

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE  
COMPRIMIDO DE LA UNIDAD DE FIBRAS, EN CMPC PULP  
PLANTA LAJA**

Informe de Habilitación Profesional  
presentado en conformidad a los requisitos  
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
**Sr. Reinaldo Sánchez Arriagada**

**VÍCTOR IGNACIO TORRES MIRANDA**

CONCEPCIÓN-CHILE

2020

## Resumen

Una evaluación y actualización de la red de aire comprimido del área de fibra y energía de la empresa CMPC Pulp Planta Laja, se desarrolló en el marco de la presente habilitación profesional. El estudio además consideró, propuestas que permitirán algunas mejoras en el funcionamiento y rendimiento de la red.

Parte del análisis se realizó a partir de un levantamiento, para poder determinar el nivel de consumo por área y problemas operacionales de la red actual. En paralelo, a través de la información proporcionada por el departamento de ingeniería y lo visualizado en terreno, se obtuvieron los resultados de las pérdidas de presión que afectaban las líneas de la red de aire comprimido. Mientras que, los datos provenientes de los compresores, fueron entregados por la empresa ATLAS COPCO, los cuales fueron utilizados para determinar la capacidad instalada actualmente.

Los resultados obtenidos sirvieron de base para adquirir el conocimiento necesario de la situación actual del sistema, logrando con ello el planteamiento de recomendaciones para mejorar la red. Entre las que destacan: el rediseño de un área con un circuito cerrado, seleccionando accesorios, equipos, material y dimensionamiento, para así asegurar la uniformidad del flujo de aire y evitar la presencia de impurezas y condensado, en conjunto con la instalación de un nuevo compresor de reemplazo por uno que presentaba fallas de manera recurrente y que había completado su vida útil.

Finalmente, se integró al proyecto un estudio de costos asociado a la compra del nuevo compresor, permitiendo respaldar la inversión e identificar los beneficios que éste presentará en términos de ahorro energético y continuidad de operación de la planta.

## **Agradecimientos y/o dedicatoria**

Primero le doy gracias a mis padres Marisol Miranda y Víctor Torres por los valores que me han inculcado procurando siempre mi bienestar, y que sin el esfuerzo realizado por ellos, mis estudios no hubiesen sido posibles.

A mi pareja Sarady por su cariño, amistad y el apoyo que me brindó durante toda mi etapa universitaria. De igual manera agradezco la compañía de cada uno de mis amigos que estuvieron presente en cada año de formación.

Agradezco a CMPC Pulp Planta Laja por la oportunidad que me otorgó de realizar mi memoria de titulación, en particular a Ramón Morales Jefe de Unidad de Fibra y Energía y en general a los jefes del área por su buena disposición y ayuda.

Agradezco a mi profesor guía don Reinaldo Sánchez Arriagada quien colaboro con el desarrollo y corrección de mi trabajo de titulación.

## Tabla de contenido

Resumen .....	ii
Agradecimientos y/o dedicatoria .....	iii
Lista de figuras .....	vii
Lista de tablas .....	viii
Glosario .....	ix
Capítulo I: “Antecedentes Generales” .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Planteamiento del problema .....	3
1.4 Metodología de trabajo.....	4
1.4.1 Introducción al tema .....	4
1.4.2 Descripción de la situación actual .....	4
1.4.3 Conocer la red actual .....	4
1.4.4 Diagnóstico de la situación actual .....	5
1.4.5 Solución al problema.....	5
Capitulo II: “Proceso productivo” .....	6
2.1 Descripción general de la empresa .....	6
2.2 Breve Reseña histórica de CMPC Pulp SpA Planta Laja.....	7
2.3 Etapas del proceso productivo de la Celulosa .....	8
2.4 Etapas del proceso productivo de la celulosa. ....	9
2.4.1 Fase Preparación de la madera .....	9
2.4.2 Fase Cocción, lavado y deslignificación .....	10
2.4.3 Fase Blanqueo .....	10
2.4.4 Fase Recuperación y Energía .....	11
Capitulo III: “Marco Teórico” .....	12

