

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA
PLANTA INDUSTRIAL DE CHOVA DEL ECUADOR S.A.”

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

PAMELA VERÓNICA UBIDIA VÁSQUEZ

DIRECTOR: ING. JAVIER POZO

CODIRECTOR: ING. OSWALDO MARIÑO

Sangolquí, 12 de marzo de 2013

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO

Nosotros: ING. JAVIER POZO e ING. OSWALDO MARIÑO.

CERTIFICAN

Que, el Proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE CHOVA DEL ECUADOR S.A.”**, realizado por la señorita PAMELA VERÓNICA UBIDIA VÁSQUEZ, ha sido revisado prolijamente y cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Sr. Ing. Ángelo Villavicencio, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Mecánica. El trabajo en mención consta de tres empastados y tres discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil de Acrobat (pdf).

Sangolquí, 12 de marzo de 2013.

ING. JAVIER POZO.

DIRECTOR

ING. OSWALDO MARIÑO.

CODIRECTOR

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA
PLANTA INDUSTRIAL DE CHOVA DEL ECUADOR S.A.”

ELABORADO POR:

Pamela Verónica Ubidia Vásquez

CARRERA DE INGENIERIA MECÁNICA

ING. ÁNGELO VILLAVICENCIO

DIRECTOR DE CARRERA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

A U T O R I Z A C I Ó N

Yo, PAMELA VERÓNICA UBIDIA VÁSQUEZ

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE CHOVA DEL ECUADOR S.A., cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 12 de marzo del 2013

PAMELA VERÓNICA UBIDIA VÁSQUEZ

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a las personas que han influenciado mi vida hacia la dirección correcta:

A mis padres, que aparte de todo lo que implica ser padres, me dieron un excelente ejemplo de lo que es ser una buena persona y profesional.

A mis compañeros y amigos de universidad, ya que juntos, apoyándonos el uno al otro, logramos culminar la carrera con la satisfacción de haber aprendido mucho más de lo que indica el pensum.

A David, por ser una de las principales razones para esforzarme a ser mejor cada día.

A mi prima Sofía y Mamamama, que sé que miran orgullosas desde arriba.

Pamela Verónica Ubidia Vásquez

AGRADECIMIENTO

Gracias a todo el personal de Chova del Ecuador S.A., especialmente a Javier Pozo, por la oportunidad otorgada, el apoyo brindado, y por permitirme desarrollarme profesionalmente dentro de la empresa con los brazos abiertos, absolutamente todos son personas muy valiosas y es un honor gustoso ser parte del grupo SRS.

Pamela Verónica Ubidia Vásquez

CONTENIDO

CAPÍTULO 1.	
GENERALIDADES	1
1.1. Historia de Chova del Ecuador S.A.....	1
1.2. Marco Institucional	2
1.3. Antecedentes	4
1.4. Definición del problema.....	5
1.5. Objetivos	5
1.6. Alcance del proyecto	6
1.7. Justificación del proyecto	6
CAPÍTULO 2.	
MARCO TEÓRICO	8
2.1. Generalidades del aire comprimido.....	8
2.2. Fundamentos de Neumática	10
2.3. Redes de aire comprimido	16
CAPÍTULO 3.	
DISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	34
3.1. Requerimiento de aire	34
3.2. Selección del equipo de aire comprimido	50
3.3. Dimensionamiento de la red de tubería.....	61
CAPÍTULO 4.	
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN	72
4.1. Planos del sistema	72
4.2. Lista de materiales	72
4.3. Ensamblaje	72
4.4. Verificación de funcionamiento	73
4.5. Determinación de la eficiencia del sistema	73

4.6. Procedimiento de operación.....	76
4.7. Procedimiento de mantenimiento.....	77
4.8. Evaluación de resultados	77
CAPÍTULO 5.	
ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO	79
5.1. Estudio financiero.....	79
5.2. Estudio económico	80
CAPÍTULO 6.	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
6.1. Conclusiones.....	84
6.2. Recomendaciones.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Equivalencia de unidades de presión.....	11
Tabla 2.2. Equivalencia de unidades de volumen.....	12
Tabla 2.3. Presiones nominales de materiales para tubos.....	19
Tabla 2.4. Tipos de compresores neumáticos más utilizados.....	24
Tabla 2.5. Cantidad de condensado del agua en el aire en g/m ³	30
Tabla 3.1. Condiciones atmosféricas.....	35
Tabla 3.2. Presión de trabajo de la maquinaria actual Chova del Ecuador.....	42
Tabla 3.3. Consumos maquinaria Chova del Ecuador.....	45
Tabla 3.4. Consumo habitual Chova del Ecuador.....	48
Tabla 3.5. . Calidad de aire comprimido ISO 8573-1 2001.....	50
Tabla 3.6. Matriz de decisión de tipo de compresor.....	52
Tabla 3.7. Requerimientos del cliente.....	52
Tabla 3.8. Tabla comparativa de caract. técnicas compresores de tornillo.....	52
Tabla 3.9. Régimen de trabajo y costo de la electricidad.....	54
Tabla 3.10. Resultados obtenidos del análisis económico.....	54
Tabla 3.11. Matriz de decisión para la selección del compresor.....	58
Tabla 3.12. Caída de presión admisible.....	62
Tabla 3.13. Grupos de trampas de vapor y principios de funcionamiento.....	64
Tabla 3.14. Longitudes de tubería.....	67
Tabla 3.15. Longitud equivalente de accesorios ramificación Nave 1.....	67
Tabla 3.16. Caída de presión por diferentes diámetros.....	68
Tabla 3.17. Máxima cantidad de aire recomendada en líneas de servicio.....	70
Tabla 4.1. Comparación de eficiencia entre sistemas antiguo y nuevo.....	76
Tabla 5.1. Costos directos del proyecto.....	80
Tabla 5.2. Costos indirectos del proyecto.....	80
Tabla 5.3. Análisis económico del proyecto.....	82
Tabla 5.4. Análisis beneficio.costo.....	83

ÍNDICE DE FÓRMULAS

2.1 Definición de Presión.....	11
2.2 Definición de caudal.....	13
2.3 Ley de Boyle-Mariotte.....	14
2.4 Ley de Charles y Gay-Lussac.....	14
2.5 Ley de Avogadro.....	14
2.6 Número de moles.....	15
2.7 Ley combinada de los gases.....	15
2.8 Constante Ru.....	15
2.9 Presión de vapor relativa.....	16
2.10 Cálculo del diámetro de tuberías.....	17
2.11 Volumen del tanque de almacenamiento.....	26
2.12 Volumen depósito consumo intermitente.....	27
2.13 Relación de compresión.....	31
3.1 Ley de los gases ideales-caudal.....	36
3.2 Corrección ambiental del caudal.....	36
3.3 Consumo de aire en actuador de pistón.....	43
3.4 Costo del capital invertido.....	55
3.5 Pago anual por depreciación.....	55
3.6 Consumo de potencia en carga parcial.....	57
3.7 Costo anual de la electricidad.....	57
3.8 Costo total anual.....	58
4.1. Rendimiento volumétrico.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Medidas de presión.....	12
Figura 2.2. Ejemplo de ramificación de la línea de servicio.....	19
Figura 2.3. Sistema abierto.....	20
Figura 2.4. Sistema cerrado y con interconexiones.....	20
Figura 2.5. Clasificación de compresores según tipo de generación.....	22
Figura 2.6. Tipos de compresores neumáticos.....	23
Figura 2.7. Elementos constitutivos de una unidad FRL.....	28
Figura 2.8. Clasificación de secadores según método funcional.....	32
Figura 3.1. Factor de simultaneidad.....	46
Figura 3.2. Pérdida de potencia por fugas.....	47
Figura 3.3. Rango de utilización de varios tipos de compresores.....	51
Figura 3.4. Consumo específico a cargas parciales.....	56
Figura 3.5. Diagrama de cálculo del depósito de aire.....	60
Figura 3.6. Gráfico de caída de presión admisible.....	62
Figura 3.7. Dimensionamiento FRL.....	65
Figura 3.8. Nomograma para diámetro de tuberías principales.....	69
Figura 3.9. Nomograma para diámetro de tuberías secundarias.....	71
Figura 4.1. Pérdidas energéticas de compresores de tornillo.....	74
Figura 4.2. Rendimiento volumétrico según Cerepnalkovsky-Conan.....	75

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A

LAYOUT DE LA PLANTA CHOVA DEL ECUADOR S.A.	89
---	----

ANEXO B

TABLAS Y NOMOGRAMAS.....	91
--------------------------	----

B1. Longitudes equivalentes de accesorios

B2. Nomograma para diámetro de tuberías

B3. Programa de cálculo y selección de diámetro nominal de tubería

ANEXO C

LISTA DE MATERIALES	95
---------------------------	----

ANEXO D

PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN (SOP)	98
--	----

ANEXO E

PROCEDIMIENTO DE MANTENIMIENTO	104
--------------------------------------	-----

E1. Hoja de verificación de marcha

E2. Procedimiento de mantenimiento

ANEXO F

PLANOS DE DISPOSICIÓN DE LA TUBERÍA	113
---	-----

ANEXO G

MISCELÁNEOS	116
-------------------	-----

G1. Cotización Atlas Copco

G2. Cotización Ingersoll Rand

G3. Publicación en revista Atlas Copco

G4. Cotización del filtro coalescente

G5. Sugerencia para la mejora continua

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aire	Gas insípido, incoloro e inodoro compuesto en su mayor parte de nitrógeno (78.3%) y de oxígeno (20.99%). Contiene en pequeñas cantidades, bióxido de carbono (0.003%), argón (0.94%), hidrógeno (0.01%), neón, helio, kriptón y xenón.
Caudal	Es la cantidad de fluido que pasa por una sección en unidad de tiempo. Este puede ser de tipo volumétrico o de tipo másico, donde la relación entre estos dos tipos está dada por la densidad.
Densidad	Es una magnitud escalar dada por la relación entre la masa y el volumen que ocupa un cuerpo o sustancia.
Presión	Es una magnitud física escalar que mide la fuerza aplicada perpendicularmente por unidad de superficie.
Presión atmosférica	Es la presión que ejerce la capa de aire atmosférico sobre la superficie terrestre. La presión atmosférica disminuye a medida que la altura aumenta, por lo que se ha establecido como estándar la presión atmosférica a nivel del mar, cuyo valor es 14.7 lb/plg^2 o 1 atm.
Presión manométrica	Es la presión que se registra dentro de un sistema con presión superior o inferior a la atmosférica.
Presión absoluta	Es la suma de la presión atmosférica y la manométrica.
Temperatura	Es la magnitud escalar que determina la energía interna de un sistema termodinámico, relacionada

directamente con la energía cinética molecular promedio de una sustancia.

Volumen

Es la cantidad de espacio en tres dimensiones que ocupa un cuerpo o sustancia.

RESUMEN

Este proyecto consiste en el “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE CHOVA DEL ECUADOR S.A.”.

La empresa Chova del Ecuador S.A., se encuentra en continuo crecimiento e innovación. El antiguo sistema de aire comprimido había cumplido su vida útil y no abastecía con los nuevos requerimientos neumáticos y de automatización para la nueva línea productiva en desarrollo, por lo que este proyecto logró justificarse.

Para lograr un dimensionamiento correcto, se volvió a analizar los consumos de cada una de las máquinas que utilizan aire comprimido para operar, dado que el ritmo de trabajo ha crecido a través de los años. Una vez estudiados los requerimientos actuales, se procedió a diseñar el nuevo sistema, y luego verificar su funcionamiento.

Una vez implementado el proyecto, se levantó un procedimiento de operación y de mantenimiento para asegurar la continuidad del funcionamiento del mismo.

Este proyecto se ejecutó con los mejores intereses de la empresa como guía, cumpliendo con las políticas y objetivos de la calidad que se manejan en Chova del Ecuador S.A. El nuevo sistema de aire comprimido reemplaza el uso de dos compresores alternativos por uno de tornillo, por lo que optimizará el consumo de energía, disminuirá el impacto ambiental y dará lugar a la mejora continua de la producción, permitiendo así el crecimiento futuro de la empresa. Los procedimientos levantados formarán parte del Manual de la Calidad, manteniendo así vigente el Sistema de Calidad que utiliza Chova del Ecuador S.A., como herramienta para estandarizar y mejorar sus procesos, y de esta manera ofrecer al mercado ecuatoriano e internacional los mejores productos de impermeabilización.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Historia de Chova del Ecuador S.A.

Hace 25 años, nació Chova del Ecuador S.A., empezó a producir y comercializar productos asfálticos para la impermeabilización, se aprovechó del arranque de la producción de derivados del petróleo en la Refinería de Esmeraldas y del crecimiento del sector de la construcción, que empezaba a exigir soluciones innovadoras para satisfacer los nuevos modelos urbanísticos.

Durante la década de los 60, los países desarrollados utilizaban polímeros en el asfalto como material para la construcción de pavimentos y soluciones de impermeabilización. Esta tecnología llegó al país a través de Chova del Ecuador S.A. en la década de los 80. La empresa se posicionó como pionera en la región andina, ya que empezó a ofrecer productos de mayor durabilidad que aquellos basados en asfaltos oxidados que se comercializaban en ese tiempo por Colombia, Venezuela y Argentina.

La filosofía de mejora continua e innovación, ha llevado a la empresa a ser competitiva con otras internacionales, bajo estrictas normas de calidad, lo cual ha generado alta demanda en la región Pacífico Sur con innovaciones tales como emulsiones asfálticas para el mercado vial y láminas autoadhesivas. Chova del Ecuador S.A. fue además el primero en elaborar un manual de impermeabilización para garantizar auténticas soluciones para sus clientes.

Desde hace aproximadamente diez años el mercado internacional empezó a introducir nuevos productos basados en poliuretanos, acrílicos, plásticos, etc., en lugar de asfalto, con lo cual Chova del Ecuador S.A. creó una nueva marca llamada IMPTEK, incorporó estas tendencias a su línea de producción e incluso lanzó una línea de cubiertas ecológicas.

En la actualidad, Chova del Ecuador S.A. continúa ofreciendo productos de excelente calidad tanto para el mercado vial como para edificaciones, lo cual lo ha llevado a convertirse en un sinónimo de impermeabilización en el país.

1.2. Marco Institucional

1.2.1. Misión

Chova del Ecuador S.A. es una empresa que busca todos los días cumplir su misión propuesta, que se formula de la siguiente manera:

“Fabricar productos innovadores que sirvan para la protección del hogar y aporten valor a la inversión”

De esta manera, Chova del Ecuador S.A. busca ser un beneficio a la comunidad, enfocando sus esfuerzos al mercado, fomentando la innovación y el logro de excelencia.

El objetivo de su misión es satisfacer a sus clientes con la filosofía ganar-ganar, alcanzar crecimiento rentable y sostenido al mismo tiempo que contribuye al progreso de sus colaboradores y el desarrollo del país.

1.2.2. Visión

La visión de Chova del Ecuador S.A. es:

“Ser uno de los tres fabricantes de mayor participación en el mercado regional de la construcción”

1.2.3. Valores

Los valores de Chova del Ecuador S.A. determinan la cultura empresarial, concentrándose en los siguientes principios, los cuales nacen de la norma ISO 9001:

1. Enfoque al cliente
2. Liderazgo
3. Participación del personal
4. Enfoque basado en procesos
5. Enfoque de sistema para la gestión
6. Mejora continua
7. Enfoque basado en hechos para la toma de decisiones
8. Relaciones mutuamente beneficiosas con el proveedor
9. Seguridad personal y física

1.2.4. Política de Calidad

La Política de Calidad de Chova del Ecuador S.A. es cumplir con las expectativas de sus clientes:

- a) Entregando productos fabricados bajo especificaciones, para atender al sector de la construcción, vial y automotriz.
- b) Comprometiéndose con el mejoramiento continuo y,
- c) Ejerciendo prácticas éticas de comercio.

Los Objetivos de la Calidad son:

- a) Mantener el liderazgo en la participación del mercado de impermeabilización en el Ecuador.
- b) Incrementar las ventas de exportación.
- c) Generar un ambiente de trabajo que fomente la creatividad, el trabajo en equipo, la toma de decisiones que implican riesgo y una atmósfera caracterizada por un ánimo pro-activo.
- d) Ser identificado como una empresa que innova y mejora continuamente sus procesos y productos.
- e) Lograr una disminución constante de los reclamos de los clientes.
- f) Lograr un crecimiento sostenido de las ventas y una rentabilidad que satisfaga las expectativas de los accionistas
- g) Mantener vigente un Sistema de Calidad acorde a normativas internacionales.

1.3. Antecedentes

Para llegar a ofrecer productos de calidad es necesario estructurar los procesos productivos de la manera más eficiente posible, logrando un sistema de calidad globalizada. Según el enfoque de W. E. Deming la metodología de mejora continua consiste planificar, ejecutar, evaluar y actuar. Aplicando este concepto a los procesos productivos de la empresa y sus elementos de apoyo, como lo es el sistema de distribución de aire comprimido, Chova del Ecuador S.A., identifica la necesidad de planificar y ejecutar una mejora a dicho sistema, de modo que se puedan satisfacer las demandas neumáticas de la maquinaria actual y futura de manera más eficiente.

En la planta de Cashapamba de Chova del Ecuador S.A. se concentra la maquinaria destinada a productos impermeabilizantes. Parte de esta maquinaria requiere aire comprimido para operar, el cual debe tener un nivel de calidad óptimo para su correcto funcionamiento. Aparte de la maquinaria existente se prevé un crecimiento para el desarrollo de nuevos procesos y representa un

incremento la demanda de aire comprimido. Actualmente se cuenta con un sistema de aire comprimido con equipos obsoletos y en mal estado, cuya distribución y dimensionamiento no satisfacen estos requerimientos de crecimiento de la empresa.

Con el afán de mejorar los elementos de apoyo del sistema de procesos de la planta, Chova del Ecuador S.A., tiene contemplado en sus objetivos y presupuesto implementar una red de aire comprimido que satisfaga las demandas mencionadas y que represente menores costos de mantenimiento y operación.

1.4. Definición del problema

El sistema de aire comprimido con el que cuenta actualmente la planta de Chova del Ecuador S.A. consta de dos compresores reciprocantes conectados en serie que presentan problemas frecuentes asociados a la culminación de su vida útil. La red de aire comprimido no se encuentra diseñada para un incremento en la demanda neumática y presenta deterioro por acumulación de condensado y otros problemas relacionados.

Mediante la realización de este proyecto se pretende tanto remplazar un sistema obsoleto por otro eficiente y apto para el uso destinado, como asegurar su funcionamiento a largo plazo con la implementación de procedimientos de operación y mantenimiento adecuados.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de aire comprimido para la planta de Chova del Ecuador S.A. para satisfacer los consumos actuales y futuros facilitando su operación, en base a los principios de la neumática y la instrumentación.

1.5.2. Objetivos específicos

- Estudiar la necesidad de aire comprimido de la maquinaria tomando en cuenta el crecimiento futuro de la planta.

- Evaluar y seleccionar el equipo de generación de aire comprimido.
- Analizar las distintas alternativas de disposición de redes neumáticas en base a la funcionalidad y costo del sistema.
- Dimensionar y diseñar el sistema de aire comprimido según el requerimiento habitual de aire comprimido de la planta.
- Construir en base al diseño escogido.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema de aire comprimido y determinar su eficiencia.
- Elaborar manuales de operación (SOP) y de mantenimiento.

1.6. Alcance del proyecto

El presente proyecto tiene como alcance el cálculo de consumos de aire en la maquinaria instalada, selección de un compresor según los requerimientos; diseño, construcción, verificación de funcionamiento y elaboración de procedimientos de operación y mantenimiento de la red de aire comprimido para abastecer a las máquinas de accionamiento neumático actuales, tomando en cuenta el crecimiento previsto de la planta de Chova del Ecuador S.A.

