, que tiene como objetivo entregar un aire seco a la red.

4.2.1 Cotización de compra, instalación y traslado de los equipos

Equipo/Servicio	Costo
Compresor tornillo 20 HP	\$4.000.000
Tanque acumulador 600 L	\$1.000.000
Secador de aire SHB 20	\$1.150.000
Instalación y puesta en marcha	\$250.000
Traslado	\$150.000

Tabla 9: Cotización compra, instalación y traslado de equipos

Fuente: Elaboración propia

Costo total = \$6.550.000

4.2.2 Consumo energético anual (KWh/año) y costo anual (CLP/año)

Potencia aproximada: 20 HP = 15 kW

$Ea = 15 \times 2920 = 43.800 \text{ kWh/año}$

Se considerará una tarifa de (250 CLP/kwh)

$Cea = 43.800 \times 250 = \text{\$ 10.950.000 CLP/año}$

4.2.3 Costo mantenimiento anual

Al haber adquirido un equipo nuevo en perfectas condiciones, realizando un mantenimiento que corresponde y básico, el equipo no debería presentar ninguna falla importante dentro de las 20.000 horas.

Se considerará el siguiente presupuesto anual para todos los trabajos

Cma = \$400.000 CLP/AÑO

4.3 Comparativo económico compresor existente con nuevo compresor propuesto

4.3.1 Inversión Inicial

Alternativa	Inversión
Reparar compresor pistón	\$3.650.000
Cambiar a compresor tornillo	\$6.550.000

Tabla 10: Comparativo de inversión inicial

Fuente: Elaboración propia

$I = 6.550.000 - 3.650.000 = \text{\$2.900.000}$

La inversión inicial es de \$2.900.000 si elegimos no reparar el compresor de pistón, si bien es un monto de dinero que se podría ver como un gasto innecesario, pero con este cambio se podría obtener beneficios como menos fallas, menos mantención y mejor funcionamiento del sistema.

4.3.2 Consumo eléctrico anual (kWh/año)

$E \text{ pistón} = 11.2 \times 2929 = 32.704 \text{ kWh/año}$

$E \text{ tornillo} = 15 \times 2929 = 43.800 \text{ kWh/año}$

$\text{Diferencia } E = 43.800 \text{ kWh/año} - 32.704 \text{ kWh/año}$

$\text{Diferencia } E = \text{11.096 kWh/año}$

4.3.3 Costo eléctrico anual

$\text{Tarifa utilizada} = 250 \text{ CLP}$

$C \text{ pistón} = 32.704 \times 250 = \text{\$8.176.000 CLP/AÑO}$

$C \text{ tornillo} = 43.800 \times 250 = \text{\$10.950.000 CLP/AÑO}$

Sobrecosto energético de tornillo

$\text{COSTO energía} = 10.950.000 - 8.176.000$

$\text{COSTO energía} = \text{2.774.000 CLP/AÑO}$

El compresor de tornillo gastara el monto de \$2.774.000 CLP por cada año adicionales lo que gastaría el compresor de tornillo trabajando lo mismo en un año.

4.3.4 Costos mantenimiento anual

Equipo	Mantención anual
Compresor pistón	\$1.100.000
Compresor tornillo	\$400.000

Tabla 11: Comparativo costos mantenimiento anual

Fuente: Elaboración propia

Ahorro de mantenimiento

Ahorro mant = 1.100.000 – 400.000

Ahorro mant = \$700.000 CLP/AÑO

4.3.5 VAN

$(P / A, 12\%, 10) \approx 5,65$

$VAN = - 2.900.000 + (-2.074.000 \times 5,65)$

$VAN = -2.900.000 - 11.718.100$

$VAN \approx - 14.618.100 \text{ CLP}$

El hecho de que el VAN resulte negativo no implica necesariamente que el proyecto deba descartarse; más bien indica que los beneficios más relevantes del reemplazo no se manifiestan como ahorros financieros directos, sino como mejoras en la operación. En este sentido, la conveniencia de la alternativa no se define únicamente por el costo de adquisición del equipo, sino por el impacto económico que generan las interrupciones del trabajo cuando el sistema de aire comprimido presenta fallas o detenciones.

CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se compararon dos caminos para asegurar el suministro de aire comprimido del taller: reparar el compresor de pistón actual o reemplazarlo por un sistema nuevo con compresor de tornillo, considerando que el equipo trabaja 2.920 horas al año y usando una tarifa eléctrica de \$250/kWh. A partir de la inversión inicial se observó que cambiar al sistema nuevo implica un desembolso adicional de \$2.900.000 frente a la reparación, por lo que la decisión no depende solo del precio total del equipo, sino de cuánto valor agrega realmente en la operación diaria.

Cuando el análisis se limita a los costos directos (principalmente electricidad y mantenimiento), el reemplazo no se ve atractivo, ya que el compresor de tornillo, por su mayor potencia, eleva el gasto anual de energía y ese aumento no alcanza a compensarse únicamente con el menor costo de mantenimiento. En otras palabras, bajo un enfoque financiero tradicional, el proyecto no se justificaría por “ahorro” inmediato, porque el cambio no reduce el costo operativo total si se mira únicamente la cuenta eléctrica y la mantención programada.

Sin embargo, el sistema de aire comprimido en un taller no funciona como un gasto secundario: en la práctica es un insumo crítico para que las actividades se puedan realizar con normalidad. Por eso, al evaluar la situación con un enfoque más cercano a la realidad operativa, aparece un elemento que pesa mucho: las detenciones y pérdidas de productividad cuando el compresor falla o trabaja de forma inestable. En este contexto, el compresor de pistón, usado de manera continua durante todo el año, tiende a presentar mayor riesgo de fallas y variaciones en el suministro, lo que se traduce en tiempos muertos y atrasos que normalmente no quedan reflejados en el cálculo financiero básico.

La alternativa del compresor de tornillo, además, incorpora componentes como tanque y secador, lo que ayuda a mejorar la estabilidad de presión y la calidad del aire. Ese tipo de mejoras no siempre se aprecia en el VAN cuando se consideran solo costos directos, pero sí puede marcar una diferencia importante en el día a día: menos interrupciones, menor probabilidad de parar trabajos por falta de aire y mejores condiciones para herramientas y procesos que dependen del sistema. En este sentido, el cambio comienza a tener sentido económico si se entiende como una medida para reducir riesgos y asegurar continuidad, más que como una estrategia de reducción de consumo eléctrico.

En conclusión, los resultados muestran que la decisión no debe basarse únicamente en comparar costos directos, porque el principal aporte del reemplazo está en el desempeño operativo. Un VAN negativo, por sí solo, no significa que la alternativa sea “mala”, sino que su valor no está en un ahorro financiero inmediato, sino en evitar pérdidas asociadas a paradas y problemas de suministro. Por lo tanto, la recomendación final depende de cuánto impactan esas detenciones en el taller: si las interrupciones tienen un costo relevante en productividad, plazos o servicio, el

reemplazo por un compresor de tornillo se vuelve una alternativa razonable y defendible para una decisión real de operación.

Recomendaciones

Según los resultados obtenidos, se sugiere que la decisión de sustituir el compresor de pistón por uno de tornillo no se tome considerando únicamente los costos operacionales directos. El análisis financiero convencional muestra que la inversión no se compensa a través de un menor consumo eléctrico ni por una disminución suficiente en los gastos de mantenimiento. No obstante, dado que el aire comprimido es un recurso clave para el funcionamiento del taller, la evaluación debe incorporar también el impacto que tiene la continuidad del servicio sobre la operación diaria.