3.1 El aire comprimido .....	12
3.2 Conceptos básicos del aire comprimido .....	12
3.2.1 Presión .....	13
3.2.2 Caudal .....	14
3.2.3 Compresión de los gases .....	14
3.2.4 Pérdida de presión .....	16
3.3 Generación del aire comprimido .....	16
3.4 Calidad del aire .....	16
3.5 Componentes de un sistema de aire comprimido .....	17
3.5.1 Compresor .....	17
3.5.2 Refrigeración .....	21
3.5.3 Almacenamiento .....	21
3.5.4 Dispositivos para tratamiento del aire .....	22
3.6 Distribución de aire comprimido .....	28
3.7 Distribución de las redes de aire comprimido .....	29
3.7.1 Red de aire abierta .....	29
3.7.2 Red de aire cerrada .....	30
3.7.3 Red de aire mixto .....	30
3.8 Pérdida de carga .....	31
Capítulo IV: “Situación Actual” .....	34
4.1 Equipos consumidores de aire en área de Fibra .....	34
4.2 Compresores en Planta .....	35
4.3 Demanda de aire existente .....	38
4.4 Caídas de presión .....	41
4.5 Cálculo de condensado .....	46
Capítulo V: “Diagnóstico y Propuestas” .....	49

5.1 Nuevo compresor para reemplazo de compresor 1 .....	49
5.2 Configuración de la nueva red.....	55
5.3 Componentes de la nueva red de aire .....	58
5.4 Levantamiento .....	62
Capítulo VI: “Evaluación de costos” .....	65
6.1.3 Payback.....	65
6.2. Pérdidas por falla y mantenimiento .....	65
6.3. Beneficio por ahorro .....	66
6.4 Detalles de inversión .....	67
6.5 Resultados del estudio económico.....	68
Capítulo VII: “Conclusiones” .....	69
Capítulo VIII: “Bibliografía” .....	71
Capítulo IX: “Anexos” .....	74
Anexo A. Carta Gantt proyecto de montaje del compresor nuevo y su circuito de cañería.....	74
Anexo B. Cotización realizada para el nuevo compresor de CMPC Planta Laja.....	75
Anexo C. Detalle de costos asociados al compresor N° 7.....	76
Anexo D. Diagramas software EES. ....	79
Anexo E. Imágenes Sala de compresores.....	80
Anexo F. Caudal de válvulas.....	81
Anexo G. Nueva disposición en sala de compresores.....	82
Anexo H. Detenciones debido a fallas.....	83

## Lista de figuras

Figura 1. Imagen satelital de CMPC Pulp Planta Laja.....	8
Figura 2. Diagrama general de producción de celulosa .....	9
Figura 3. Equipos que componen un sistema neumático. ....	17
Figura 4. Esquema de la clasificación de los compresores. ....	19
Figura 5. Imagen ilustrativa de Secador Atlas Copco MID 600 .....	25
Figura 6. Actuador Rotativo.....	27
Figura 7. .Actuador Lineal. ....	27
Figura 8. Esquema de los tipos de tuberías presentes en una instalación de aire comprimido .....	28
Figura 9. Esquema de una red de aire comprimido abierta. ....	29
Figura 10. Esquema de una red cerrada de aire comprimido .....	30
Figura 11. Esquema de una red de aire mixto. ....	31
Figura 12. Longitud equivalente de accesorios.tubería en metros. ....	33
Figura 13. Circuito en sala de compresores. ....	37
Figura 14. Esquema simplificado de la red de aire comprimido.....	43
Figura 15. Conjunto actuador.....	48
Figura 16. Sistema de filtrado y purgadores .....	48
Figura 17. Disposición de filtros en compresor GA315.....	51
Figura 18. Compresor ZR315 VSD.....	52
Figura 19. Principio de funcionamiento del ZR 315.....	52
Figura 20. Ubicación compresor ZR315.....	53
Figura 21. Secador de aire integrado.....	53
Figura 22. Nueva disposición de red .....	55
Figura 23. Purga Eco Drain.....	59
Figura 24. Cálculo de cuello de ganso .....	60
Figura 25. Toma de aire cuello de ganso. Fuente: Instituto Jovellanos .....	60
Figura 26. Cuello de ganso en sala de compresores.....	80
Figura 27. Filtros en sala de compresores .....	80
Figura 28. Aire de instrumento .....	80