1.7. Justificación del proyecto

En Chova del Ecuador S.A. existen algunos procesos actuales que requieren de aire comprimido. Entre ellos están:

1. Expulsadora de rollos laminados
2. Cortadora de rollos de Alumband
3. Dos cortadoras de flejes metálicos

Existe la disponibilidad de un sistema actual de aire comprimido para abastecer estos consumos; no obstante, el equipamiento actual tiene alta frecuencia de falla y no es pensado con fines de crecimiento. Se desea incluir un proceso más a la línea de producción para la fabricación de cubiertas rígidas de

poliuretano, para las cuales se dispone la instalación de equipos adicionales, de muy alto consumo neumático:

4. Estación de inyección de Poliuretano

- a. Bomba de Isocianato
- b. Bomba de Polioliol
- c. Inyectora de Poliuretano

5. Prensa Neumática

Aparte de estos procesos, se debe tomar en cuenta el incremento de otros a implementar en el futuro. Para que se puedan satisfacer estos fines, Chova del Ecuador S.A., ve la necesidad de implantar una nueva red completa de aire comprimido que abastezca a los consumos habituales y futuros de sus instalaciones.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del aire comprimido

La palabra neumática se deriva del griego *phenumos*, que significa respiración o soplo. Estrictamente, la neumática se refiere al estudio del movimiento del aire, sin embargo desde el punto de vista tecnológico, se define a la neumática más específicamente como la tecnología que emplea aire comprimido como medio de transmisión de energía.

2.1.1. Historia

Según su actual definición, la neumática es una técnica moderna, pero según su concepción original es una forma de energía de las más antiguas conocidas por el hombre. En el nuevo testamento se habla de emplear el aire comprimido en la fundición metalúrgica. En el siglo III A.C. en Alejandría, fueron

construidas las primeras máquinas neumáticas con pistones de madera. Mecanismos accionados por aire caliente se encuentran registrados en manuscritos del siglo I, y así ha ido avanzando sucesivamente.

La aplicación de la neumática como se la conoce hoy en día se introdujo a gran escala en la industria durante la Segunda Guerra Mundial, ya que se necesitaba emplear cada vez más equipo y maquinarias automáticas (generalmente con fines bélicos), ya que la mano de obra calificada era escasa. A partir de este repentino desarrollo nació el concepto de la automatización a nivel de todo tipo de industria.

La automatización puede ser considerada como el paso más importante del proceso de avance industrial del siglo XX, permitiendo reducir costos de mano de obra directos, uniformidad de la producción, control de la producción y una mejora de la calidad del producto terminado. El aire comprimido es una de las varias técnicas de automatismo, tal como son la mecánica, oleohidráulica, eléctrica, electrónica y robótica.

La tecnología de la neumática es incluida en un sinnúmero de aplicaciones, como por ejemplo:

- Manipulación en general
- Limpieza y proyección
- Movimiento lineal y rotativo
- Bombeo
- Agitación
- Transporte
- Control
- Entre otras

2.1.2. Ventajas y desventajas

Con el uso de sistemas neumáticos, la industria se beneficia con un medio barato de automatización, si éstos son bien diseñados. En la actualidad, el uso del aire comprimido abarca todo tipo de industria, por las siguientes ventajas y características, entre otras:

- El aire es abundante y compresible
- Se transporta y almacena fácilmente
- Carece de problemas de combustión con la temperatura
- No existe riesgo de descarga eléctrica ni explosión
- Gran control sobre presión, velocidad y fuerza, incluso a distancia
- Limpieza de instalaciones
- Fácil mantenimiento
- Los elementos neumáticos pueden alcanzar altas velocidades de trabajo

Entre las desventajas se encuentra la imposibilidad de obtener velocidades estables debido a la compresibilidad de aire, y el riesgo de fugas que puede significar altos costos por pérdidas.

2.2. Fundamentos de neumática

Antes de profundizar el estudio de los principios y fundamentos físicos, es importante definir primero el fluido de trabajo que en este caso es el aire.

El aire es invisible, incoloro, inodoro y sin sabor. Los principales constituyentes del mismo son aproximadamente 78% nitrógeno, 21% oxígeno y 1% de dióxido de carbono y otros gases, incluyendo cierta cantidad de vapor de agua. La Tierra está rodeada por aire hasta una altura de aproximadamente 1600 km. Es de conocimiento general que el aire más cercano al suelo es más denso. En fines prácticos el aire cumple con las leyes de los gases ideales, por lo que se lo considera normalmente como un gas perfecto.

Presión:

Si se tiene una fuerza F aplicada sobre una superficie S , la presión sobre dicha superficie se define formalmente como el resultado del cociente entre la componente normal de la fuerza F_n y la superficie S , es decir:

$$P = \frac{F_n}{S}$$

(2.1)

En un fluido en equilibrio, la presión en cualquier punto es la misma en todas las direcciones, y se debe a la acción y reacción de los átomos intermoleculares. Esta actividad se intensifica o disminuye en proporcionalidad directa con la temperatura.

Las unidades normalmente utilizadas para la medición de la presión, así como sus equivalencias entre sí, son las siguientes:

Tabla 2.1. Equivalencia de unidades de presión

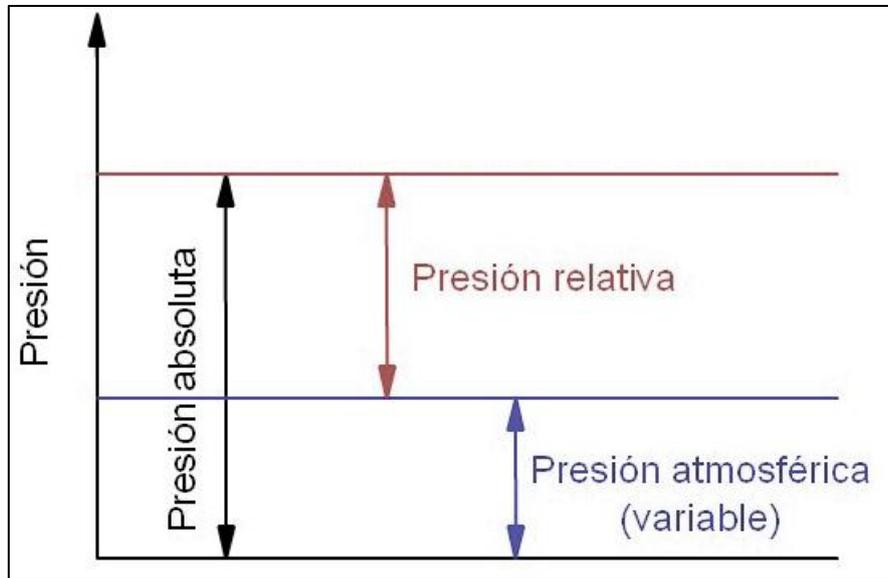
Unidad	psi	lb/ft²	kg/cm²	mm Hg	Kpa	bar	atm
1 psi	1	144	9,0703	51,713	6,985	0,069	0,068
1 lb/ft²	0,006944	1	--	0,3591	0,048	--	--
1 kg/cm²	14,223	2048,16	1	735,56	98	0,98	0,9678
1 mm Hg	0,0193	2,785	--	1	0,133	0,00133	--
1 Kpa	0,145	20,88	0,010197	7,5188	1	0,01	98,1
1 bar	14,5	2088	1,01972	751,88	100	1	0,987

La *presión atmosférica* es el resultado del peso de la columna de aire sobre la superficie de la tierra, por lo que explica que su magnitud varíe con la altura y condiciones meteorológicas. Al nivel del mar, la presión atmosférica es de aproximadamente 1 bar. El instrumento de medición para la presión atmosférica es el barómetro.

Todos los cuerpos terrestres se encuentran sometidos a la presión atmosférica. La presión adicional que normalmente se mide cuando se supera la anterior se denomina *presión relativa* o *manométrica*, que, como su nombre

indica, se mide con un manómetro. La suma de estas dos, es decir, la presión atmosférica y presión relativa se conoce como *presión absoluta*. Se puede apreciar esta definición gráficamente mediante la siguiente figura:

Figura 2.1. Medidas de presión



Fuente: Bueno, Antonio. *Unidad didáctica "Neumática e hidráulica"* Portaleso.

Volumen

El volumen de una sustancia es el espacio que esta ocupa. En un mismo volumen pueden existir distintas masas de gas dependiendo de la presión y la temperatura. Las unidades normalmente utilizadas para su medición, así como sus equivalencias entre sí, son las siguientes:

Tabla 2.2. Equivalencia de unidades de volumen

<i>Unidad</i>	cm ³	litro	m ³	gal	1 pie ³
1 cm³	1	0.001	--	--	--
1 litro	61.025	1	0.001	0.2642	0.0353
1 m³	10 ⁶	1000	1	264.2	35.31
1 gal	3785.4	3.785	--	1	0.1337
1 pie³	28.317	28.32	0.0283	7.481	1

Temperatura

Es magnitud que cuantifica la actividad molecular o energía cinética asociada al movimiento de las partículas de un material. Se puede expresar en unidades relativas comunes como °C (Celsius) o °F (Fahrenheit), o bien en unidades absolutas como K (Kelvin) o R (Rankine).

Caudal

Se conoce como caudal a la cantidad de fluido que atraviesa una sección dada por unidad de tiempo. Esta cantidad de fluido puede expresarse tanto en forma de masa como volumétrica, siendo estas dos expresiones relacionadas mediante la densidad del fluido en cuestión. Cabe recordar que la densidad de un gas es variable con la presión y la temperatura. El caudal se calcula como el producto del área de la sección por la velocidad del flujo.

$$Q = Av$$

(2.2)

En el diseño de una red de aire comprimido, es común usar el caudal volumétrico para el dimensionamiento del sistema. El problema normalmente reside en no confundir las condiciones de presión y temperatura a las cuales se debe calcular esta variable.

Para la selección de equipos de compresión, se utiliza la entrega de aire libre o FAD (free air delivery). Esta magnitud se refiere al flujo real volumétrico calculado para las condiciones de presión y temperatura absoluta que existen en la toma de entrada del equipo.

Leyes de los gases

Las características esenciales del estado gaseoso son¹:

- La presión de un gas en equilibrio es la misma en todos los puntos

¹ Guillén Salvador, Antonio. Introducción a la Neumática. Alfaomega, Colombia, 1999

- La densidad de un gas depende de su presión y temperatura
- La masa de un gas presenta una resistencia prácticamente nula a los esfuerzos de corte

Para un gas que se considera ideal, se cumplen las siguientes leyes:

Ley de Boyle Mariotte

A temperatura constante, el producto de la presión por el volumen del gas es constante.

$$P_1V_1 = P_2V_2 = cte \quad (2.3)$$

Ley de Charles y Gay-Lussac

El volumen de un gas cambia en proporción directa a los cambios en la temperatura absoluta manteniendo la presión constante.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = cte \quad (2.4)$$

Ley combinada de los gases

Avogadro halló que el volumen de un gas es directamente proporcional al número de moles² n que contiene.

$$V = kn \quad (2.5)$$

Al mismo tiempo, el número de moles es igual al cociente de la cantidad de sustancia en kg y la masa molar del elemento en kg/mol:

² Mol= cantidad de sustancia que contiene el mismo número de unidades elementales (átomos, moléculas, iones, etc.) que el número de átomos presentes en 12 gramos de carbono 12.

$$n = \frac{m}{M}$$

(2.6)

Tomando en cuenta la relación anterior junto con las otras dos leyes y las deducciones pertinentes, se encuentra que:

$$PV = mRT$$

o bien,

$$PV = nRuT$$

(2.7)

Esta última es la ley de los gases ideales, según la cual el volumen de un gas es directamente proporcional a la temperatura absoluta y e inversamente proporcional a su presión. La constante de proporcionalidad R es diferente para cada gas. Esta se refiere a la cantidad de trabajo requerida para elevar la temperatura de una masa de 1 kg del gas en un kelvin. La constante Ru es la constante de gas universal y es la misma para todas las sustancias.

$$Ru = 0,08205746 \left[\frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] = 1,987207 \left[\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] = 8,314472 \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

(2.8)

Humedad

El aire atmosférico siempre contiene humedad en forma de vapor de agua y es de suma importancia tenerlo en consideración ya que dicho aire es la materia prima utilizada por el equipo de compresión. Dependiendo de la humedad disponible y la temperatura ambiente, el aire atmosférico puede estar casi seco hasta completamente saturado. Un aire con humedad de saturación ha llegado a su máxima capacidad de contenido de vapor de agua. Mientras más alta sea la temperatura, mayor vapor de agua es capaz de retener el aire, y mientras menor sea la presión, menos humedad contiene.

La humedad absoluta es la cantidad de vapor de agua en masa contenida en una determinada cantidad de aire seco y la humedad relativa es la presión de vapor relativa expresada en términos porcentuales. La presión de vapor relativa se expresa de la siguiente manera:

$$Pva\ rel = \frac{Pva\ actual}{Pva\ saturado} \quad (2.9)$$

Donde Pva actual es la presión parcial de vapor de agua actualmente y Pva saturado es la presión parcial del vapor de agua saturado a iguales condiciones.

El *punto de rocío* atmosférico es la temperatura a la cual el vapor de agua contenido en el aire comienza a precipitarse en forma de condensado.

2.3. Redes de aire comprimido

Se entiende por red de aire comprimido al conjunto de tuberías que parten de la generación del aire comprimido, tema en el que se profundizará más adelante.

La misión de una red de aire comprimido es llevar a éste desde la zona de compresión a las de utilización. Los parámetros que rigen el diseño de una red son: la presión, el caudal, y la pérdida de carga admisible.

La caída de presión y la velocidad de circulación se encuentran estrechamente relacionadas. Cuanto mayor sea la velocidad de circulación, mayor es la caída de presión. Dado que con un diámetro pequeño de tubería la velocidad de circulación es mayor, es preferible dimensionar a la misma con el mayor diámetro que sea admisible bajo presupuesto y condiciones de peso de la tubería.

Los componentes de una red de aire comprimido son:

1. La línea principal, la cual conduce el aire comprimido desde la fuente de compresión al área de consumo
2. La línea de distribución, encargada de distribuir el aire dentro del área de consumo
3. La línea de servicio, que lleva el aire desde la línea de distribución al punto de trabajo
4. Accesorios de línea, que son todos los equipos como válvulas, conexiones, mangueras, etc.

Existen algunos métodos para el cálculo de diámetro de la tubería, como fórmulas o nomogramas. Para poder determinar el cálculo, es necesario conocer las variables pertinentes como la caída de presión admisible, el caudal volumétrico necesario y la presión de trabajo.

Una de las fórmulas más utilizadas para relacionar la caída de presión admisible y el diámetro de la tubería es la siguiente:

$$\Delta p = 450 \times \frac{q_c^{1,85} \times l}{d^5 \times p}$$

(2.10)

En donde:

Δp = caída de presión (bar)

q_c = FAD o entrega de aire libre (l/s)

d = diámetro interno de la tubería (mm)

l = longitud de la tubería (m)

p = presión absoluta inicial (bar)

La pérdida de presión admisible en una instalación fija de aire comprimido es de 0,1 bar. Los accesorios que se instalan tienen una longitud equivalente que es necesario tomar en cuenta.

Aparte de estos factores, como se dijo anteriormente, hay que tomar en cuenta la expansión futura de la instalación y el costo total.

Los materiales más comunes para la fabricación de tuberías para aire comprimido son:

- Acero

Cuando no existe ningún requerimiento especial éstas son las más utilizadas. Permite uniones con soldadura, que origina menos fugas por conexiones y una menor pérdida de presión, aunque con el riesgo de la producción de partículas de óxido.

- Acero inoxidable

En la industria alimenticia, farmacéutica, o en otras instalaciones donde existe alta exigencia en cuanto a la pureza y confiabilidad del sistema.

- Cobre

Es usado como alternativa al acero inoxidable, pero es más fácil de instalar.

- Plástico

Para una presión máxima de 12,5 bar y temperaturas entre -20°C y 20°C u 8 bar hasta 50°C, sin riesgos de sobrecalentamiento o vibración, se puede utilizar tubería de plástico.

Véase en la siguiente tabla el rango de presiones tolerables para algunos tipos de tuberías así como mangueras:

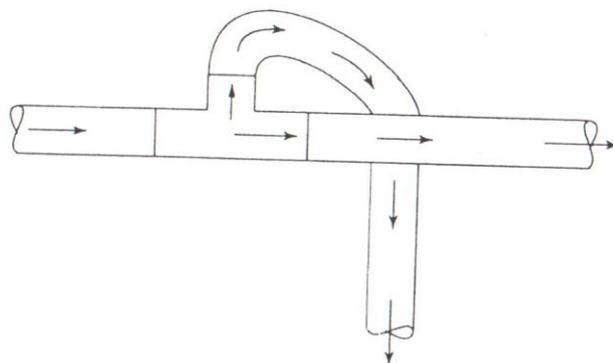
Tabla 2.3. Presiones nominales de materiales para tubos

Material	Presión máxima
	bar
Cobre	250
Aluminio	125
Latón	200
Acero inoxidable	2500- 4500
Polietileno @ 80°C	12-15
Nylon @100°C	7-10
Vinilo @25°C	8-10
Caucho @80°C	3-7

Fuente: Elaboración propia, Majumdar, S.R. *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento*. McGraw-Hill, México, 1997

Las tuberías de aire comprimido de posición horizontal deben colocarse con una pendiente de 1:200 en el sentido de la circulación y las líneas de servicio deben derivarse siempre dirigiéndolas hacia arriba, como se ilustra en la figura 2.2. Se debe colocar una trampa de agua al extremo de cada ramal. Estas precauciones sirven para evitar que el condensado se acumule en la línea y pueda llegar a causar daños en los puntos de consumo.