Bajo esta perspectiva, se recomienda avanzar con el reemplazo si el equipo actual presenta fallas repetitivas, paradas frecuentes o inestabilidad en la presión que afecte el rendimiento del trabajo, ya que las pérdidas asociadas a estas interrupciones pueden superar el mayor gasto energético del sistema nuevo. En ese escenario, el compresor de tornillo aporta principalmente al mejorar la estabilidad del suministro, reducir tiempos improductivos y aumentar la confiabilidad del proceso, elementos que no siempre quedan reflejados de manera completa en una evaluación financiera basada solo en costos directos.

Por el contrario, si el compresor de pistón se mantiene operando de forma adecuada, con pocas detenciones y sin generar impactos relevantes en la productividad del taller, resulta razonable postergar el cambio. En ese caso, la recomendación es fortalecer un programa de mantenimiento preventivo y realizar seguimiento a su desempeño, registrando de manera sistemática las horas de detención y las condiciones de operación, con el fin de contar con evidencia objetiva para una decisión posterior.

Finalmente, se recomienda implementar un sistema de registro y control de fallas, tiempos de paralización y eventuales pérdidas de productividad relacionadas con el aire comprimido. Contar con esta información permitirá incorporar costos reales en evaluaciones futuras y, en consecuencia, estimar con mayor precisión la conveniencia económica del reemplazo.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

Atlas Copco Airpower Nv. (2014). *Atlas Copco Manual del aire comprimido 8 edición*. Bélgica : Atlas Copco.

Atlas Copco. (s.f.). *atlascope*. Obtenido de www.atlascopco.com:
<https://www.atlascopco.com/es-cl/compressors/wiki/compressed-air-articles/displacement-and-dynamic-compression>

Biblioteca del congreso nacional de Chile/BCN. (29 de abril de 2000). *Biblioteca del congreso nacional de Chile/BCN*. Obtenido de www.bcn.cl: <https://bcn.cl/26jqh>

Chicago Pneumatic. (s.f.). *Chicago Pneumatic*. Obtenido de compressors.cp.com:
<https://compressors.cp.com/es-latinoamerica/products/compresor-de-aire/compresor-de-tornillo/aprenda-mas-sobre-compresores-de-tornillo/partes-de-un-compresor-de-tornillo>

Chicago Pneumatic. (s.f.). *Guía del aire comprimido*.

García, E. (16 de junio de 2023). *todo para la industria*. Obtenido de www.todoparalaindustria.com:
<https://todoparalaindustria.com/blogs/blog/compresor-de-aire-usos-funcionamiento-y-ventajas?srsId=AfmBOoiu2aamRxFqUd8pxrKAGo9wgx-7bYFSFUqkcpwRI0qNe9fZPbE>

gestionsigweb. (12 de septiembre de 2019). *sigweb*. Obtenido de sigweb:
<https://www.sigweb.cl/2019/09/12/seguridad-en-maquinas-mantenimiento-correctivo-preventivo-y-predictivo-2/>

Ghiglia, A. (22 de febrero de 2021). *KAESER TALK*. Obtenido de KAESER talk:
<https://kaesertalk.com.ar/2021/02/22/eficiencia-isentropica-y-potencia-especifica-de-los-compresores/>

González, I. F. (s.f.). *Kaeser compresores*. Obtenido de airecomprimidokaeser.com:
<https://airecomprimidokaeser.com/index.php/2016/09/10/normas-de-rendimiento-de-compresor-de-desplazamiento-de-aire/>

Kaeser compresores. (s.f.). *Kaeser compresores*. Obtenido de airecomprimidokaeser.com:
<https://airecomprimidokaeser.com/index.php/2017/06/08/como-funciona-un-compresor-de-tornillo/>

tec tecnología en compresión de occidente. (19 de abril de 2024). *tec tec tecnología en compresión de occidente*. Obtenido de www.tecencompresion.com:
<https://tecncompresion.com/principales-fallas-en-los-compresores-de-tornillo-rotativo/>

Toro, R. (31 de julio de 2023). *Fracttal* . Obtenido de www.fracttal.com:
<https://www.fracttal.com/es/mantenipedia/que-es-la-confiabilidad-en-el-mantenimiento-y-como-calcularla>