## Lista de tablas

Tabla 1. Producción industrial de celulosa CMPC. ....	7
Tabla 2. Valores admisible de pérdida de carga en líneas de aire comprimido. ....	32
Tabla 3. Especificaciones técnicas de los compresores n°1, 2, 3, 4 y 5 presentes en Planta Laja. ....	35
Tabla 4. Especificaciones técnicas del compresor n°6 presente en CMPC Planta Laja. ....	36
Tabla 5. Generación de aire comprimido CMPC Pulp Planta Laja. ....	36
Tabla 6. Datos cilindros de simple y doble efecto. ....	39
Tabla 7. Consumo de aire comprimido actual en el área de fibra. ....	40
Tabla 8. Consumo de aire en el área de fibra. ....	40
Tabla 9. Caudal requerido en el área de fibras. ....	41
Tabla 10. Resumen análisis de caídas de presión. ....	42
Tabla 11. Longitud equivalente de accesorios red actual. ....	44
Tabla 12. Resultados Software EES. ....	46
Tabla 13. Clases y concentraciones totales de aceite en mg/m <sup>3</sup> de acuerdo a norma ISO 8573-1. ...	50
Tabla 14. Pérdidas de carga generadas por los filtros del compresor GA315. ....	51
Tabla 15. Resumen de los datos de la nueva sala de compresores. ....	54
Tabla 16. Análisis de la nueva disposición de red. ....	56
Tabla 17. Clasificación de materiales y designación de colores. ....	64
Tabla 18. Pérdida por falla y mantenimiento. ....	66
Tabla 19. Beneficio por ahorro. ....	67
Tabla 20. Detalles de inversión. ....	68
Tabla 21. Resultados criterios económicos. ....	68
Tabla 22. Caudal de válvulas según actuador. ....	81
Tabla 23. Detenciones debido a fallas. ....	83



## Glosario

**CFM (Cubic Feet per minute):** Es una unidad de medida anglosajona, que mide el caudal o flujo de un gas o líquido, indicando el volumen en pies cúbicos, que pasa por una sección determinada, en la unidad de tiempo.

**ADt (Air Dry ton):** Es equivalente a 1 tonelada métrica de celulosa que contiene como máximo un 10% de humedad.

**KPI (key performance indicator):** conocido también como indicador clave, medidor de desempeño o de rendimiento de un proceso.

**VSD (accionamiento de velocidad variable):** El principio de VSD es para ajustar la velocidad de rotación del motor de forma automática de acuerdo con la demanda real de aire.

**FAD (Free Air Delivery):** el caudal FAD, es una forma de medir el caudal de aire de un compresor en condiciones de aspiración

## **Capítulo I: “Antecedentes Generales”**

### **1.1 Introducción**

Las instalaciones de aire comprimido, son montajes básicos que están presentes en prácticamente la totalidad de los establecimientos, sin embargo, fue a mediados del siglo XX d.C. cuando se comenzaron a utilizar a nivel industrial. La utilización de éstos, se ha ido mejorando producto de los continuos avances tecnológicos, llegando a ser primordial en los procesos productivos actuales, debido a la alta gama en equipos, maquinaria y herramientas que pueden ser accionados con aire comprimido. Es por esta razón que la empresa CMPC Pulp Planta Laja ha tomado como idea la optimización de sus procesos, apuntando hacia el ahorro energético.

El estudio de optimización del sistema de aire comprimido, brinda la oportunidad de establecer los factores que lo afectan, para luego especificar utilizando los criterios adecuados, las alternativas o posibles soluciones para la optimización del mismo.

En el desarrollo de esta habilitación profesional se darán a conocer los elementos que se utilizan para la producción de aire comprimido, criterios de mantenimientos para prolongar la vida útil del sistema y los requisitos que necesita una red de distribución para tener un óptimo funcionamiento. Asimismo, es importante conocer de qué forma un sistema neumático puede llegar a funcionar de manera eficiente, y las formas de poder minimizar eventuales fugas de aire comprimido.

Al no tener una red de aire comprimido funcionando a plenitud, ésta puede atrasar la operación de la planta y equipos que componen el área de fibras. Teniendo en cuenta las necesidades de dicha área, se presenta a continuación la propuesta para la mejora de la red existente, presentando los resultados de los estudios realizados, todos estos con el fin de entregar una red adecuada para satisfacer las crecientes necesidades de la empresa.

## **1.2. Objetivos**

### **a. Objetivo General:**

- ◆ Analizar, evaluar y actualizar el estado en el que se encuentra la red de aire comprimido de la unidad de fibras en CMPC Pulp SpA Planta Laja, además de realizar propuestas que ayuden a mejorar su rendimiento.

### **b. Objetivos Específicos:**

- ◆ Realizar el levantamiento mecánico de la red de aire comprimido del área de fibras y analizar el modo de funcionamiento de ésta.
- ◆ Analizar y representar gráficamente las características principales de la instalación de aire comprimido: potencia consumida por los compresores, caudal y presión de la línea.
- ◆ Realizar estudio de la demanda y del ahorro de energía presente en el sistema de aire comprimido de la instalación.
- ◆ Evaluar costos y proponer mejoras en la red de aire comprimido existente.