Figura 2.2. Ejemplo de ramificación de la línea de servicio



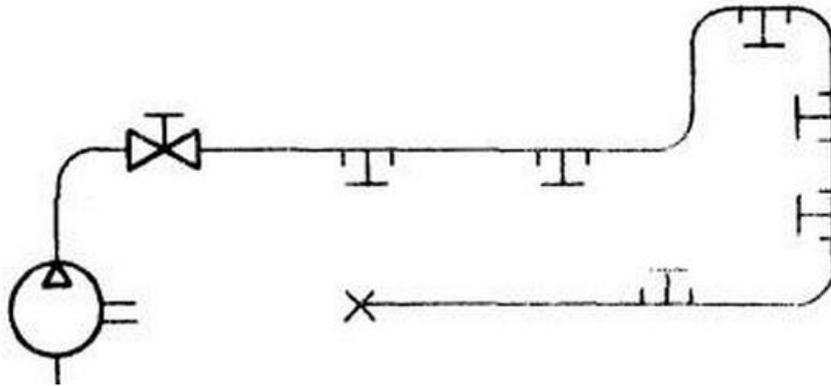
Fuente: Majumdar, S.R. *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento*. McGraw-Hill, México, 1997

2.3.1. Tipos de redes de aire comprimido

Existen dos tipos de redes de distribución de aire comprimido, las cuales son:

- a) Sistema abierto

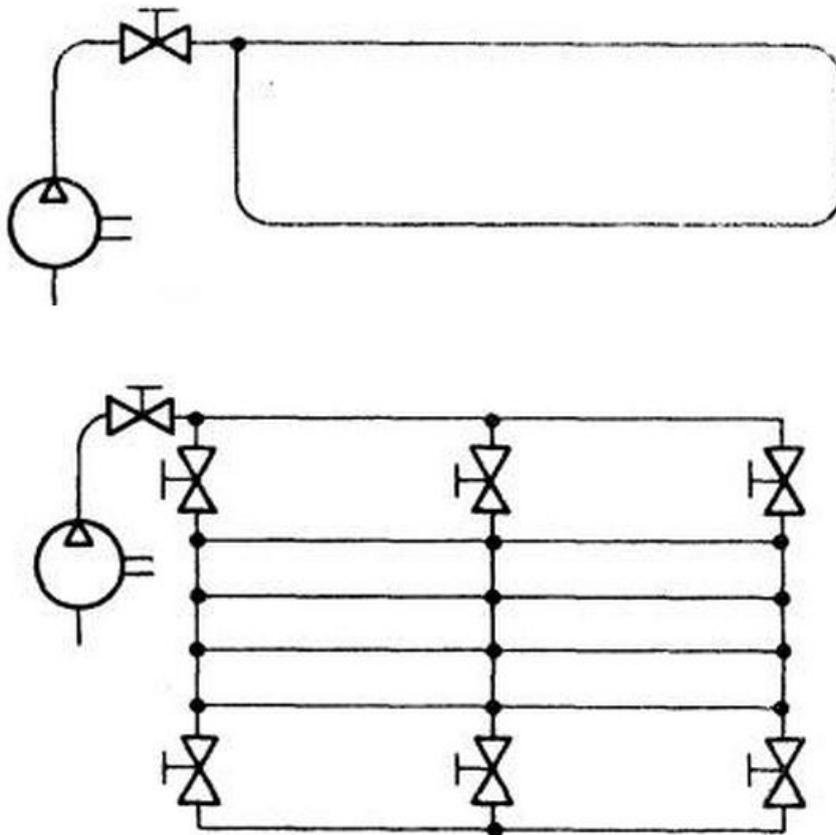
Figura 2.3. Sistema abierto



Fuente: *Conceptos Básicos de Neumática e Hidráulica. Sapiensman*

b) Sistema cerrado (anillo)

Figura 2.4. Sistema cerrado y con interconexiones



Fuente: *Conceptos Básicos de Neumática e Hidráulica. Sapiensman*

Como su nombre indica, la red con sistema abierto se constituye por una sola línea principal de la cual se desprenden las secundarias y las de servicio. La

poca inversión inicial es su principal ventaja, mientras que su principal desventaja es la paralización necesaria para el mantenimiento.

El sistema cerrado requiere de mayor inversión que el abierto, sin embargo normalmente se prefiere el sistema cerrado, en razón de que no tiene extremos muertos, las fluctuaciones de la presión se reducen considerablemente y se facilita el mantenimiento. La principal desventaja es la falta de dirección constante del flujo por irregularidades en la demanda, lo cual inutilizaría a los accesorios que tienen una especificación entrada- salida. La decisión siempre depende de la posición de los puntos de consumo y el costo total de la instalación.

2.3.2. Componentes del sistema de aire comprimido

La tecnología neumática precisa de una estación de generación y preparación del aire comprimido formada generalmente por un compresor, un medio de depósito, una red de tuberías y un sistema de preparación de aire para cada dispositivo neumático individual.

La elección de los componentes y equipos adecuados y modernos, tomando en cuenta factores ambientales y de crecimiento futuro mediante un diseño cuidadoso es un gran beneficio para la empresa auspiciante en términos de costos de operación, mantenimiento y eficiencia de sus procesos neumáticos.

2.3.2.1. Generación del aire comprimido

El elemento central de una instalación productora de aire comprimido es el compresor. La función de un compresor neumático es aspirar aire a presión atmosférica y comprimirlo a una presión más elevada. Se habla de un compresor cuando la presión alcanzada sobrepasa los 3 bar. Por debajo de esta presión se denominan soplantes o *blowers*. Si la presión obtenida es cercana a la atmosférica, entonces los denominamos ventiladores.

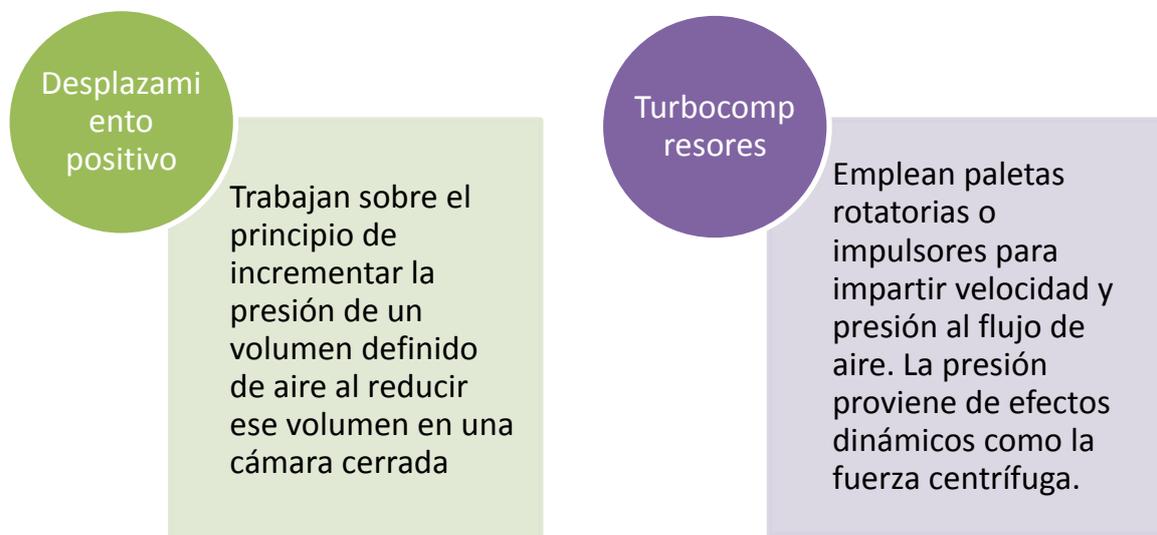
La elección de compresores principalmente radica en la cantidad de aire que debe comprimir y la presión a la que éste debe estar, sin embargo, hay otros factores que deben tomarse en cuenta según el tipo de compresor.

2.3.2.1.1. Tipos de compresores

Existen muchas características operativas de los compresores de aire que conducen a diferentes tipos de clasificación de los mismos. Dependiendo de las diversas características, la clasificación se puede hacer de varias maneras:

- Según fuente energética, se pueden clasificar a los compresores como eléctricos o de combustión interna, por el motor que los acciona.
- Según condición del aire comprimido, pueden ser contaminado con aceite lubricante o sin aceite.
- Según número de etapas. En la generación de aire comprimido es normal ver equipos de hasta 2 etapas.
- Según tipo de generación. Se clasifican en compresores de desplazamiento positivo y turbocompresores. En la figura 2.5 se describe la diferencia entre ambos equipos.
- Por condición de montaje, pueden ser estacionarios o portátiles.
- Por su medio de refrigeración, por aire o agua.

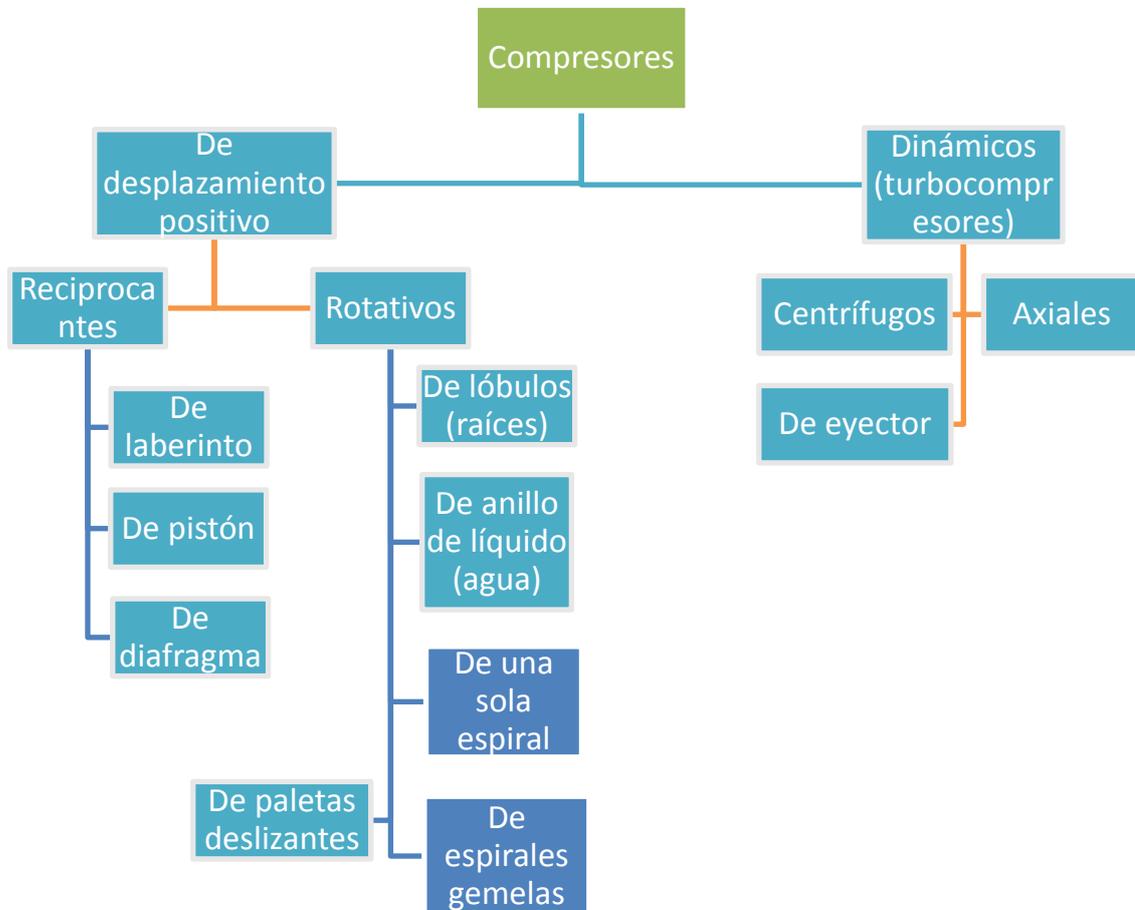
Figura 2.5. Clasificación de compresores según tipo de generación



Fuente: Elaboración propia, Majumdar, S.R. *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento*. McGraw-Hill, México, 1997

Dentro de estas últimas dos categorías, es posible afinar aun más la clasificación como se ve en el diagrama de árbol de la figura 2.6.

Figura 2.6. Tipos de compresores neumáticos



Fuente: Elaboración propia, Majumdar, S.R. *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento*. McGraw-Hill, México, 1997

A continuación se describirán aquellos tipos de compresores más comunes:

Tabla 2.4. Tipos de compresores neumáticos más utilizados

Tipo	Descripción	Observaciones
Émbolo	Utilizan un sistema de biela-manivela para transformar el movimiento rotativo del motor en movimiento de vaivén del émbolo. Son de una o más etapas. El rendimiento de aquellos de dos etapas es mayor y es posible llegar a presiones más altas.	Se recomienda escoger aquellos que proporcionen el caudal requerido con el número de revoluciones más bajo, ya que a pesar de la inversión inicial, da un rendimiento y vida útil más larga.
Rotativos	Pueden ser de paletas o de tornillos. Suministran presiones más bajas pero más caudal que los de émbolo, y presiones más altas pero menor caudal que las de los compresores centrífugos.	Sus ventajas más notables son su marcha silenciosa y un suministro más continuo de aire, por lo que teóricamente no requieren de un tanque de almacenamiento si la demanda es constante.
Centrífugos	La presión es ejercida al forzar las partículas a alejarse del centro como resultado de la acción centrífuga.	No requieren de una transmisión reductora por lo que su accionamiento es de manera rápida.

Fuente: Elaboración propia, Majumdar, S.R. *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento*. McGraw-Hill, México, 1997

Para un solo compresor hay dos tipos principales:

- Por paro-marcha

En este tipo se utiliza un presostato que tomando la medida de la presión del depósito o línea, envía una señal de paro sobre el motor. Debido al consumo el nivel de presión baja hasta un nivel mínimo en el que se da una señal de arranque al motor. El motor no debe arrancar más de 10 a 15 veces por hora.

- Por giro en carga-vacío

Cuando la condición anterior no puede cumplirse, es conveniente el sistema de giro en carga-vacío, donde el gasto energético de la marcha continua es menor que el de los arranques necesarios. En este caso la válvula de aspiración es controlada por un sensor de presión de la siguiente manera: si la presión es adecuada, la válvula se mantiene abierta y se vuelve una especie de respiradero. Si la presión baja hasta un nivel predeterminado, se libera la válvula y el compresor vuelve al modo de carga nuevamente, fluyendo el aire hacia el depósito o línea.

2.3.2.2. Almacenamiento del aire

Los tanques de almacenamiento, también denominados tanques pulmón o depósitos acumuladores, tienen dos funciones principales:

- Amortiguar pulsaciones provenientes de la generación de aire comprimido.
- Almacenar aire comprimido para hacer frente a picos de demanda.

Pueden construirse en forma vertical u horizontal. Los accesorios principales que contienen son:

- Manómetro
- Válvula de purga de condensado
- Válvulas de paso
- Válvula de seguridad

Los factores que influyen en su dimensionamiento son:

- Caudal del compresor
- Variaciones en la demanda
- Régimen de trabajo del compresor
- Caída de presión admisible

El tanque de almacenamiento también contribuye a enfriar el aire y de este modo, condensar parte de su humedad. Éste debe ser al menos suficientemente grande como para contener todo el aire entregado por el compresor en un minuto.

Cuando la demanda de aire comprimido requiere grandes cantidades en períodos cortos de tiempo, no es económicamente viable dimensionar el compresor o la red exclusivamente para este patrón de consumo. En estos casos un tanque de almacenamiento debe ser instalado por separado cerca del punto de consumo y acordemente dimensionado. El dimensionamiento del compresor también se realiza tomando esto en cuenta, utilizando el consumo promedio.

La relación normal para calcular el volumen de tanque de almacenamiento necesario es la siguiente:

$$V = \frac{0,25 \times q_c \times p_1 \times T_o}{f_{max} \times (p_u - p_L) \times T_1} \quad (2.11)$$

En donde:

V = volumen del depósito (litros)

q_c = FAD del compresor (l/s)

p_1 = presión a la entrada del compresor (bar)

T_1 = temperatura máxima a la entrada del compresor (K)

T_o = temperatura de salida del compresor (K)

$(p_u - p_L)$ = diferencia de presión permitida

f_{max} = frecuencia de carga

Si se da la condición antes descrita, de un requerimiento intermitente en largos intervalos de tiempo, el tanque de almacenamiento junto al punto de consumo debe tener un volumen mínimo de:

$$V = \frac{q \times t}{p_1 - p_2} = \frac{L}{p_1 - p_2}$$

(2.12)

V = volumen del depósito (litros)

q =flujo de aire durante el vaciado (l/s)

t = duración del vaciado (s)

p_1 = presión normal de trabajo en la línea (bar)

p_2 = presión mínima para la función del consumo (bar)

L =requerimiento de aire de la etapa de llenado (l/ciclo de trabajo)

No hay peligro si el tanque de almacenamiento es más grande de lo requerido, sin embargo, económicamente no es conveniente.

2.3.2.3. Acondicionamiento del aire

Es de suma importancia que el aire entregado a las zonas de utilización tenga buena calidad, de modo que la maquinaria neumática no sufra daños por humedad, sobre-presión, partículas contaminantes y aceite degradado.

Para evitar estos inconvenientes son necesarias las unidades de mantenimiento, las cuales tienen tres elementos principales:

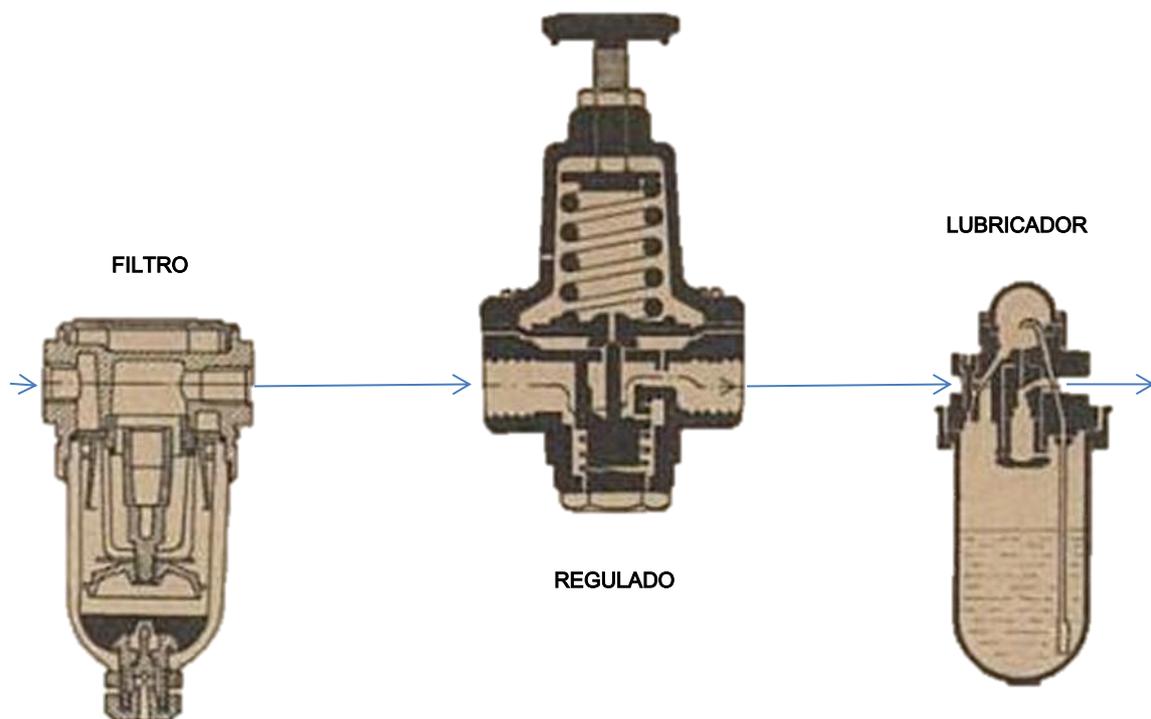
1. Filtro de aire automático o manual
2. Regulador de presión
3. Lubricador

Se conoce que una propiedad inherente y natural del aire es contener vapor de agua, por lo que un elemento importante en el acondicionamiento es el secador, el cual se tratará más adelante. Hoy en día muchos compresores ya incluyen secadores en su sistema, sin embargo es necesario de cualquier manera diseñar la línea considerando que va a existir condensado y colocar trampas al

final de las ramificaciones de la red, sin dejar de lado la instalación de unidades FRL por cada punto de consumo que así lo requiera.

La unidad de mantenimiento debe instalarse tan cerca como se pueda del equipo al que sirve, con sus componentes en el orden en el que se los enumeró, de acuerdo a la figura 2.7.

Figura 2.7. Elementos constitutivos de una unidad FRL



Fuente: Elaboración propia, Millán Teja, Salvador. *Automatización Neumática y Electroneumática*. Alfaomega Marcombo.

Filtro de aire

Específicamente, el filtro de aire previene que partículas extrañas causen averías en los puntos de utilización. Estas partículas pueden ser del siguiente tipo:

- Óxidos de las propias tuberías
- Hilachas de teflón
- Agua condensada
- Aceites descompuestos del compresor

- Vapores de aceite

El sistema de filtrado normalmente utilizado es aquél donde, el aire, al pasar por el filtro, lo hace forzado por un deflector que por acción centrífuga proyecta contra las paredes las partículas más pesadas, que después de chocar contra la pared del vaso, descienden a la parte inferior, donde son eliminados por una purga automática o manual. La capacidad de filtración varía según rangos de 15 a 25 μm .