### **1.3. Planteamiento del problema**

En una economía globalizada como la que existe actualmente en el mundo, todas las empresas están en la búsqueda de poder reducir sus costos. Hoy en día, las industrias de fabricación y producción tienen la posibilidad de aminorar costos, a través de la reducción de personal, o mediante la subcontratación de algunos procesos poco eficientes.

Tomando en consideración las grandes fábricas y centros de producción, la mayoría de estos procesos se realizan y controlan de forma neumática. Es en este contexto, que los sistemas de aire comprimido son utilizados en la mayoría de las industrias, ya que ayudan a mejorar la productividad, automatizando y estimulando la producción.

Es por lo descrito anteriormente, que se busca el correcto funcionamiento de una fábrica con esta magnitud y de tan elevado nivel de producción de maquinaria, demandando una red de aire comprimido eficiente a lo largo y ancho de la unidad de fibras.

Algunos estudios afirman que, en la actualidad el aire comprimido supone más del 20 % del consumo energético en las industrias, llegando incluso a ser muy superior en ciertos procesos industriales.

En ese ámbito, el ahorro de energía es una de las inquietudes que presentan las industrias, lo cual se traduce en el desarrollo de planes específicos que buscan reducir el consumo de energía, mejorando de manera eficiente los materiales y las instalaciones de equipos. Dentro de este entorno, es habitual que no se preste la debida atención a las instalaciones de aire comprimido, lo cual conduce a generar un consumo energético elevado y un alto costo de explotación.

## **1.4 Metodología de trabajo**

La metodología presente a continuación, intenta solucionar la problemática de CMPC Pulp Planta Laja la cual está relacionada principalmente con una red de aire comprimido que ha incrementado su instalación inicial, de acuerdo a las necesidades de la empresa y no ha contado con un estudio al respecto, por lo cual, la falta de dicho estudio tiene como consecuencia una red de aire comprimido con problemas, tales como: detenciones en la producción, producto de descensos en la presión en áreas lejanas a los compresores, y generando que el aire que va desde los compresores hacia las máquinas lleve consigo humedad o partículas, afectando el funcionamiento y conservación de los equipos.

### **1.4.1 Introducción al tema**

- ◆ Estudiar teoría acerca del aire comprimido.
- ◆ Comprender el funcionamiento de las distintas máquinas neumáticas y accesorios propios de una red de aire comprimido.

### **1.4.2 Descripción de la situación actual**

- ◆ Conocer el proceso productivo de la empresa.
- ◆ Distribución de áreas y equipos.
- ◆ Conocer estado de las máquinas.

### **1.4.3 Conocer la red actual**

- ◆ Reconocer la demanda de aire.
- ◆ Averiguar la generación de aire.
- ◆ Conocer las máquinas neumáticas utilizadas en la red y sus especificaciones técnicas.
- ◆ Identificar zonas de pérdida de carga.
- ◆ Averiguar tipos de tuberías utilizadas en la red de aire comprimido.
- ◆ Distribución de la red.

#### **1.4.4 Diagnóstico de la situación actual**

- ◆ Encontrar pérdidas de carga en la red de aire comprimido.
- ◆ Evaluación del diseño actual.
- ◆ Comparar la situación actual con lo estudiado.
- ◆ Encontrar falencias en la red de aire comprimido.
- ◆ Proporcionar diagnóstico de la red de aire comprimido.

#### **1.4.5 Solución al problema**

##### **1.4.5.1 Mejorar el diseño actual**

- ◆ Reducir pérdidas de carga.
- ◆ Seleccionar mejoras en almacenamiento.

##### **1.4.5.2 Evaluar costos de las alternativas**

- ◆ Encontrar costos de las soluciones propuestas de mejora.
- ◆ Comparar las propuestas de mejora y elegir la más adecuada.

## **Capítulo II: “Proceso productivo”**

### **2.1 Descripción general de la empresa**

CMPC se fundó en 1920 siendo una compañía que se dedica a la fabricación de productos de madera, celulosa, papeles y productos de embalaje, y productos Tissue con presencia en 8 países de Sudamérica: Chile, Brasil, Argentina, Perú, México, Colombia, Ecuador y Uruguay.