En aplicaciones especiales como por ejemplo la medición y calibración neumática, pulverización de pinturas, industria alimentaria y farmacéutica, se utilizan filtros purificadores en las cuales se añade un proceso más, que es la filtración por carbón activo. Estos filtros pueden retener partículas de hasta 1 μm .

Regulador

La presión de la línea de aire comprimido suele ser fluctuante, y la fuerza de ejecución de los actuadores neumáticos es directamente proporcional a la presión de alimentación. Es por estas razones que se ve la necesidad de instalar reguladores en los puntos de consumo ajustados a un nivel menor al mínimo que contiene la red.

Un regulador de presión funciona como una válvula la cual es regulada mediante un tornillo de ajuste. La presión que fluya a través de la abertura de la válvula es directamente proporcional a la compresión del resorte que se encuentra debajo del diafragma. Si la máquina a alimentar está en reposo, la presión se equilibra cerrándose el regulador. En muchos casos la válvula tiene un sistema de desfogue para proteger al sistema de la sobrepresión.

En la actualidad es común ver al filtro y al regulador en un solo equipo.

Lubricador

El fin de un lubricador es formar una neblina de aceite-aire con la finalidad de proporcionar lubricación a los componentes mecánicos y de este modo alargar su vida útil.

Cuando el aire entra al lubricador, el aire fluye por una válvula presurizando el depósito y absorbe aceite mediante el efecto Venturi, el cual consiste en aumentar la velocidad consiguiendo una disminución de presión de un fluido al hacerlo pasar por una sección reducida. Debido a la disminución de presión, el flujo aspira el contenido del conducto anexo al conducto de flujo.

Secadores

Las temperaturas más altas y las presiones más bajas permiten la existencia de más agua en el aire, es por esto que para cuidar a los componentes neumáticos es necesario instalar secadores de aire. En la tabla 2.5 se muestra el contenido de vapor de agua en un metro cúbico de aire a varias temperaturas y los valores de la humedad relativa HR en porcentaje, a una presión de 0 a 10 bar en aproximación para los fines pertinentes.

Tabla 2.5. Cantidad de condensado del agua en el aire en g/m³

Temp. °C	% de Humedad Relativa (HR)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-12	0.179	0.354	0.533	0.709	0.888	1.066	1.25	1.421	1.60	1.78
0	0.483	0.965	1.451	1.933	2.426	2.906	3.387	3.867	4.348	4.83
10	0.934	1.865	2.79	3.73	4.67	5.606	6.52	7.46	8.40	9.337
15	1.313	2.617	3.816	5.063	6.386	7.795	9.029	10.158	11.631	17.957
21	1.826	3.661	5.469	7.30	9.131	11.946	12.793	14.60	16.431	18.698
27	2.494	4.98	7.516	10.069	12.521	15.012	17.582	20.024	22.757	25.634
32	3.307	6.614	10.061	13.548	16.835	20.276	23.486	27.004	30.451	33.721
35	3.936	7.872	11.808	15.744	19.681	23.617	27.554	31.489	35.426	39.248
37.8	4.531	9.039	13.571	18.102	22.611	27.141	31.673	36.181	39.90	45.248
43.3	6.018	12.037	18.056	24.075	30.094	36.112	42.131	48.150	54.16	60.371
49	7.895	15.79	23.686	31.58	39.476	47.37	55.267	63.166	78.91	78.928
55	10.161	20.322	30.583	40.65	50.805	61.20	71.127	81.30	91.504	101.656

Fuente: Elaboración propia, Majumdar, S.R. *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento*.

McGraw-Hill, México, 1997

Usando la tabla expuesta anteriormente, podemos aproximar la cantidad de condensado que habrá en el sitio de ejecución de este proyecto.

Las condiciones ambientales promedio a la entrada del compresor son:

Temperatura: 15,6°C³

HR: 90.3%

Presión atmosférica: 0,7 bar

En estas condiciones, cada metro cúbico de aire contiene 11.631 gramos de agua. Si el aire se comprime a 7 bar, tomando en cuenta caídas de presión en la línea y accesorios, entonces la relación de compresión, que se obtiene dividiendo la presión absoluta de trabajo entre la presión atmosférica, es:

$$rc = \frac{7 + 0.7}{0.7} = 11$$

(2.13)

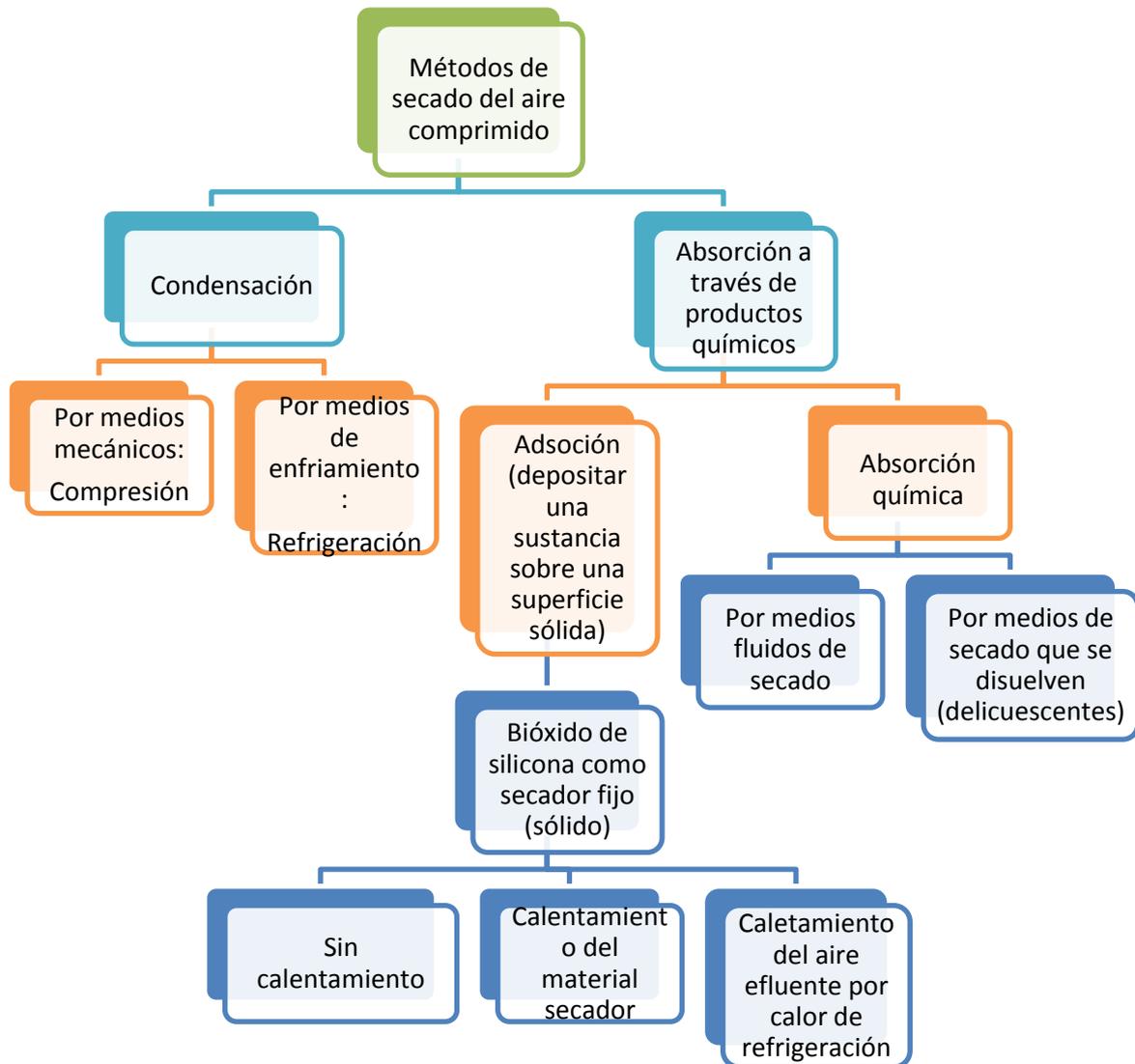
Esto quiere decir que el volumen de aire requerido para producir 1 m³ de aire a 7 bar es 11 m³. Cada metro cúbico de aire en condiciones ambientales contiene 11.631 gramos de agua, por lo que 1m³ de aire comprimido contiene 11.631 x 11= 127.941 gramos de agua en forma de vapor.

Suponiendo que la temperatura del aire después de comprimir es de 32°C, debido a pérdidas asumidas de calor del proceso mecánico de compresión, se ve en la tabla 2.5 que a esa temperatura el aire saturado puede contener hasta 33.721 gramos de agua en forma de vapor, por lo que se condensará el resto. La diferencia resulta ser 127.941-33.721= 94.22 gramos de agua líquida por metro cúbico de aire comprimido, es decir, 94.22 ÷ 11= 8.565 gramos de agua líquida por metro cúbico de aire a condiciones ambientales.

Este cálculo fue realizado sin tomar en cuenta un secador a la salida del compresor. Los tipos de secadores se clasifican de acuerdo su método de funcionamiento, como se indica en la figura 2.8.

³ Estos valores fueron calculados como promedio en un período de 14 días

Figura 2.8. Clasificación de secadores según método funcional



Fuente: Elaboración propia, Majumdar, S.R. *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento*. McGraw-Hill, México, 1997

Los secadores refrigerados son uno de los tipos de secadores más comunes que ayudan a extraer la mayor parte del agua enfriando al aire bajo su punto de rocío, separando el condensado. En el caso de un secador de aire tipo frigorífico de punto de rocío de +4°C, utilizando nuevamente la tabla 2.5, se interpola y se ve que a esa temperatura la cantidad máxima de agua que se puede contener en forma de vapor es de 6.633 gramos. Esto quiere decir que

127.941-6.633= 121.308 gramos de agua totales se liberarán en forma de condensado gracias a la utilización de este equipo.

El otro tipo de secador más común es el de adsorción, que efectúa el secado mediante un adsorbente sólido regenerable que retiene el vapor de agua, eliminándolo al ser reactivado. Ejemplos de estos materiales adsorbentes son la alúmina y el gel de sílice. Estos secadores son aseguran una mayor calidad del aire comprimido.

La adsorción no debe ser confundida por la absorción. En la adsorción las moléculas o partículas son atrapadas en la *superficie* de un material, mientras que en la absorción, las moléculas o partículas *se incorporan al volumen* del material absorbente⁴.

⁴ Manual del Carbón Activo. Máster en Ingeniería del Agua. E.U. Politécnica U. Sevilla.
www. aguapedia.net. Internet. Acceso: Noviembre 25, 2012

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

3.1. Requerimiento de aire

Para diseñar correctamente un sistema de aire comprimido es necesario responder las siguientes preguntas:

1. ¿Qué capacidad de aire se requiere?
2. ¿Qué calidad?
3. ¿Qué tipo y tamaño de compresor se necesita?
4. ¿Cuál es el diseño óptimo del sistema de distribución de aire?
5. ¿Qué dimensiones son requeridas?
6. ¿Qué accesorios de línea son requeridas?

Este capítulo se ha organizado de manera que se respondan dichas preguntas en orden y a cabalidad.

Lo primero que se debe hacer es un estudio sobre los requerimientos neumáticos reales de la planta. Una subestimación resultaría en una presión inadecuada con ningún margen para expansiones futuras. Por otro lado, una sobrestimación significa una inversión innecesaria.

3.1.1. Consideraciones previas

Para iniciar el análisis de diseño del sistema de aire comprimido, es necesario tener una clara idea de la disposición de las unidades consumidoras dentro de la planta. El layout de la planta de Chova del Ecuador S.A., con sus dimensiones generales se encuentra en el Anexo A.

Como se dijo anteriormente, las condiciones ambientales que se van a tomar como referencia para el lugar de ejecución del proyecto, en comparación con las condiciones ambientales estándar son:

Tabla 3.1. Condiciones atmosféricas

	Condiciones reales	Condiciones estándar
Presión	0,7 bar	1 bar
Temperatura	15,6 °C	20 °C

Conforme aumenta la altitud disminuye la capacidad de entrega de un compresor debido a la disminución de presión atmosférica. En el momento de adquirir un compresor, el valor de caudal entregado obedece a condiciones ambientales estándar a nivel del mar, por lo que es necesario considerar un factor que compense dicho efecto para las condiciones reales de admisión.

De acuerdo a la ley de los gases ideales, se cumple la siguiente relación si se toma el volumen en términos de caudal:

$$\frac{P_s \times Q_s}{T_s} = \frac{P_r \times Q_r}{T_r}$$

(3.1)

Donde,

P_s = Presión estándar

Q_s = Caudal en condiciones estándar

T_s = Temperatura estándar

P_r = Presión real

Q_r = Caudal en condiciones reales

T_r = Temperatura real

Despejando de la siguiente manera,

$$Q_r = \left(\frac{P_s \times T_r}{T_s \times P_r} \right) \times Q_s$$

Donde

$$\left(\frac{P_s \times T_r}{T_s \times P_r} \right) = cte$$

$$\left(\frac{P_s \times T_r}{T_s \times P_r} \right) = \left[\frac{1 \times (273 + 15,6)}{(273 + 20) \times 0,7} \right] = 1,407$$

Por lo tanto,

$$Q_r = 1,407 Q_s$$

Si se toma en cuenta la humedad relativa, tenemos que

$$Q_2 = Q_1 * \left[\frac{P_r}{P_r - P_v \times HR} \right]$$

(3.2)

Donde,

HR= Humedad relativa

P_r = Presión real

P_v = Presión de vapor a T_r

Se sabe que 0,7 bar son 10,29 psi, y la presión de vapor a 15,6 grados es de 0,257 psi:

$$Q_2 = Q_1 * \left[\frac{10,29}{10,29 - 0,257 \times 90,3/100} \right]$$

$$Q_2 = 1,023 Q_1$$

Por lo tanto, tomando en cuenta el factor de corrección anterior,

$$Q_r = 1,407 * 1,023 Q_s$$

$$Q_r = 1,439 Q_s$$

En otras palabras, el diseño para las condiciones ambientales donde se sitúa este proyecto exige un factor de corrección del 43,9%, que se tomará en cuenta más adelante en los cálculos.

3.1.2 Descripción de unidades consumidoras

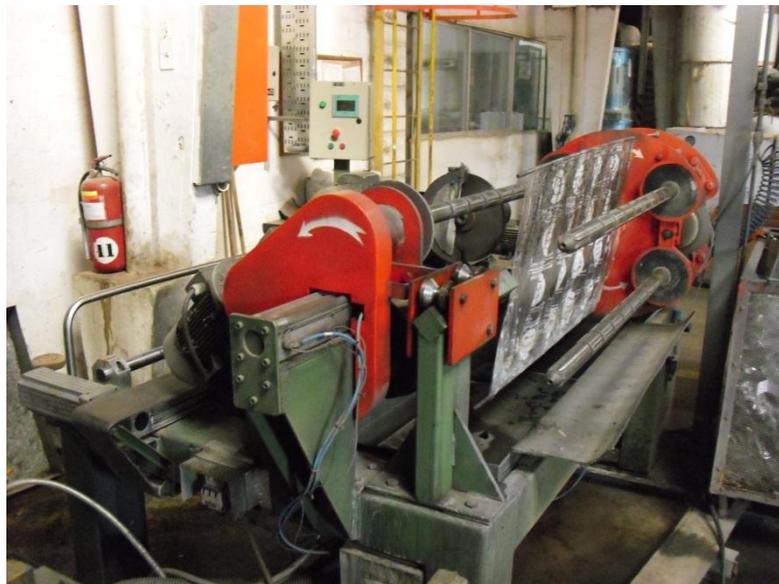
Como se expuso anteriormente en el primer capítulo, en la planta de Chova del Ecuador S.A., existen algunos procesos actuales que requieren de aire comprimido. Entre ellos están:

1. Expulsador de rollos laminados



Su principal función, como su nombre lo indica, es expulsar los rollos una vez cortados que salen de la estación de laminación asfáltica de todo tipo, para pasar al proceso de rotulado. Consiste en un pistón neumático de doble efecto, cuyos consumos se detallarán más adelante junto al resto de actuadores.

2. Cortadora de rollos de Alumband



Esta máquina contiene a varios actuadores neumáticos de distintas características. La función de la misma es cortar en secciones a los rollos

de Alumband según las presentaciones que se comercializan. Los actuadores de esta máquina son los siguientes

- Pistón de doble efecto para movimiento de la cuchilla
- Pistón de doble efecto para movimiento transversal
- Dos actuadores de fuelle de expulsión del rollo

3. Dos cortadoras de flejes metálicos



Estas máquinas cortan el fleje antes de ser laminado en secciones destinadas a la línea de canales y bajantes. El sistema neumático alimenta a dos pistones de doble efecto.

Aparte de estos procesos, se desea suministrar aire comprimido a un nuevo conjunto de maquinaria que se está implementando:

4. Estación de inyección de Poliuretano

- a. Bomba de Isocianato
- b. Bomba de Polioliol



Ambas bombas son de diafragma e iguales, y su misión es cargar los tanques de Isocianato y Polioli que utiliza la inyectora de poliuretano, una vez que han llegado a un nivel mínimo.

c. Inyectora de Poliuretano



Esta máquina tiene un sistema hidráulico, un sistema oleohidráulico y un sistema neumático que tiene dos funciones principales: presurizar los tanques de químicos y accionar las válvulas de control.

5. Prensa Neumática



Esta prensa neumática está diseñada para contener el poliuretano mientras reacciona y llena un molde determinado para ese fin. Tiene cuatro pistones de doble efecto y dos pistones de menor tamaño que cumplen la función de sujetadores.

Es de buena práctica tomar en cuenta un crecimiento futuro por la adquisición de nueva maquinaria u adaptación de nuevos procesos en el diseño de un sistema de aire comprimido.

3.1.3 Cálculo de la necesidad de aire

La capacidad de aire se determina por:

a) Presión de aire

La mayoría de los equipos neumáticos operan a 6 bar, sin embargo, es necesario asegurarse al inspeccionar las especificaciones de cada máquina y obedecer las recomendaciones del fabricante.

Una presión correcta en los elementos no sólo depende en el compresor, sino en un buen diseño de la red de aire comprimido y sus accesorios. Normalmente la presión de salida del compresor es de 7 bar, debido a que se toma en cuenta 1 bar por caídas de presión.

En el caso de que exista un equipo con mayor requerimiento de presión que el resto, el diseño se lo hace en base a él. En casos extremos esto justificaría la instalación de un compresor separado.

Las presiones que necesitan las máquinas a abastecer de la planta de Chova del Ecuador S.A. son las siguientes:

Tabla 3.2. Presión de trabajo de la maquinaria actual en Chova del Ecuador S.A.

Descripción maquinaria	P. de trabajo bar
Cortadora: pistón para cuchilla	6
Cortadora: pistón desplaza rollos	6
Cortadora: actuadores fuelle	6
Expulsador de rollos enrolladora	6
Inyectora de poliuretano	6
Cilindros verticales de prensa	6
Sujetadores de prensa	6
Cortadora de fleje 1	4,5
Cortadora de fleje 2	4,5
Bomba de diafragma Isocianato	6
Bomba de diafragma Polioli	6

Como se puede ver, el nivel de presión es el mismo para todos, excepto en el caso de las cortadoras de fleje, donde es 4.5 bar. Es evidente que el sistema debe diseñarse pensando en una presión final general de 6 bar y utilizar reguladores de presión.

b) Volumen de aire

Para conocer el caudal volumétrico de aire que se consumirá, es necesario primero sumar el consumo total de aire de cada máquina, lo cual da la máxima carga teórica. Una vez realizado esto, se puede estimar el consumo habitual tomando en cuenta condiciones ambientales, fugas y expansión futura.