Si consideramos sólo el mercado chileno, esta empresa genera el 45% de la producción total de celulosa del país, lo que corresponde a 2,3 millones de toneladas al año. Esta producción es elaborada en sus tres plantas, Santa Fe, ubicada en Nacimiento, Pacífico, la cual se encuentra en Mininco y Laja, en la comuna del mismo nombre. En la actualidad la compañía es el cuarto mayor proveedor de celulosa en el mundo, mencionando que CMPC Pulp posee más de 49 fábricas de distinto tipo que hacen de este conglomerado económico un referente en el área forestal (Gutiérrez A, 2007).

La materia prima utilizada para abastecer las principales plantas es mayoritariamente por bosques cultivados propios, libres de controversias y perfectamente trazables hasta el destino final, según confirman las certificaciones de cadena de custodia CERTFOR-PEFC en Chile y CERFLOR en Brasil.

En sus plantas cuenta con 17.549 trabajadores directos y 32.141 trabajadores indirectos. Su patrimonio es de US\$ 8.623 millones y sus activos ascienden a US\$ 15.191 millones.

En 2018, CMPC Celulosa consolidó ventas por US\$ 6.275 millones, incluyendo la operación en Brasil, incorporada en diciembre de 2009. El 80 % de su producción en Chile fue exportada, principalmente a Asia, América y Europa llegando a un total de 45 países (CMPC, 2018).

## 2.2 Breve Reseña histórica de CMPC Pulp SpA Planta Laja

CMPC Pulp Planta Laja, filial de empresas CMPC SpA, es una empresa que se dedica desde 1959, a la fabricación y comercialización de celulosa kraft. Históricamente conocida como la primera planta de celulosa construida en Chile y la segunda de Sudamérica. Comenzó a operar con una capacidad de producción de 80.000 ADt al año (Air Dry tons) y producto de continuos proyectos de modernización, alcanza una capacidad de producción anual de 260.000 toneladas de celulosa y 70.000 toneladas de papeles sackkraft.

En 2009, CMPC dio inicio a un profundo plan de renovación en Planta Laja, con el propósito de asegurar competitividad en el largo plazo y alcanzar un desempeño ambiental acorde a las mejores tecnologías disponibles.

En la actualidad, CMPC S.A cuenta con una planta en Brasil y 3 plantas en Chile, con una capacidad de producción de 3.250.000 toneladas de celulosa kraft de fibra corta (BHKP) y 830.000 toneladas de celulosa kraft de fibra larga (BSKP) (CMPC Celulosa, 2015). De la primera se producen diferentes toneladas presentadas a continuación:

Tabla 1. Producción industrial de celulosa CMPC. Fuente: (CMPC, 2015)

Planta	Ubicación	Capacidad (ADt/año)	Productos
Pacífico	Mininco	500.000	Celulosa Kraft Blanca de Pino Radiata (BSKP)
Laja	Laja	330.000	Celulosa Kraft Blanca de Pino Radiata (BSKP), UKP Papeles Sack Kraft
Santa Fe	Nacimiento	1.500.000	Celulosa Kraft Blanca de Eucalipto (BEKP)
Guaíba	Rio Grande do Sul	1.765.000	Celulosa Kraft Blanca de Eucalipto (BEKP), Papeles de Impresión y Escritura (P&W)



CMPC Celulosa produce kraft blanca, tanto de fibra larga, de *Pino Radiata*, como de fibra corta, de Eucalipto. Ambas son elaboradas, exclusivamente a partir de madera proveniente de bosques cultivados, lo cual garantiza una pulpa con propiedades físicas y mecánicas consistentes y estables. Además, las plantas de Laja y Guaíba, en Brasil, producen papel.

La celulosa BSKP de CMPC es reconocida en todo el mundo como una celulosa versátil, de características uniformes. Es empleada como materia prima para una amplia variedad de productos, desde papeles de impresión y escritura, estucados y especialidades. Además, también es reconocida por su limpieza, resistencia y facilidad de refinación, atributos que la hacen apropiada para la producción de una amplia gama de papeles finos para impresión y escritura, capaces de satisfacer los más exigentes requisitos gráficos.

### 2.3 Etapas del proceso productivo de la Celulosa

CMPC Planta Laja está ubicada a 550 km al sur de Santiago, en la Región del Biobío, en el lugar de convergencia de los Ríos Laja y Biobío, en la calle Balmaceda n°30, Laja. Respecto al acceso a planta, CMPC Laja posee dos accesos principales, uno para camiones con madera (materia prima) y también máquinas de gran tonelaje a través de la ruta Q-34 y el acceso principal para trabajadores y vehículos menores por la calle Balmaceda, en este acceso se debe ingresar a través de un sistema de torniquetes mediante una tarjeta de identificación como se aprecia en la figura 1. La empresa dio inicio a sus actividades hace aproximadamente 60 años, junto a una producción de 330.000 toneladas anuales, entre celulosa y papel sackraft.