3.1.3.1. Requerimiento total

Como se puede ver, la mayoría de elementos consumidores de aire comprimido son actuadores de pistón. La manera más práctica de calcular el consumo de dichos puntos es el siguiente:

$$Q = l \times n \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times a \times rc$$

(3.3)

Donde

l= carrera del cilindro

n= número de ciclos por minuto

d= diámetro del cilindro

a= número de carreras

r= relación de compresión

En la tabla 3.3 se indican los consumos calculados de cada actuador de la maquinaria mencionada. En este caso se considera que todos los puntos de consumo trabajan al mismo tiempo.

La carga teórica, que significa la suma de todos los consumos, es de 42,39 pies cúbicos sobre minuto.

Ejemplo de cálculo:

El expulsador de rollos de la enrolladora representa uno de los consumos más significativos de la planta, por lo que se lo tomará en cuenta como ejemplo de cálculo:

Presión de trabajo: 6 bar

Diámetro: 80 mm

Longitud efectiva: 1100 mm

Cantidad: 1

Efecto: Doble

Se remplazan valores sobre la ecuación 3.3,

$$Q = 1,1 \text{ m} \times 2,22 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} \times \frac{\pi \times 0,08^2}{4} \text{ m}^2 \times 2 \times \left(\frac{1+6}{1} \right)$$

$$Q = 0,172 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Que en unidades CFM es

$$Q = 0,172 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{35,3 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3}$$

$$Q = 6,072 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \text{ ó CFM}$$

En el caso de los actuadores que no son de pistón, se refirió a las hojas técnicas para estimar su consumo en pies sobre minuto.

Podemos ver que según los datos de la tabla, el caudal utilizado teóricamente es de **42,39 CFM**.

Como se mencionó anteriormente, para calcular el valor real es necesario considerar según el caso, el factor de utilización, el factor de simultaneidad, las pérdidas por fugas, la corrección por altura y el crecimiento esperado.

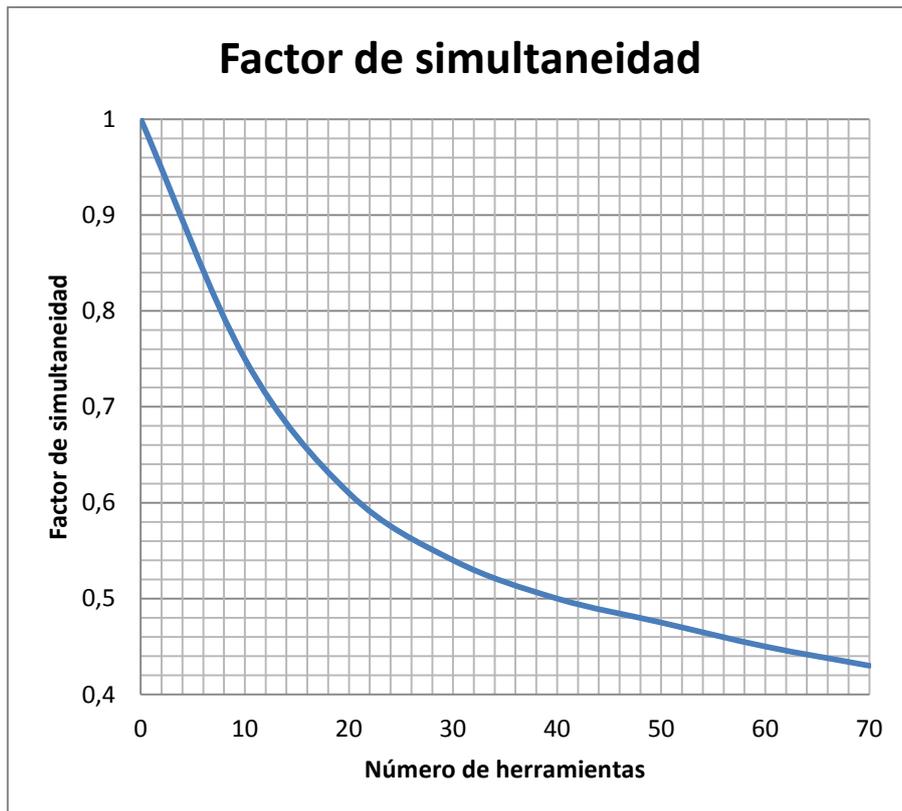
Tabla 3.3. Consumos maquinaria Chova del Ecuador S.A.

Descripción maquinaria	P. de trab. bar	Φ m	l m	Ctd.	Capacidad m3	No. Carreras.	Ciclos x min 1/min	rc	Q teórico m3/min	Q teórico SCFM
Cortadora: pistón para cuchilla	6	0,063	0,200	1	0,00062	2	2,40	7	0,021	0,739
Cortadora: pistón desplaza rollos	6	0,063	0,200	1	0,00062	2	0,25	7	0,002	0,077
Cortadora: actuadores fuelle	6	0,250	0,085	2	0,00140	1	0,25	7	0,002	0,086
Expulsador de rollos enrolladora	6	0,080	1,100	1	0,00553	2	2,22	7	0,172	6,072
Inyectora de poliuretano	6	-	-	1	0,00833	1	0,07	7	0,004	0,137
Cilindros verticales de prensa	6	0,160	0,400	4	0,03217	2	0,07	7	0,030	1,060
Sujetadores de prensa	6	0,080	0,250	2	0,00251	2	0,07	7	0,002	0,083
Cortadora de fleje 1	5,6	0,085	0,150	2	0,00170	2	2,61	6,6	0,059	2,069
Cortadora de fleje 2	5,6	0,085	0,150	2	0,00170	2	2,61	6,6	0,059	2,069
Bomba de diafragma Isocianato	6	-	-	1	-	-	0,01	7	0,425	15,00
Bomba de diafragma Polioli	6	-	-	1	-	-	0,01	7	0,425	15,00
									1,201	42,394

3.1.3.2. Requerimiento habitual

Para obtener la carga real, la carga teórica normalmente se multiplica por un factor de uso y por un factor de simultaneidad, que depende del número de herramientas o máquinas a las que sirva la red. El factor de simultaneidad puede determinarse a partir de la figura 3.1 El factor de utilización puede determinarse por tablas para herramientas neumáticas, sin embargo, éste no es el caso para este proyecto, por lo que dicho factor debe estimarse según la planificación de la producción.

Figura 3.1. Factor de simultaneidad



Fuente: Elaboración propia, Atlas Copco. *Manual sobre Aire Comprimido y su Aplicación en la Industria.*

A este volumen de aire es necesario adicionar un porcentaje por expansiones futuras, que en el caso de Chova del Ecuador S.A., es del 30%, considerando un aumento de capacidad productiva del 10% al año dentro de los próximos tres años.

También se debe tomar en cuenta un margen adicional por fugas de por lo menos un 5% de la capacidad instalada. Según el *Manual de Aire Comprimido* de Atlas Copco, la experiencia indica que sólo donde se realiza un buen mantenimiento, las fugas se mantienen en un 5%. En el caso de poco mantenimiento o negligencia pueden existir fugas que signifiquen hasta un 30% de la capacidad instalada, por lo que se suele tomar un valor entre 10-15%. En la siguiente figura se puede apreciar lo que una fuga de aire significa en términos de potencia del compresor.

Figura 3.2. Pérdida de potencia por fugas

Díámetro del agujero en mm	1	3	5	10
Fugas (l/s) a 6 bar	1	10	27	105
Pérdida (Kw) del compresor	0,3	3,1	8,3	33

Fuente: Traducción, Atlas Copco. *Compressed Air Manual*. 7ma Edición, Bélgica, 2010.

Observado la figura anterior se puede observar que el aire comprimido es una fuente de energía que, como todas, debe gestionarse de manera tal que el mantenimiento asegure una mínima cantidad de fugas y el dimensionamiento sea acorde a los requerimientos.

Dado que el cálculo del requerimiento total se hizo tomando en cuenta la utilización por unidad de tiempo a manera de ciclos por minuto, no es apropiado considerar un factor de uso. Además, cada unidad consumidora cumple una función diferente y única en la planta, por lo que tampoco se aconseja incluir al factor de simultaneidad en estos casos.

Siendo el consumo teórico total calculado de 42,39 CFM, el consumo habitual se calcula añadiendo los factores antes mencionados,

Tabla 3.4. Consumo habitual Chova del Ecuador S.A.

Variables	Porcentaje	CFM
Consumo por desgaste	5%	2,1
Fugas	10%	4,2
Expansión futura	30%	12,7
Corrección por factores ambientales	44%	18,6
	Total	37,7
	Suma	80,1

Por lo tanto, el consumo total es de **80,1 CFM**.

3.1.4 Calidad de aire requerida

Antes de seleccionar un compresor, es importante tener conocimiento sobre el grado de calidad de aire que se va a utilizar.

La calidad del aire comprimido se refiere a:

- Contenido de humedad
- Contenido de aceite
- Contenido de partículas sólidas

La calidad de aire depende de la aplicación destinada. La mayoría de veces, se requiere muy buena calidad de aire para algunas operaciones y para otras no es un factor crítico, por lo que debe tomarse la decisión que sea económicamente más rentable.

Según la ISO 8573-1, existen seis clases de calidad de aire, que se indican en la tabla 3.5. Para determinar qué clasificación industrial se requiere se deben plantear las siguientes preguntas:

- a) ¿La calidad del aire comprimido afecta al proceso productivo y a la calidad del producto final?

Respuesta: el punto de consumo en el cual la calidad de aire afecta significativamente al producto es en la inyectora de poliuretanos, dado que

el aire tiene contacto con los reactivos, isocianato y polioli. Se conoce que el isocianato es muy reactivo y puede generar calor y presión excesiva si es mezclado con agua. Así mismo, la presencia de partículas en el aire puede contaminar el producto y afectar la reacción esperada en el producto final.

En los demás puntos de consumo, es necesaria una moderada calidad de aire que no permita incrustaciones u óxidos en los actuadores.

- b) ¿Una deficiente calidad de aire comprimido reducirá mi productividad, y mis ahorros en costes?

Respuesta: Una calidad de aire deficiente disminuirá la vida útil de los actuadores, lo cual aumenta el costo del mantenimiento correctivo.

- c) ¿Qué condiciones ambientales internas y externas afectan a la calidad de aire comprimido producido por mi sistema?

Respuesta: En la planta existe presencia de partículas de caolín, el cual es añadido como carga mineral en el mástico de asfalto utilizado en los productos laminados de Chova del Ecuador S.A.

Tras responder estas preguntas y observar la tabla 3.5, se puede concluir que en el caso de Chova del Ecuador S.A., todos los puntos de consumo requieren una calidad de aire moderado de clase 2, excepto la inyectora de poliuretano, que vendría a ser de clase 1.

Tabla 3.5. Calidad de aire comprimido ISO 8573-1:2001

Calidad clase	SÓLIDOS			AGUA	ACEITE Y VAPOR DE ACEITE
	Número máximo de partículas por m ²			Punto de condensación de la presión	
	0,1-0,5 μ	0,5-1,0 μ	1,0-5 μ	°C	mg/m ³
0	Según especificaciones del usuario final o fabricante, y más estricta que la Clase 1				
1	100	1	0	-70	0,01
2	100.000	1.000	10	-40	0,1
3	N/A	10000	500	-20	1
4	N/A	N/A	1.000	3	5
5	N/A	N/A	20.000	7	N/A
6	N/A	N/A	N/A	10	N/A

Fuente: Elaboración propia, Ingersoll Rand Industrial Technologies. *Guía sobre la calidad del aire*, 2007

Por esta razón contemplaremos el uso de unidades de mantenimiento a la entrada de cada punto de consumo, y un filtro especial para el caso de la inyectora. Un diagrama del circuito neumático puede apreciarse en el capítulo 4.

Según el *Manual Sobre Aire Comprimido y su Aplicación a la Industria*, la inversión de un secador está muy bien compensada con las pérdidas ocasionadas por condensación en tuberías, por lo que se tomará esto en cuenta en la elección de la unidad compresora.

3.2. Selección del equipo de aire comprimido

Una vez que los requerimientos de aire, presión y calidad se han determinado, es posible escoger un compresor que los abastezca. Ya se han estudiado los tipos de compresores más comunes, de los cuales se elegirá la alternativa que mejor se adapte a dichas necesidades.

3.2.1 Consideraciones previas

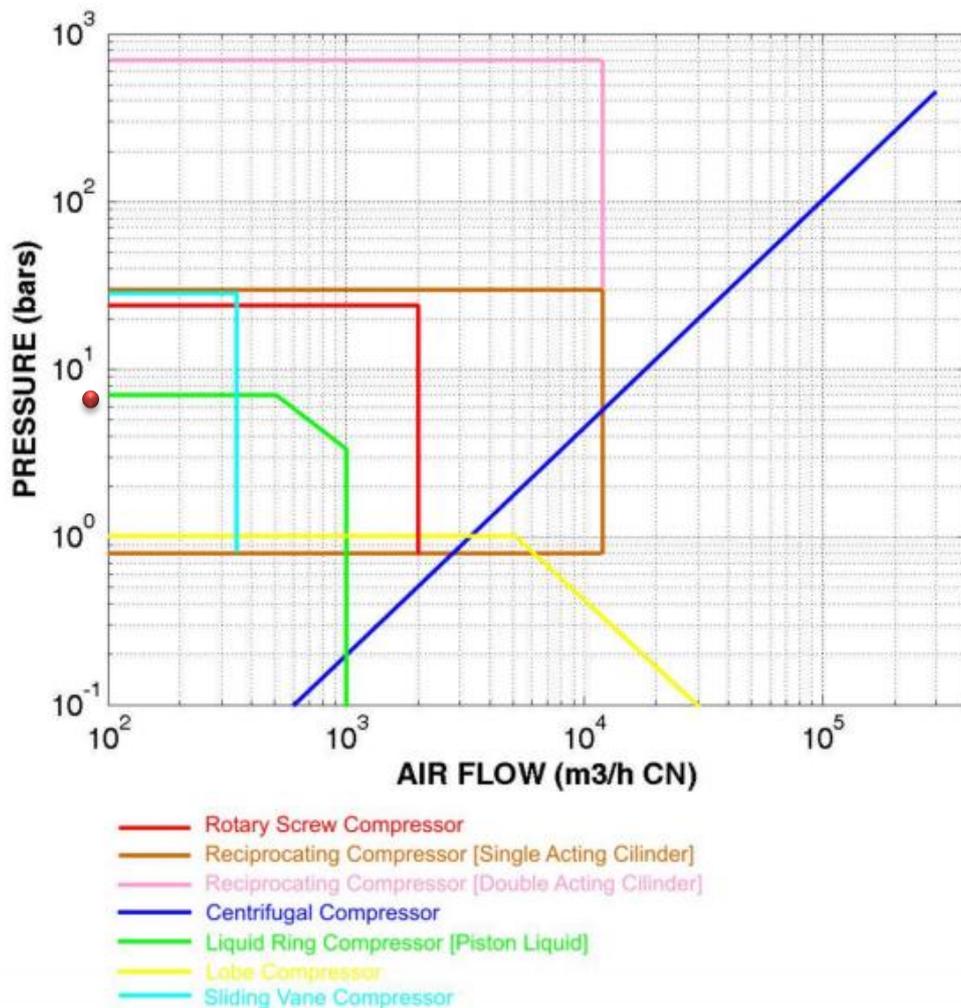
Cabe señalar que en la práctica no se va a encontrar un compresor que entregue exactamente el caudal de 80,1 CFM, por lo que se debe aproximar al

más cercano que se ajuste a las necesidades mencionadas. El primer paso es determinar el tipo de compresor a utilizar.

3.2.2 Selección del compresor

En el capítulo 2 se mencionaron los distintos tipos de compresores que existen para la aplicación del aire comprimido, sin embargo, cada uno de ellos obedece a un rango específico de presión y caudal. La figura 3.3 fija los límites de uso de los diversos tipos de compresores mencionados.

Figura 3.3. Rango de utilización de varios tipos de compresores



Fuente: *Circuitos Neumáticos. Cálculos Básicos.* Universidad de Oviedo.

Se ha indicado en la figura anterior el punto que satisface a las necesidades actuales. Los tipos de compresores más apropiados para este escenario son:

- a) Compresor de paletas
- b) Compresor de tornillo
- c) Compresor recíprocante

Para elegir la mejor alternativa, se utilizó una matriz de decisión, tomando en cuenta los factores más relevantes, como son el mantenimiento, la inversión inicial, la generación de ruido, espacio necesario, entre otros.

El puntaje corresponde a la siguiente clasificación:

1= Malo

3= Bueno

5=Excelente

Tabla 3.6. Matriz de decisión de tipo de compresor

Factores para matriz de decisión	Ponderación	Paletas		Tornillo		Recíprocante	
		Puntaje	Parcial	Puntaje	Parcial	Puntaje	Parcial
Mantenimiento	8	3	24	5	40	3	24
Inversión inicial	5	3	15	3	15	5	25
Generación de ruido	6	3	18	5	30	1	6
Continuidad de flujo	9	5	45	5	45	1	9
Eficiencia	10	5	50	3	30	3	30
Espacio necesario	7	3	21	5	35	3	21
Desgaste de partes	8	3	24	5	40	3	24
Total		197		235		139	

La mejor alternativa en nuestro caso, es un compresor de tornillo. Se analizaron dos propuestas comerciales, Atlas Copco e Ingersoll Rand, bajo los siguientes requerimientos y condiciones:

Tabla 3.7. Requerimientos del cliente

Datos del Cliente		
Caudal necesario	80,1	CFM
Presión de trabajo	6	bar

Analizando las características técnicas de ambos equipos, se realizó el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 3.8. Tabla comparativa de características técnicas de compresores de tornillo

Proveedor		Ingersoll Rand	Atlas Copco
Tipo de compresor		Tornillo	
Aceite en el aire		Sí	
Arrancador		Directo	Estrella triángulo
Postenfriador		Sí	
Secador		Sí	
Voltaje	V	230	
Ruido máx	dB	73	71
Presión max. descarga	psi	120	128
	bar	8,2	8,7
Potencia	HP	25	
	KW	18	
Caudal	cfm	102	101,1
% sobredimensionamiento		21,5	20,8
Trasmisión		Bandas	Directa

Se toma en cuenta a los factores de decisión operativa como el tipo de arrancador y trasmisión, ya que éstos influyen en la facilidad y frecuencia del mantenimiento del equipo.

Los factores económicos también constituyen criterios de decisión importantes. Es necesario considerar tanto los costos de instalación como los de operación en la selección de un compresor.

Dentro de los costos de instalación, o costos fijos, están contemplados:

- Precio del equipo
- Espacio requerido
- Peso
- Instalación sencilla

- Equipo eléctrico normalizado

Dentro de los costos de operación, o costos variables, se encuentran:

- Costo de la energía
- Costos de mantenimiento
- Costo de supervisión

Tomando en cuenta el régimen de trabajo esperado y el costo de la electricidad para plantas industriales cuyos valores se ilustran en la tabla 3.8, se llegaron a los resultados de la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Régimen de trabajo y costo de la electricidad

Parámetros a considerar		
Costo de la electricidad	0,0897	USD/KWh
Horas de trabajo diarias	14	horas
Días de trabajo anual	250	días
Consumo de aire anual	13.456.800	ft3/año

Tabla 3.10. Resultados obtenidos del análisis económico

Proveedor		Ingersoll Rand	Atlas Copco	Variabilidad
Precio	USD	\$ 22.662	\$ 20.228	12%
Espacio requerido	m2	1,56	0,87	78%
Peso	kg	660	470	40%
Consumo específico	KWh/m3	0,1298	0,1309	-1%
Costo capital invertido	USD	\$ 24.022	\$ 21.442	12%
Depreciación	USD	\$ 1.126	\$ 997	13%
Costo de energía anual	USD	\$ 4.438	\$ 4.477	-1%
Costo de mtto anual	USD	\$ 3.500	\$ 3.500	0%
Costo total anual	USD	\$ 9.064	\$ 8.974	1,0%

Ejemplo de cálculo⁵:

Se utilizarán los datos del compresor de Atlas Copco para ilustrar el procedimiento realizado.

⁵ Cálculo basado en el procedimiento del Manual Sobre Aire Comprimido y su Aplicación a la Industria, pp. 119-121.

Para deducir el costo del capital invertido consideramos que el costo total de adquisición es igual al precio de venta más el 6% por gastos administrativos:

$$CT = PVP + 6\% \text{ administración} \quad (3.4)$$

Por lo tanto,

$$CT = 20.228 \text{ USD} \times 1,06 = 21.442 \text{ USD}$$

Debido a la ausencia de desgaste entre los tornillos de este tipo de compresores, la vida útil se encuentra íntimamente relacionada a la vida de sus rodamientos y al mantenimiento dado al equipo. El promedio de vida útil máxima para este tipo de compresores es de aproximadamente 80.000 horas, lo cual dado el régimen de trabajo mencionado es cercano a 20 años.

Utilizando el método de depreciación de línea recta y considerando un valor de salvamento de 1500 dólares, la cuota de depreciación anual es:

$$PM = \frac{PV - VS}{\text{vida útil}} \quad (3.5)$$

Donde

PM= Pago anual

PV=Valor del equipo

VS= Valor de salvamento

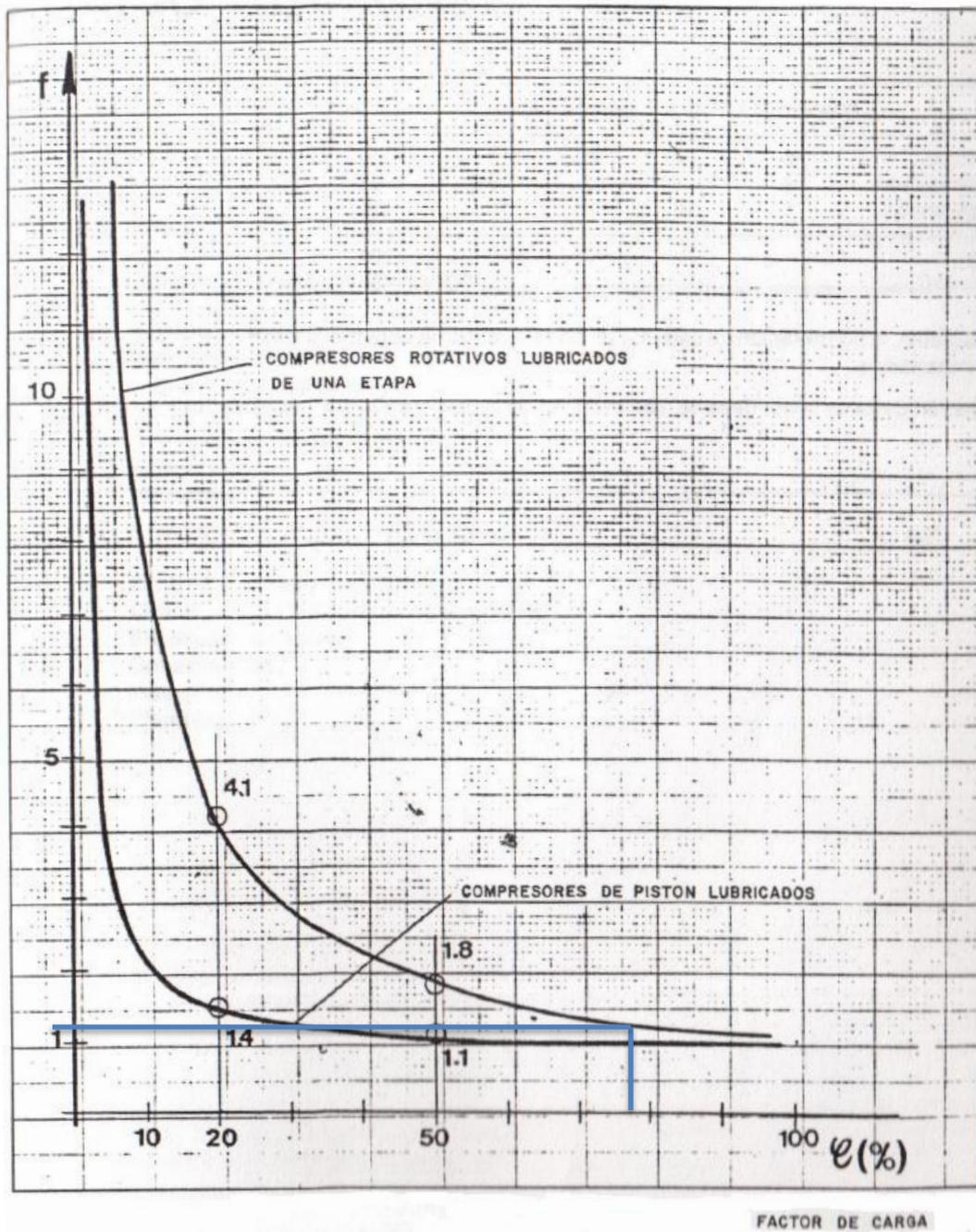
Reemplazando valores tenemos

$$PM = \frac{21.442 - 1.500}{20} = 997 \text{ USD}$$

Para determinar el costo de la energía, se estima que el compresor se encuentra en una carga parcial del 80%, considerando el porcentaje de

sobredimensionamiento calculado. Como se puede apreciar en la figura 3.4, los compresores de pistón son más eficientes que los de tornillo al trabajar a cargas parciales, por lo que para la selección de las alternativas que se comparan, se procuró que el sobredimensionamiento no exceda dicho valor.

Figura 3.4. Consumo específico a cargas parciales



Fuente: Atlas Copco. *Manual sobre Aire Comprimido y su Aplicación en la Industria.*

El consumo de potencia en carga parcial es igual al factor de carga por el consumo específico de potencia a plena carga:

$$P_{\phi spec} = f \times P_{spec} \quad (3.6)$$

La potencia es energía sobre unidad de tiempo, por lo que la ecuación en términos de consumo específico de energía obedece la misma relación.

Para una carga del 80%, el factor en la figura 3.4 para compresores rotativos lubricados de una etapa corresponde a un factor de 1,25. Con este factor se calcula el consumo específico de energía del equipo:

$$E_{\phi spec} = 1,25 \times \frac{18 \text{ KW}}{101,1 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{35,3 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} = 0,1309 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^3}$$

Por otra parte, tenemos que el consumo en volumen de aire anual es de 13.456.800 ft³/año, o bien, 381.212 m³/año. Esto también es tomando en cuenta la carga parcial del 80%.

El costo anual de la electricidad se calcula de la siguiente forma:

$$C_{E \text{ anual}} = Q_{\text{anual}} \times E_{\phi spec} \times CE \quad (3.7)$$

Donde

Q_{anual}= volumen entregado por año, en m³/año

E_{φspec}= Consumo específico de energía en KWh/m³

CE= Costo de la electricidad en USD/KWh

Siendo el costo de la electricidad 0,0897 USD/KWh, el costo de la energía anual es:

$$C_{E \text{ anual}} = 381.212 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \times 0,1309 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^3} \times 0,0897 \frac{\text{USD}}{\text{KWh}} = 4.477 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

El costo de mantenimiento es difícil de estimar, y no es constante, dado que pueden darse distintos tipos de mantenimiento a través de los años. Por esta razón, se asignará un valor de 3.500 USD promedio anual.

Tomando en cuenta todos estos factores económicos, se tiene que el costo total anual del compresor de Atlas Copco es:

$$CT = PM + C_E \text{ anual} + C_{mtto} \quad (3.8)$$

Por lo tanto,

$$CT = 997 + 4.477 + 3.500 = 8.974 \text{ USD}$$

Con este análisis técnico-económico, se realizó una matriz de decisión para escoger la mejor alternativa, ilustrada en la tabla 3.11.

El puntaje corresponde a la siguiente clasificación:

1= Malo

3= Bueno

5=Excelente

Tabla 3.11. Matriz de decisión para la selección del compresor

Factores para matriz de decisión	Ponderación	Ingersoll Rand		Atlas Copco	
		Puntaje	Parcial	Puntaje	Parcial
Tipo de arrancador	7	3	21	5	35
Aceite en el aire	6	3	18	3	18
Espacio y peso requerido	8	1	8	5	40
Costo del capital invertido	10	3	30	5	50
Servicio postventa	7	3	7	5	35
Trasmisión	7	3	21	5	21
Costo de energía	9	5	45	3	27
Costo de mantenimiento	5	3	15	3	15
Nivel de ruido	4	3	12	5	20
Sobredimensionamiento	7	3	21	5	35
Costo total anual	10	3	30	5	50
Total		200		298	

Se concluye que la alternativa más conveniente es el compresor Atlas Copco, cuya cotización se encuentra en el Anexo G1. La cotización de Ingersoll Rand se encuentra en el Anexo G2.

En el Anexo G3 se adjunta el artículo que la revista Atlas Copco Venezuela realizó sobre el caso de Chova del Ecuador S.A en su impresión N° 64/ 2012, como evidencia de la decisión tomada.

3.2.3 Selección del acumulador

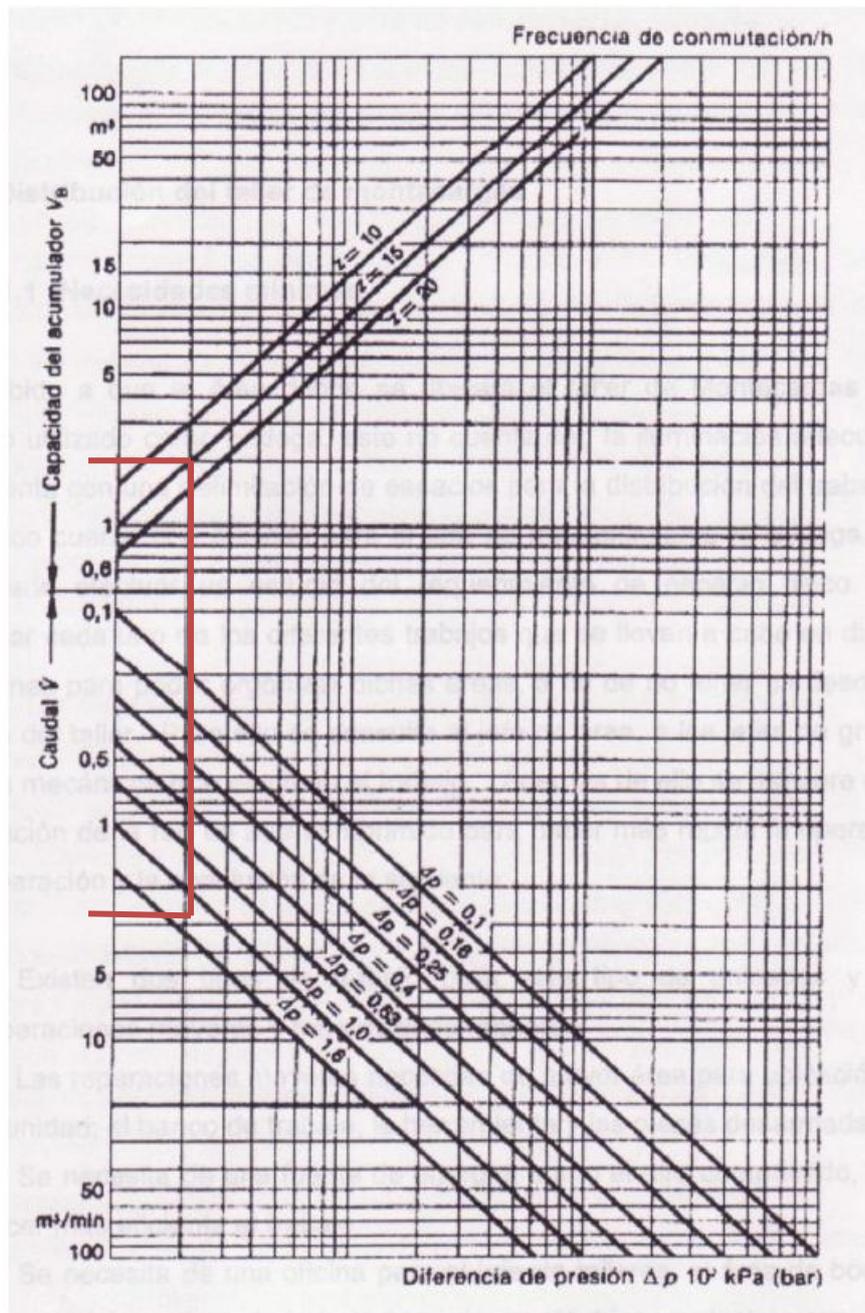
Como se expresó en el capítulo 2, la misión de un tanque de almacenamiento es amortiguar las pulsaciones provenientes de la generación de aire comprimido, y almacenar aire comprimido para hacer frente a picos de demanda.

Para obtener el tamaño del tanque de almacenamiento es necesario conocer el caudal de compresor, la diferencia de presión admisible dentro de la red y el tipo de regulación a utilizar:

- Caudal: 2,86 m³/min
- Frecuencia de acumulación: 20 arranques/ hora
- Diferencia de presión admisible: 1 bar

Una de las maneras más prácticas de obtener el volumen del depósito es utilizando la siguiente figura:

Figura 3.5. Diagrama de cálculo del depósito de aire



Fuente: *Conceptos Básicos de Neumática e Hidráulica. Sapiensman.*

Los datos obtenidos mediante la utilización de la gráfica anterior indican que el volumen del depósito de aire debe ser de 2 metros cúbicos, sin embargo hay que tomar en cuenta que se está implementando un compresor de tornillo en el que no existen pulsaciones.

Según el Manual Sobre Aire Comprimido y su Aplicación a la Industria, el volumen de aire contenido por la red principal puede ser sustraído del volumen calculado del tanque, ya que actúa como un depósito. También estipula que “*para compresores con presión de trabajo hasta 8,8 bar y condiciones normales de operación, la capacidad del depósito en unidades de volumen (...) será un décimo de la capacidad del compresor en las mismas unidades de volumen por minuto*” (p. 141), es decir, 0,286 m³.

Como se expresó en el capítulo 2, cuando la demanda de aire comprimido requiere grandes cantidades en períodos cortos de tiempo, un tanque de almacenamiento debe ser instalado por separado cerca del punto de consumo. En la planta de Chova del Ecuador S.A., el punto de consumo que cumple ésta condición de requerimiento intermitente en largos intervalos de tiempo, es la prensa neumática.

La capacidad de los 4 cilindros que deben llenarse para una carrera es de 32 litros durante 2 segundos. La diferencia entre la presión normal de trabajo en la línea y del punto de consumo se considera de 0,9 bar.

Sustituyendo valores en la ecuación 2.12, se tiene que:

$$V = \frac{q \times t}{p_1 - p_2} = \frac{16 \times 2}{0,9} = 35,56 \text{ l} = 0,03556 \text{ m}^3$$

No es un volumen significativo, sin embargo, se lo tomará en consideración junto a los 0,286 m³ ya establecidos.

3.3. Dimensionamiento de la red de tubería

Una vez determinados los consumos, el compresor a utilizar, la calidad del aire y el trazado de la tubería, es posible determinar las dimensiones de la red. A continuación se desarrollarán los antecedentes necesarios para el cálculo.

3.3.1 Consideraciones previas

Según lo estipulado en el capítulo 2, antes de determinar las dimensiones de la tubería es necesario saber cuáles son los niveles admisibles de caída de

presión en la red sobre los cuales se fija la presión de salida del compresor. A continuación véase dichos niveles:

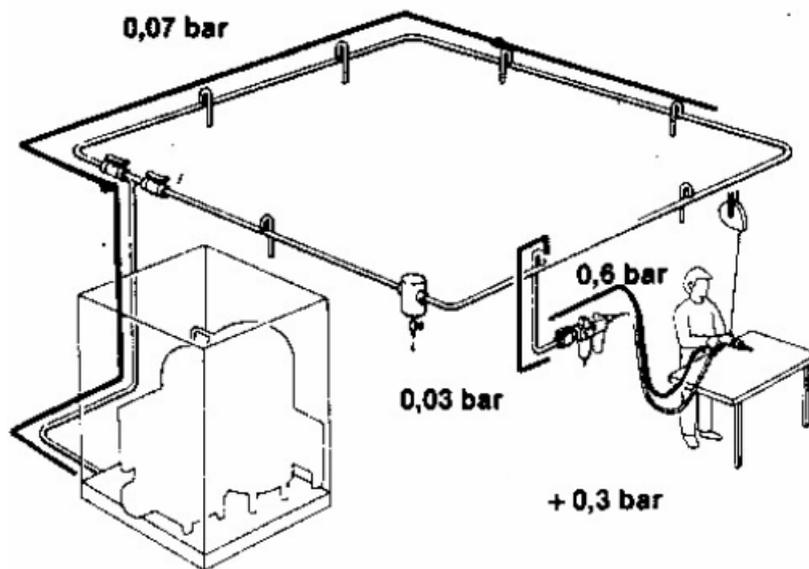
Tabla 3.12. Caída de presión admisible

Elemento	Δp (bar)
Accesorios de línea	0,6
Filtros	0,3
Línea principal	0,07
Línea de servicio	0,03
	1

Fuente: Elaboración propia, Atlas Copco. *Compressed Air Manual*. 7ma Edición, Bélgica, 2010.

Esto quiere decir, que si la presión de trabajo de los puntos de consumo es de 6 bar, la presión a la salida del compresor debe ser de 7 bar.

Figura 3.6. Gráfico de caída de presión admisible



Fuente: Atlas Copco. *Manual sobre Aire Comprimido y su Aplicación en la Industria*.

Se utilizará tubería de acero galvanizado para garantizar una larga vida útil aprovechando su alta resistencia a la corrosión y al desgaste. Se tomará en cuenta la pendiente de 1:200 en el sentido de circulación y la derivación superior de las líneas de servicio para asegurar que el condensado no se acumule causando daño en los puntos de consumo.

3.3.2 Configuración de la red de tubería

En el Anexo F se encuentra la propuesta de disposición de la red según los puntos de consumo. A pesar de que un sistema cerrado posea mayores ventajas desde el punto de vista de mantenimiento, la ubicación de los puntos de consumo no favorece esta configuración, evidentemente encareciendo el proyecto.

Para dar flexibilidad al mantenimiento de la línea de aire comprimido, se optó por seccionar la red en dos partes, Nave 4 (Construcción Liviana y Metales) y Nave 1 (Impermeabilización).

3.3.3 Selección de accesorios de línea

El propósito de los accesorios es mejorar tanto la calidad de aire comprimido entregado por el compresor como el funcionamiento de la línea. Dado que el compresor elegido ya incluye un pos enfriador, queda pendiente analizar el tipo de drenaje o trampa a utilizar para la purga del condensado, y las unidades de mantenimiento apropiadas.