Figura 1. Imagen satelital de CMPC Pulp Planta Laja. Fuente: Google Maps

Las áreas de proceso son las siguientes: la línea de fibras, donde se produce la separación de las fibras de celulosa o papel; el circuito de recuperación, donde se produce la energía eléctrica, el vapor necesario para el proceso y se recuperan parte de los reactivos químicos que se utilizan; el sistema de tratamiento de efluentes, donde se realiza la depuración de las aguas utilizadas en el proceso previo a su descarga al río Biobío; y por último el sistema de acopio de residuos industriales sólidos y las áreas de servicio (CMPC Celulosa, 2015).

## 2.4 Etapas del proceso productivo de la celulosa.

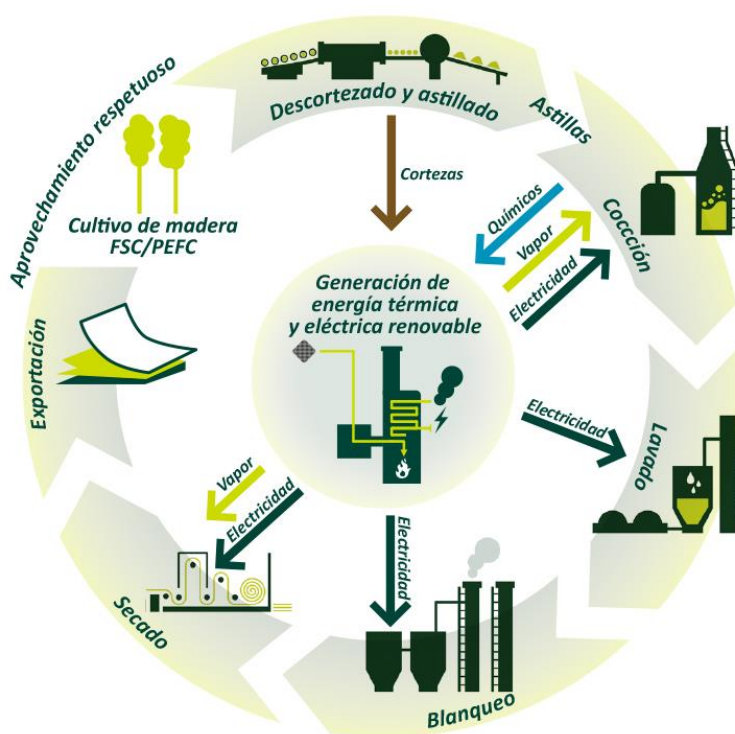


Figura 2. Diagrama general de producción de celulosa

### 2.4.1 Fase Preparación de la madera

El inicio del proceso de fabricación de la madera, se desarrolla a partir de diversas materias primas, entre ellas se encuentran trozas de madera, astillas de aserradero y otros residuos de madera. El cual está definido, con la entrada de los trozos de madera a los descortezadores y continúa con el proceso de astillado (Luraschi M, 2007).

#### **2.4.2 Fase Cocción, lavado y deslignificación**

La etapa de cocción, abarca desde el ingreso de las astillas de madera, hasta el paso por el digestor. Las astillas son sometidas a un proceso de impregnación que busca saturarlas con vapor de agua para eliminar el contenido de aire existente en estas y facilitar la entrada a la madera de una solución llamada licor blanco, para posteriormente entrar en un impregnador de alta presión en el digestor. Es en este equipo donde se adiciona licor blanco, un compuesto de soda cáustica y sulfuro de sodio, para comenzar la separación de la celulosa con las hemicelulosas y la lignina, para así formar la pulpa cruda o café.

Las astillas se van transformando en una pasta compuesta por fibras de celulosa, lignina y licor de cocción. Es aquí, donde una parte importante de la lignina se retira disuelta en líquido de cocción, denominado normalmente licor negro, que es la mezcla entre licor blanco y lignina disuelta (CMPC Celulosa, 2015).

La deslignificación incluye la clasificación de astillas posterior a la cocción y el lavado. En esta fase, la pasta permite la eliminación de los restos del licor negro, ingresando de manera continua a un proceso de clasificación para poder separar las astillas que no alcanzaron una cocción completa y que posteriormente son devueltas al digestor continuo. En resumen es la etapa donde se extrae la mayor parte de la lignina, obteniendo celulosa kraft sin blanquear que es de color café, lo que permite seguir mejorando la calidad de la pulpa (Luraschi M, 2007).

#### **2.4.3 Fase Blanqueo**

En la fase de blanqueo se elimina lo restante de lignina contenida en la pasta, el proceso se compone de diferentes etapas que varían dependiendo del tipo de fibra. Se adicionan productos químicos como dióxido de cloro, oxígeno y peróxido de hidrógeno, para obtener una pulpa con mayor grado de blancura, lo que mejora su calidad final. En consecuencia, esta etapa es en la cual se genera la mayor proporción de los residuos líquidos del proceso productivo (CMPC Celulosa, 2009).

#### **2.4.4 Fase Recuperación y Energía**

Luego del posterior uso del licor blanco en el digestor, utilizado para separar la lignina de las astillas, el área de recuperación y energía recibe el licor negro, proveniente de la línea de fibra, para recuperar los químicos del proceso y generar energía, obteniendo el mayor rendimiento posible. Este flujo de residuos es tratado en las áreas de evaporadores, caldera recuperadora, caustificación y en el horno de cal, donde se cierra el ciclo.

## Capítulo III: “Marco Teórico”

En la corta existencia del hombre se han desarrollado equipos y procesos que emplean el aire atmosférico como fluido de trabajo. La compresión de dichas invenciones y las mejoras implementadas hizo necesaria la creación de modelos que describan el cambio de las propiedades termodinámicas en los procesos.

### 3.1 El aire comprimido

El aire comprimido es aire atmosférico sometido a presión, compuesto preferentemente por un 78 % de nitrógeno, un 21 % de oxígeno y por un 1 % de otros gases, además de ser una mezcla de gases físicamente inodora, insípida e incolora.

El aire atmosférico está constituido por:

- ◆ Vapor de agua.
- ◆ Aire seco, con las diferentes concentraciones de gases ya indicados.
- ◆ Impurezas (hollín, polvo, sales, etc.).

Este se obtiene mediante los compresores, los cuales aspiran el aire atmosférico, disminuyendo su volumen y aumentando su presión (MESSER Ibérica, 2012).

### 3.2 Conceptos básicos del aire comprimido

Previo a iniciar el análisis propiamente dicho de aire comprimido, es conveniente definir una serie de conceptos necesarios para dicho cálculo, así como la descripción de ciertos elementos que componen la instalación.

Los parámetros claves que están presentes en una instalación de aire comprimido son:

### 3.2.1 Presión

Es la fuerza sobre un centímetro cuadrado de una columna de aire, la cual varía según la altitud sobre el nivel del mar a la que nos encontremos. Se entenderá por presión al cociente de dividir una fuerza por la superficie que recibe su acción:

$$p = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} \quad (1)$$

Mientras no se indique lo contrario, al momento de hablar de presiones serán siempre presiones efectivas, que se cuentan a partir de la presión atmosférica. Por otro lado, el bar es la unidad de presión más utilizada en aire comprimido. Su equivalencia más cercana es a la atmósfera o el kg/cm<sup>2</sup> (Barroso, Losada, Ayarzagüena, Cámara, Yagüe, 2012). Cualquiera de las tres unidades es habitual en los catálogos de aire comprimido. Su relación es la siguiente:

$$1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa} = 1,01972 \text{ kgf/cm}^2$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$$

En la industria ésta fuerza, se mide en manómetros que miden la presión relativa, ya que la presión actuante sobre el elemento elástico, es la diferencia entre la presión a medir y la atmósfera.

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{atmosférica}} + P_{\text{relativa}} \quad (2)$$

Se debe tener en consideración las posibles variaciones de presión que puede tener un fluido compresible, que por lo general, son muy pequeñas debido a los pequeños pesos específicos, como también lo son las diferencias de elevación que se consideran en hidráulica (Carnicer, & Royo 1996).

### **3.2.2 Caudal**

Otro de los parámetros que interviene es el caudal, que es una magnitud compuesta que relaciona el volumen y el tiempo, es decir, el caudal es el volumen de aire suministrado en la unidad de tiempo. Este se puede calcular como el producto de la velocidad media del mismo y del área de la sección transversal del caudal.

El caudal de aire comprimido que debe ser suministrado por el compresor puede venir expresado en  $\text{Nm}^3/\text{h}$  o en N lts/min, referidos al aire por minuto, es decir, al aire en las condiciones normales de presión y temperatura, para ello se antepone la letra N mayúscula a las unidades, esto es: N l/min (Carnicer, & Royo 1996).