Se prefiere utilizar válvulas o trampas de condensado del tipo automático, ya que esto incurre a un menor costo de operación del aire comprimido por no requerir supervisión para su funcionamiento, el cual consiste en revisar cada cierto tiempo donde existe el condensado, permitiendo que este sea desalojado.

Existen varios tipos de trampas de condensado (estas se utilizan tanto en aplicaciones de aire comprimido como de líneas de vapor):

Tabla 3.13. Grupos de trampas de vapor y principios de funcionamiento

Grupo de trampas	Principio de funcionamiento
Trampas mecánicas	Diferencia de densidad entre vapor o aire y condensado
Trampas termodinámicas	Diferencia de caudal de vapor o aire y caudal de condensado
Trampas termoestáticas	Diferencia de temperatura de vapor o aire y condensado

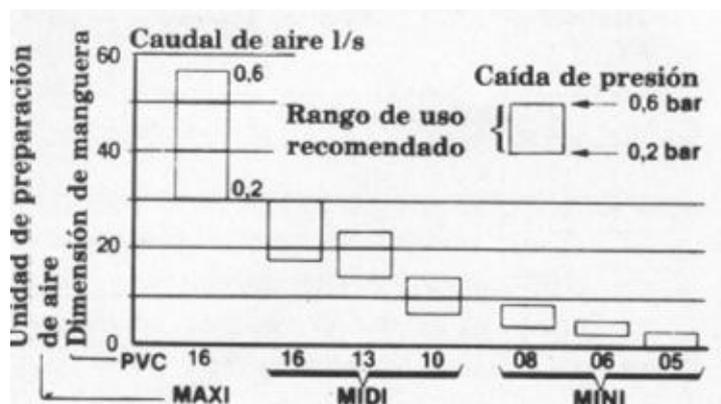
Fuente: Elaboración propia, Gonzalez Delfín, Jorge. *Trampas de vapor*. Universidad de Antofagasta.

Las más comúnmente utilizadas son aquellas del grupo mecánico, sin embargo son las menos recomendadas, dado que las fallas de este tipo de trampa no pueden ser detectadas con facilidad.

En este proyecto se utilizarán trampas del tipo termodinámicas, utilizadas ampliamente por su diseño compacto y gran durabilidad. La desventaja es que la descarga produce ruido, por lo que puede ser necesario un silenciador.

El siguiente paso es definir el tamaño recomendado de las unidades de mantenimiento, así como las mangueras. Según la Guía de Instalación de Atlas Copco, los rangos recomendados son los siguientes, según la caída de presión admisible:

Figura 3.7. Dimensionamiento FRL



Fuente: Atlas Copco. *Aire Comprimido; Guía de Instalación*. Atlas Copco Ecuatoriana. N° 5, 1986

El tamaño de la unidad de mantenimiento que satisface las condiciones de cada uno de los puntos de consumo considerados es MINI y el diámetro de la manguera que asegura una baja caída de presión es de 5/16".

Como ya se mencionó anteriormente, una unidad de mantenimiento está conformada por tres componentes colocados en serie: filtro, regulador y lubricador. El filtro puede poseer una purga de naturaleza manual o bien automática. La modalidad preferida en el proyecto es la automática, ya que la prevención de descuido del operador justifica el costo adicional del equipo.

La inyectora de poliuretanos utiliza el aire comprimido para presurizar los tanques de almacenamiento de isocianato y polioli. Ambos químicos, en especial el isocianato, deben ser aislados de cualquier partícula de agua o suciedad en manera estricta, dado que no sólo puede éste deteriorarse, sino que reacciona exotérmicamente con el agua, creando un potencial riesgo de seguridad industrial. Para reducir este riesgo, se considera incluir en la línea un filtro especial adicional, del tipo coalescente⁶, que ayuda a filtrar de mejor manera tanto aceite como agua residual del proceso de compresión.

⁶ El fenómeno de la coalescencia consiste en ir uniendo partículas o gotas de pequeño tamaño de aceite para formar gotas más gruesas con capacidad de ascender en un medio acuoso por diferencia de densidades.

3.3.4 Cálculo de la red de tubería

En toda instalación de aire comprimido, se prevé una futura ampliación de la demanda de aire, por cuyo motivo deben dimensionarse generosamente las tuberías, sin exceder el presupuesto (mientras mayor sea el diámetro de la tubería, las condiciones de trabajo del aire comprimido mejoran, sin embargo, el costo aumenta de la misma manera, por lo que es necesario llegar a un equilibrio). Los factores que influyen en el dimensionamiento del diámetro de tuberías son los siguientes:

- Caudal
- Longitud de tuberías
- Accesorios con su longitud equivalente
- Pérdida de presión admisible
- Presión de servicio

Ya se ha determinado el trazado de las líneas principales en la propuesta de diseño de red del Anexo F, lo cual nos ayuda a identificar todos los accesorios necesarios para su construcción. También es importante considerar en el trazado, la inclinación del 2% de las líneas para la eliminación del condensado.

Para determinar el diámetro de la línea principal, se toma el punto más lejano al compresor y se determina la longitud de la tubería sumando la longitud real con la longitud equivalente de cada uno de los accesorios que esta contiene. Una lista de longitudes equivalentes puede apreciarse en el Anexo B1.

Para determinar la longitud equivalente de los accesorios es necesario estimar un valor de diámetro interno, por lo que claramente se trata de un proceso iterativo, mientras la caída de presión de la red no exceda del 0.1 bar.

En el sistema propuesto, existen 2 ramificaciones de la tubería, las longitudes de cada una se indican en la tabla 3.14

Tabla 3.14. Longitudes de tubería

	Longitud	L (+ 2%)
Línea principal 1 (Nave 4)	72.68 m	74.13 m
Línea principal 2 (Nave 1)	77.08 m	78.62 m

La ramificación más larga, por ende en la que se va a basar el diseño, tiene 78.62 metros de longitud. Esta ramificación contiene los siguientes accesorios:

Tabla 3.15. Longitud equivalente de accesorios ramificación Nave 1

Accesorio	Ctd.	Longitud equivalente					
		1"		1 1/2"		2"	
		Unitario	Total	Unitario	Total	Unitario	Total
Codo 90°	5	0.76	3.80	1.32	6.60	1.71	8.55
Unión	11	0.03	0.33	0.05	0.55	0.06	0.66
Te (derivación)	2	3.60	7.20	4.60	9.20	5.00	10.00
Te (paso recto)	1	0.30	0.30	0.50	0.50	0.60	0.60
Válvula de esfera	1	0.26	0.26	0.44	0.44	0.55	0.55
LE Total		11.89		17.29		20.36	
LE Total + LReal		90.51		95.91		98.98	

En el capítulo 2 se mencionó que existen dos métodos principales para el cálculo del diámetro de la tubería: por fórmula y por nomograma. Se utilizarán ambos. El nomograma se muestra la figura 3.8.

Sabiendo que el caudal máximo en la línea es de 101.1 CFM (47.71 l/s) y que la presión de trabajo en la línea es de 102.9 psi (7 bar), utilizamos la fórmula 2.10:

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

En donde:

Δp = caída de presión (bar)

q_c = FAD o entrega de aire libre (l/s)

d = diámetro interno de la tubería (mm)

l = longitud de la tubería (m)

p = presión absoluta inicial (bar)

Tenemos que:

Tabla 3.16. Caída de presión por diferentes diámetros

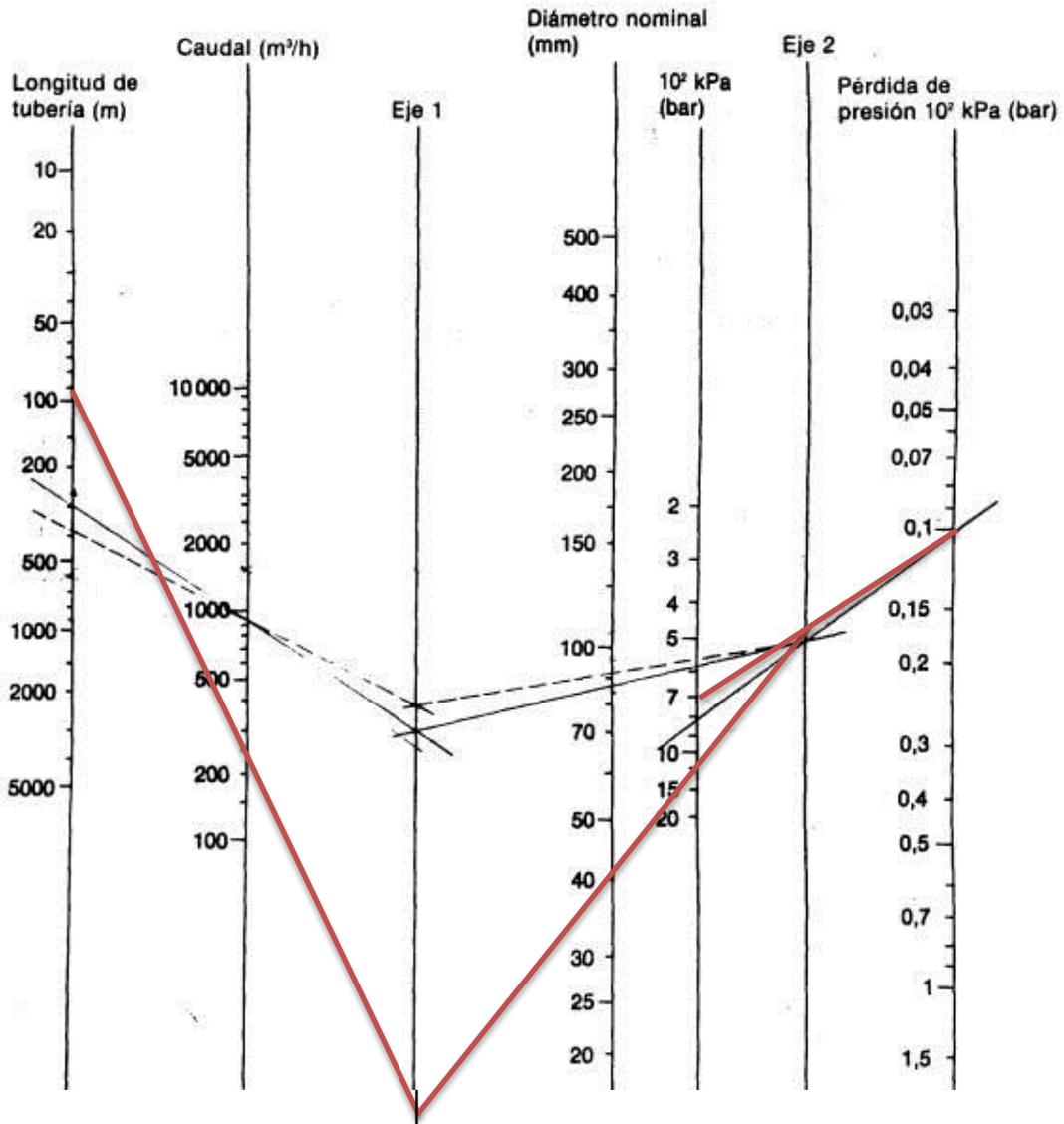
Caída de presión			
Diámetro	1"	1 1/2"	2"
Δp	0.70	0.10	0.02

Dado que un diámetro de 1 1/2" apenas satisface el requerimiento de máxima caída de presión, se escoge aquel de 2".

En el Anexo B3 podemos apreciar la captura de pantalla del programa de cálculo realizado para validar el diámetro de tubería a través de fórmula.

Ahora, utilizamos el nomograma para confirmar el cálculo.

Figura 3.8. Nomograma para diámetro de tuberías principales



Se une la línea de longitud de la tubería con la línea de caudal cruzando el eje 1. Después se une la línea de presión de trabajo y la de pérdidas admisibles. En el eje 2 se crea una intersección que luego debe unirse con la del eje 1.

El nomograma indica que el diámetro mínimo debe ser de 40 mm. Realizando el trazado de forma inversa, considerando ya un diámetro de 2", se confirma que la caída de presión es aceptable y dentro de la norma, estableciéndose en aproximadamente 0.02 bar, tal como lo indicó el cálculo por fórmula.

Siendo 2" el diámetro de la tubería, y el largo de la misma 152,75 metros, el volumen total contenido en el interior es de 0,31 m³. Se especificó una necesidad mínima de 0,286 m³ de almacenamiento. Tomando estos datos como base, se decide conservar un tanque de almacenamiento pequeño de 0,45 m³ de uno de los compresores antiguos para satisfacer el consumo intermitente de la prensa y salvaguardar requerimientos futuros.

El consumo de aire de los puntos de consumo determina la dimensión de las líneas de servicio. Como se dijo anteriormente en la tabla 3.12, la caída de presión no debe exceder 0.03 bar. La tabla 3.17 indica la mayor cantidad de aire recomendada para para una línea de servicio según el diámetro interior.

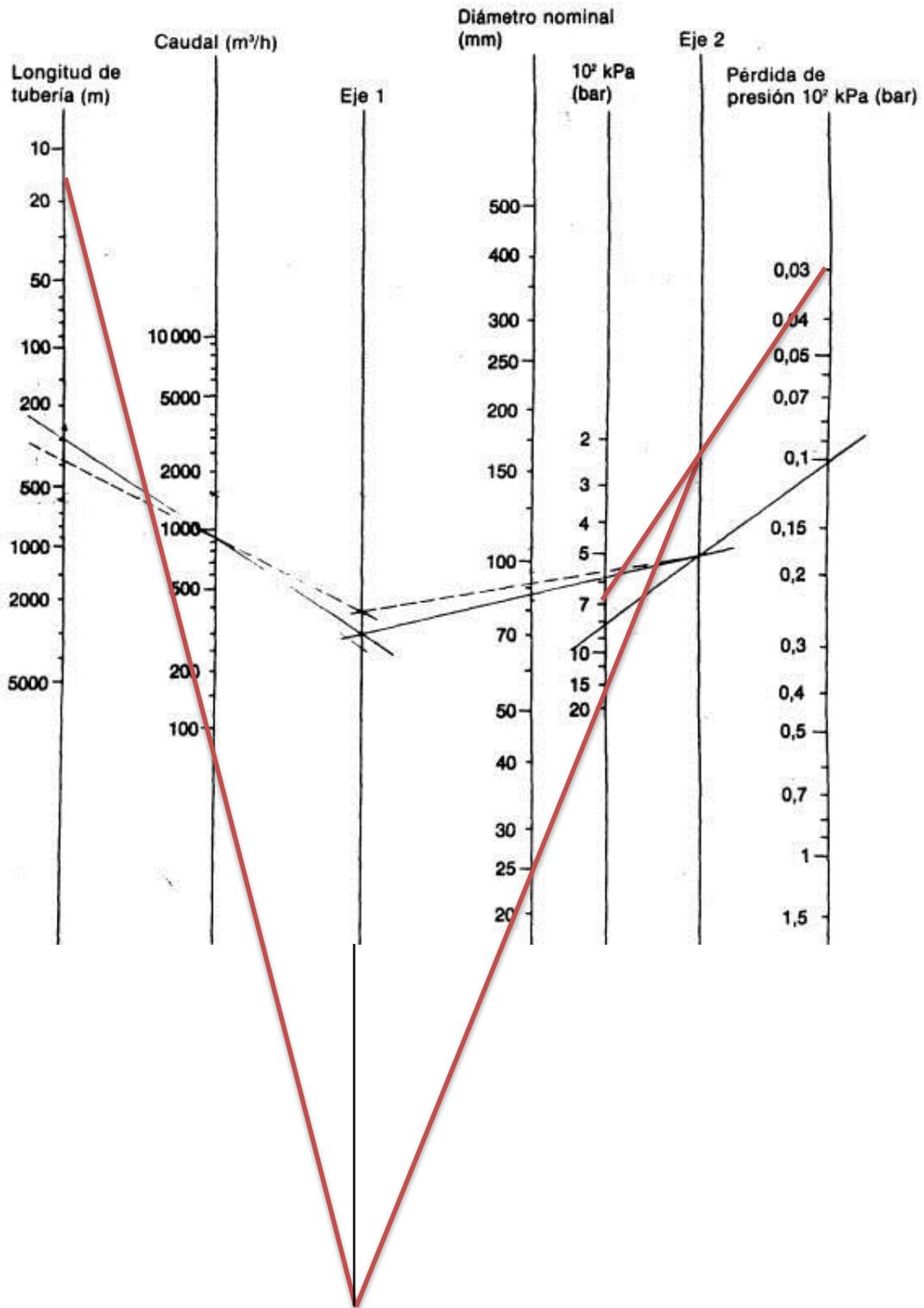
Tabla 3.17. Máxima cantidad de aire recomendada en líneas de servicio

MAXIMA CANTIDAD DE AIRE RECOMENDADA EN LA LINEA DE SERVICIO			
DIAMETRO MM.	MAX. CANTID. DE AIRE L/S		
	LONG. 1 M.	LONG. 5 M.	LONG. 10 M.
10	6,3	3,9	2,8
12,5	11,5	6,7	5,0
16	20	12,8	9,3
20	33	23	17
25	50	36	27
32	85	62	48
40	132	103	82
50	225	185	148

Fuente: Atlas Copco. *Aire Comprimido; Guía de Instalación*. Atlas Copco Ecuatoriana. N° 5, 1986

El punto de consumo con mayor flujo de aire es la prensa neumática, con 16 litros por segundo, y con una línea de servicio de 16.81 metros de longitud base. El diámetro correspondiente a una longitud de 10 metros y con un caudal tope mayor al calculado es de 20 mm, sin embargo, se escogerá el inmediato siguiente (1 pulgada) debido a esta diferencia de longitud. Esta decisión fue confirmada con el uso del nomograma, demostrando una caída de presión admisible considerando la longitud equivalente añadida por accesorios de diámetro interno de 1":

Figura 3.9. Nomograma para diámetro de tuberías secundarias



CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

4.1. Planos del sistema

Los planos del sistema de aire comprimido implementado se encuentran en su totalidad en el Anexo F.

4.2. Lista de materiales

La lista de todos los materiales utilizados, incluyendo los accesorios y pintura, se encuentra en el Anexo C. Esta lista se encuentra valorizada para reflejar la inversión realizada, la cual servirá de apoyo para el análisis económico y financiero del capítulo 5.

4.3. Ensamblaje

El diagrama de ensamblaje se encuentra en el Anexo F.

4.4. Verificación de funcionamiento

Para la verificación del funcionamiento del sistema se utilizó el formato que se indica en el Anexo E.1. En dicho formato se contemplan parámetros recomendados para probar la estabilidad de la red y existencia de fugas. En un principio sí se evidenció la presencia de fugas debido a la reciente instalación, mas éstas se arreglaron inmediatamente hasta que la hoja de verificación dio resultados satisfactorios, con los siguientes planes de contingencia:

- a) Verificar la presión de descarga del compresor
- b) Comprobar que los accesorios no tengan defectos y que las uniones se encuentren apropiadamente ajustadas.
- c) Verificar que los filtros no se encuentren obstruidos

4.5. Determinación de la eficiencia del sistema

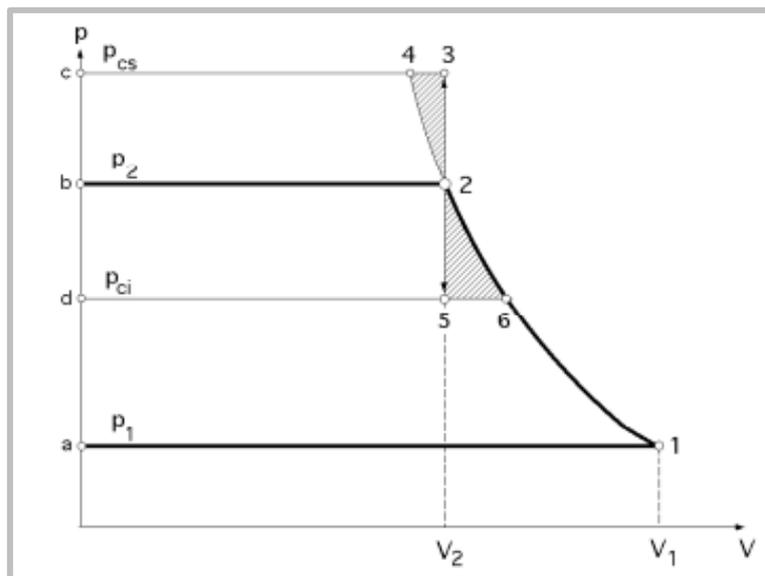
Los factores más importantes que afectan la eficiencia de los compresores son los siguientes:

- a) Mantenimiento del compresor: es necesario prestar atención particularmente al sistema de lubricación y al sistema de refrigeración, ya que mucha de la energía puede ser disipada en forma de calor.
- b) Calidad de entrada del aire: el aire que ingresa al compresor debe contener el menor número de partículas posible para asegurar la vida útil de sus partes móviles y de los filtros.
- c) Temperatura de entrada del aire: mientras más frío se encuentre el aire al ingreso de un compresor, el trabajo necesario para comprimirlo es menor. Por cada incremento de 4°C, la operación de un compresor aumenta un 1%.
- d) Carga del compresor: en general, todo compresor trabaja a su máxima eficiencia cuando se encuentre en plena carga, con un mínimo del 80% para compresores de tornillo (ver figura 3.4).

- e) Caídas de presión en el sistema, por mal estado de accesorios y puntos de consumo.

La eficiencia de compresión toma en cuenta aproximadamente las pérdidas de energía que se dan durante el proceso. En la figura 4.1 se indica el diagrama de ciclo de compresión para un compresor de tornillo. Las áreas sombreadas representan las pérdidas de energía que pueden ocurrir tanto por sobrepresión como por infrapresión:

Figura 4.1. Pérdidas energéticas de compresores de tornillo



Fuente: *Compresores Volumétricos*. Redsauce.

La superficie cubierta por el ciclo 1-2-b-a-1 representa el trabajo teórico consumido por el compresor. Si la presión de descarga es mayor a p_2 , el aire se acumula en la descarga por reflujos desde la lumbrera de escape resultando en un incremento de trabajo de compresión y una caída de eficiencia. Si la presión de descarga es menor a p_2 , el aire se expande en la tubería de descarga, donde también se incurre en un incremento de trabajo de compresión para compensar dicha caída.

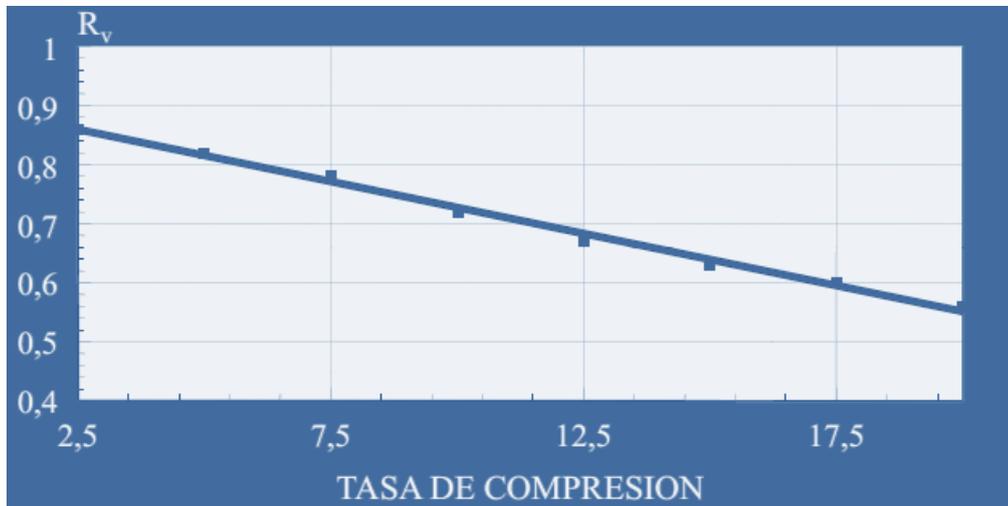
Existe un método simple, empírico y aproximado para el cálculo del rendimiento volumétrico, formulado por Cerepnalkovsky-Conan, cuya definición gráfica se indica en la figura 4.2.

La relación obedece a la siguiente fórmula:

$$Rv = 0.903 - 0.0176 t$$

(4.1)

Figura 4.2. Rendimiento volumétrico según Cerepnalkovsky-Conan



Fuente: Torrella, E. *Compresores de Tornillo*. Grupo de Ingeniería Térmica Universidad Jaume I

Tenemos una relación de compresión de 11, por lo tanto el rendimiento volumétrico será:

$$Rv = 0.903 - 0.0176 \times 11$$

$$Rv = 0.7094$$

$$Rv = 70.94\%$$

Se puede ver que el rendimiento volumétrico de un compresor de tornillo es alto y cercano a la unidad, lo cual representa una de las ventajas más importantes ante los compresores recíprocos. El uso de aceite inyectado como lubricante juega un papel importante en la eficiencia de compresión. Éste aumenta la potencial relación de compresión y mejora la eficiencia del sistema absorbiendo calores residuales y así reduciendo la temperatura de descarga del aire.

Para comparar la eficiencia del sistema nuevo con el antiguo, podemos utilizar el índice Cfm/Kw:

Tabla 4.1. Comparación de eficiencia entre sistemas antiguo y nuevo

	Sistema antiguo	Sistema nuevo
Potencia (HP)	22	25
Potencia (Kw)	16,39	18,625
CFM	11,11	42,39
CFM/KW	0,68	2,28
Variabilidad		236%

Por ende, podemos decir que el sistema nuevo es ligeramente el doble más eficiente que aquel utilizado anteriormente.

4.6. Procedimiento de operación

Los procedimientos estándar de operación, o SOP (Standard Operating Procedures) detallan los procesos de trabajo que se llevan a cabo de forma periódica y que se realizan dentro de una organización en un proceso específico.

El objetivo de un SOP es documentar el flujo de actividades que se deben seguir de forma sistemática para facilitar el cumplimiento de requisitos técnicos y servir de apoyo al Sistema de Gestión de la Calidad. Dentro de un SOP deben constar los siguientes puntos:

- a) Objetivo del procedimiento
- b) Aplicación o uso del procedimiento
- c) Áreas de responsabilidad para las tareas
- d) Áreas de responsabilidad para el control y aplicación del procedimiento
- e) Procedimiento

El SOP para la operación del compresor y el manejo de los componentes del sistema de aire comprimido se encuentra en el Anexo D.

4.7. Procedimiento de mantenimiento

El procedimiento de mantenimiento, así como el cuadro de causa.-efecto de las posibles fallas se encuentra en el Anexo E.2.

4.8. Evaluación de resultados

Para la evaluación de cualquier proyecto es necesario primero establecer los parámetros básicos sobre los cuales se va a calificar, los cuales deben ser consistentes con los objetivos planteados al principio del mismo.

El objetivo general fue: “Diseñar y construir un sistema de aire comprimido para la planta de Chova del Ecuador S.A. para satisfacer los consumos actuales y futuros facilitando su operación, en base a los principios de la neumática y la instrumentación” con los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la necesidad de aire comprimido de la maquinaria tomando en cuenta el crecimiento futuro de la planta.
- Evaluar y seleccionar el equipo de generación de aire comprimido.
- Analizar las distintas alternativas de disposición de redes neumáticas en base a la funcionalidad y costo del sistema.
- Dimensionar y diseñar el sistema de aire comprimido según el requerimiento habitual de aire comprimido de la planta.
- Construir en base al diseño escogido.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema de aire comprimido y determinar su eficiencia.
- Elaborar manuales de operación (SOP) y de mantenimiento.

Tomando esto en cuenta puede afirmarse que:

- El diseño fue realizado tomando en cuenta un 30% de futuro crecimiento en necesidades de aire comprimido, sin comprometer la eficiencia del compresor.
- Se compararon dos alternativas de distintos proveedores analizando tanto factores económicos como funcionales.

- Se analizaron alternativas de disposición de redes neumáticas tomando como mejor opción aquella que satisfacía los requerimientos de los puntos de consumo con el menor gasto en infraestructura y una mínima caída de presión.
- Se analizaron las necesidades neumáticas habituales de cada punto de consumo y se diseñó el sistema de aire comprimido en base a ello.
- Se levantaron los planos del sistema y se prosiguió a ejecutarlos en una construcción que tomó cerca de tres semanas.
- Se verificó el funcionamiento del sistema basándose en principios generales de evaluación y se determinó la eficiencia volumétrica de entrega del compresor.
- Se elaboró un manual de operación (SOP) y uno de mantenimiento, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

Con cada cumplimiento de un objetivo específico se ha llegado a cumplir el objetivo general planteado en su totalidad y con satisfacción para la empresa beneficiaria del proyecto, Chova del Ecuador S.A.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

5.1. Estudio financiero

Los costos asociados a la instalación del sistema de aire comprimido se basan principalmente en la inversión inicial, la cual abarca generalmente el costo del equipo, accesorios, tubería y mano de obra de instalación.

La ubicación de los anteriores compresores recíprocos será destinada para la instalación de una balanza de piso, la cual servirá de apoyo para la mejora del proceso de producción de revestimientos líquidos. Dado que el nuevo compresor se ubica en un sitio distinto, más apropiado para el fin que desempeña, se invirtió en la cimentación del mismo. Estos gastos serán incluidos en el análisis financiero y tomados en cuenta dentro de la inversión inicial como costos indirectos.

Los costos directos del proyecto son:

Tabla 5.1. Costos directos del proyecto

ITEM	Auspiciante	USD
COSTOS DIRECTOS		
Compresor Atlas Copco GA 18 125 FF	Chova del Ecuador S.A.	20,228.40
Libros y fuentes de información	Chova del Ecuador S.A.	80.00
Materiales de la red y accesorios ⁷	Chova del Ecuador S.A.	7,130.35
Mano de obra	Chova del Ecuador S.A.	3,036.00
SUBTOTAL		30,474.75

Los costos indirectos del proyecto son:

Tabla 5.2. Costos indirectos del proyecto

ITEM	Auspiciante	USD
COSTOS INDIRECTOS		
Cimentación del compresor e instalación eléctrica	Chova del Ecuador S.A.	800
Transporte	Aporte propio del estudiante	120
Alimentación	Chova del Ecuador S.A.	600
Otros (papel, impresiones, internet, suministros etc)	Chova del Ecuador S.A.	120
SUBTOTAL		1,640

En total, la inversión de este proyecto es de **USD 32,114.75**, siendo éste presupuestado en un inicio para un valor de **USD 51,320**.

5.2. Estudio económico

Para determinar el costo-beneficio del proyecto y justificarlo económicamente, es necesario comparar los ingresos y los egresos anuales tomando en cuenta la inversión inicial realizada. La particularidad de este proyecto es que el nuevo sistema de aire comprimido abastece a más maquinaria

⁷ Ver Anexo C para observar lista detallada

que el sistema anterior, por lo que el análisis debe hacerse por unidad de caudal entregado y a presión constante.

Las diferencias que influyen económicamente entre el sistema antiguo y el nuevo son:

- Caudal entregado estimado anual
- Eficiencia de compresión

En lo que concierne el análisis económico, se consideran iguales a los costos de mantenimiento dado que mientras un compresor reciprocante contiene más partes móviles y sujetas a desgaste, no requiere de mano de obra especializada como en el caso de los compresores de tornillo, por lo tanto es justo aproximarlos como iguales para este fin.

Los costos de la energía y mantenimiento fueron obtenidos del cálculo previo a la selección del compresor para el caso del compresor de tornillo. Para el caso del sistema reciprocante se utilizó la misma metodología tomando en cuenta la disminución de caudal entregado y el factor de eficiencia. La vida útil del activo es de 20 años por lo que el desglose se realiza para este plazo. A continuación se aprecia dicho análisis en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Análisis económico del proyecto

FLUJO ECONÓMICO									
Años	INGRESOS (USD/ 1000 Pie ³)				EGRESOS (USD/ 1000 Pie ³)				FLUJO ECONÓMICO
	Mantenimiento sistema antiguo	Energía Eléctrica sist. antiguo	Valor de salvamento	TOTAL INGRESOS	Mantenimiento nuevo sistema	Energía Eléctrica sist. Nuevo	Costo total del nuevo sistema	TOTAL EGRESOS	
A	B	C	D	E=B+C+D	F	G	H	I=-F-G-H	J=E+I
0			0,43	0,43			2,39	-2,39	-1,96
1	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
2	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
3	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
4	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
5	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
6	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
7	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
8	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
9	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
10	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
11	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
12	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
13	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
14	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
15	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
16	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
17	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
18	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
19	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67
20	0,99	0,27		1,26	0,26	0,33	0	-0,59	0,67

Presión= cte

A la misma presión, el total de entrega de pies cúbicos por año del nuevo sistema es aproximadamente el triple de lo que consume el sistema antiguo. Los rubros de mantenimiento y requerimiento de energía eléctrica (expresados en el capítulo 3) se encuentran divididos para dicha entrega volumétrica neta. De esta manera, se obtienen valores unitarios de ingresos y egresos por pie cúbico entregado a presión constante.

Para el plazo de 20 años, el valor actual neto tanto de ingreso como de egreso y total se representa en la tabla 5.4., así como la tasa interna de retorno.

Tabla 5.4. Análisis beneficio-costo

VAN IN	9,83
VAN EGRE	6,82
VAN	3,01
TIR	34%
RELACIÓN B/C	1,44

Mediante este análisis podemos ver que la relación beneficio/ costo resultante, que se obtiene de la relación entre el VAN de ingreso y el VAN de egresos, es mayor a uno, lo cual indica que el proyecto es rentable.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se logró diseñar e implementar un sistema de aire comprimido de mayor eficiencia y menor costo de funcionamiento de acuerdo con el objetivo institucional de Chova del Ecuador S.A., de ser identificada como una empresa que innova y mejora continuamente sus procesos y productos.
- Se logró aportar a la continuidad de producción de la empresa, no sólo ofreciendo un sistema de aire comprimido más eficiente, sino ofreciendo la oportunidad de crecimiento y expansión a nuevas líneas productivas.
- La verificación del funcionamiento del sistema presentó resultados aceptables, y se provee la metodología para asegurar dicho funcionamiento a largo plazo utilizando el manual de operación y mantenimiento, los cuales se incluirán dentro del Sistema de Calidad de la empresa auspiciante.

- Se logró implementar un sistema con elementos de alta calidad logrando mantener un presupuesto 60% menor que el calculado al inicio del proyecto, satisfaciendo totalmente el objetivo del mismo y permitiendo un crecimiento futuro según la norma.
- El proyecto demostró ser rentable por tener una alta tasa interna de retorno del 34%, y una relación beneficio/ costo de 1,44.
- El nuevo sistema es 2,36 veces más eficiente en términos de volumen de aire entregado por unidad de potencia.
- La realización de este proyecto aportó a mantener vigente al Sistema de Calidad de Chova del Ecuador S.A. estableciendo procedimientos claros y permitiendo el desarrollo de la nueva línea de producto IMPTEK Panel.

6.2. Recomendaciones

- La generación de aire comprimido es un proceso que potencialmente puede consumir una gran parte de la energía eléctrica si no se da un buen mantenimiento y supervisión de fugas, por lo que se recomienda colocar la debida atención de manera regular.
- Generalmente, y específicamente para este proyecto, es importante respetar las recomendaciones del fabricante para toda maquinaria e instrumentación implementada, ya que esto garantiza la vida útil del sistema.
- Se recomienda dimensionar un sistema de aire comprimido siempre observando el tipo de industria en el que se está implementando el proyecto, especialmente para la selección de materiales de tubería y mangueras, ya que tanto la duración de los mismos como la calidad del producto final pueden ser afectados.
- Es importante procurar no sobredimensionar el sistema, ya que en el caso de los compresores de tornillo, mientras más tiempo estén operativos, mejor es la capacidad de entrega, eficiencia y vida útil.

- Se recomienda diseñar la línea de distribución de manera que tome el mínimo número de desviaciones o cambios de dirección, ya que eso aporta a la pérdida de carga del sistema.
- Es recomendable, en el caso de remplazar un nuevo sistema de aire comprimido por uno obsoleto, reutilizar solamente aquellos elementos neumáticos que se encuentren en buen estado de manera que se ahorre costos.
- Las trampas de condensado deben situarse preferentemente en un lugar no transitado por personas, ya que emiten un sonido intermitente no agradable.

REFERENCIAS

Bibliográficas

Albornoz Vida. Cristián, A. y Bustos Verdugo Rodrigo A. (2007). *Diseño de una red de aire comprimido para el nuevo edificio del Instituto Profesional Virginio Gómez*. Universidad del Bio-Bio.

Atlas Copco. (1986). *Aire Comprimido; Guía de Instalación*. Atlas Copco Ecuatoriana. N° 5.

Atlas Copco. (2010). *Compressed Air Manual*. 7ma Edición, Bélgica.

Atlas Copco. (s. f.). *Manual sobre Aire Comprimido y su Aplicación en la Industria*.

Bueno, Antonio. Recuperado de http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_neumatica/neumatica_indice.html

Circuitos Neumáticos. Cálculos Básicos. (s. f.). Universidad de Oviedo.

Compresores Volumétricos. (s. f.). Recuperado de <http://libros.redsauce.net/>

Conceptos Básicos de Neumática e Hidráulica. (s. f.). Recuperado de <http://www.sapiensman.com/neumatica/>.

Creus Solé, Antonio. (2007). *Neumática e hidráulica*. Alfaomega, México.

Gonzalez Delfín, Jorge. (s. f.). *Trampas de vapor*. Universidad de Antofagasta.

Guillén Salvador, Antonio. (1999). *Introducción a la neumática*. Alfaomega, Colombia

- Hernández Hernández, Irene. (s. f.). *¿Cómo hacer procedimientos estándar de operación?*
- Ingersoll Rand Industrial Technologies. (2007). *Guía sobre la calidad del aire.*
- Linares, Omar y Widman, Richard. (s. f.). *Compresores- Su Funcionamiento y Mantenimiento.*
- Majumdar, S.R. (1997). *Sistemas Neumáticos: principios y mantenimiento.* McGraw-Hill, México.
- Millán Teja, Salvador. (s. f.). *Automatización Neumática y Electroneumática.* Alfaomega Marcombo.
- Norma ISO 8573 (2001).
- Sotomayor M., Ramiro. *Empresa.* (s. f.). Recuperado de <http://www.chovadelecuador.com/empresas.html> Internet.
- Tecnun. (s. f.). *Cálculos en instalaciones neumáticas.* Laboratorio de Neumática y Oleohidráulica.
- Tiravanti, Eduardo. (s. f.). *Eficiencia en los Sistemas de Bombeo y de Aire Comprimido.*
- Torrella, E. (s. f.). *Compresores de Tornillo.* Grupo de Ingeniería Térmica Universidad Jaime I
- Torres García, Laureano. (2006). *Propuesta de una red de aire comprimido para los laboratorios de la escuela de ingeniería mecánica en el edificio T-7.* Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Universidad de Oviedo. (2006). Área de Mecánica de Fluidos. *Instalación de Aire comprimido.* Curso 2005-2006,