En el caso de los compresores, para el aire suministrado (FAD), el caudal de salida del compresor se recalcula como caudal volumétrico de aire libre a las condiciones estándar de entrada (temperatura de entrada  $20^\circ \text{C}$  y presión de entrada 1 bar), este último dependerá de las demandas que se establecerán después de atender a las especificaciones técnicas de las distintas máquinas que se van a instalar en esta industria (Rodríguez H, 2012).

### **3.2.3 Compresión de los gases**

Es de conocimiento general que el volumen del aire depende principalmente de la presión de compresión a la cual ha sido sometido.

Los físicos Boyle y Mariotte determinaron en el año 1662, que la presión aplicada a un gas es inversamente proporcional a su volumen a temperatura y número de moles (cantidad de gas) constante, es decir, si se aumenta al doble la presión ejercida sobre el gas, este se comprime reduciendo su volumen a la mitad.

Esta ley se puede expresar de forma matemática como:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \quad (3)$$

Dónde:

P = Presión absoluta [atm]

V = volumen [m<sup>3</sup>]

La ley de Charles establece que a presión constante (transformación isobárica), el volumen de un gas cambia en proporción directa al cambio en su temperatura. La relación se escribe:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (4)$$

Dónde:

V = volumen [m<sup>3</sup>]

T = temperatura absoluta (K)

A raíz de lo anterior surge la ley general, que relaciona las propiedades de presión, temperatura y volumen. Esto define el cambio que produce la variación de alguna de las propiedades respecto a las otras (Osorio R, 2015).

$$R = \frac{P * V}{T} \quad (5)$$

Dónde:

$R = \frac{\bar{R}}{M}$  : es la constante individual ( $\frac{J}{kg * K}$ )



### **3.2.4 Pérdida de presión**

La pérdida de presión, alude directamente a la pérdida de energía que se va originando en el aire comprimido producto de los diferentes obstáculos que encuentra en su desplazamiento hacia los diferentes puntos de consumo, como son: secador, filtros, tuberías, etc.

Será uno de los objetivos primordiales, que la pérdida de presión se encuentre dentro de los límites permisibles para cualquier red de aire comprimido. (Perales, 2014).

### **3.3 Generación del aire comprimido**

Los equipos responsables de la producción del aire comprimido son los compresores. Estos deben ser instalados con condiciones específicas, presentando nuevas tecnologías guiando a compresores más sofisticados y silenciosos, por lo que en la actualidad el ruido ya no representa un problema, y además, el propio equipo del compresor trae incorporado sistemas de refrigeración para el aire comprimido, como también para el aceite de la cámara de compresión. Como ya se definió anteriormente, dentro de los parámetros fundamentales que se encuentran en un compresor, son el caudal suministrado y la presión de trabajo (Atlas Copco, 2017).

### **3.4 Calidad del aire**

La calidad del aire está determinada por la proporción de humedad y de contaminación (partículas de polvo o aceite) que pueda permitir la utilización de este. En general, el aire comprimido dentro de este tipo de planta (celulosa), suele dividirse en 2 grupos dependiendo de la calidad de este y de la aplicación que se le dará posteriormente (EDIGAR, 2017).

Aire de fábrica: se puede encontrar relativamente húmedo y sucio. Sus características lo definen para uso de herramientas neumáticas y para servicios generales, tales como pequeñas bombas neumáticas, arrancadores de motor, etc. Este es comprimido y almacenado sin necesidad de ser secado.

Aire de instrumentos: este aire presenta casi nula presencia de humedad y de suciedad, por sus características es usado en válvulas de control y válvulas Todo/Nada, también es usado en motores neumáticos. Su producción viene definida por la compresión del aire atmosférico, almacenado en un tanque de volumen con posterior filtrado y secado, para utilizarlo en instrumentos (Szkłanny, 2012).

### 3.5 Componentes de un sistema de aire comprimido

En general un sistema de aire comprimido se divide en dos grandes partes: el suministro y la demanda. El primero se compone por el paquete de compresión, donde se encuentra el compresor, los controladores, depósitos, equipo de tratamiento del aire (tales como filtros), enfriadores, secadores, tanques de almacenamiento, etc. Todos los sistemas tienen los mismos componentes en la generación, en cambio, por el lado de la demanda, se encuentra el cabezal principal, compuesto por las líneas principales de distribución, que depende directamente de la actividad que realicen durante la aplicación de los equipos y de la red de piping que requiera la planta, véase figura 3 (Mundo Automatizado, 2012).

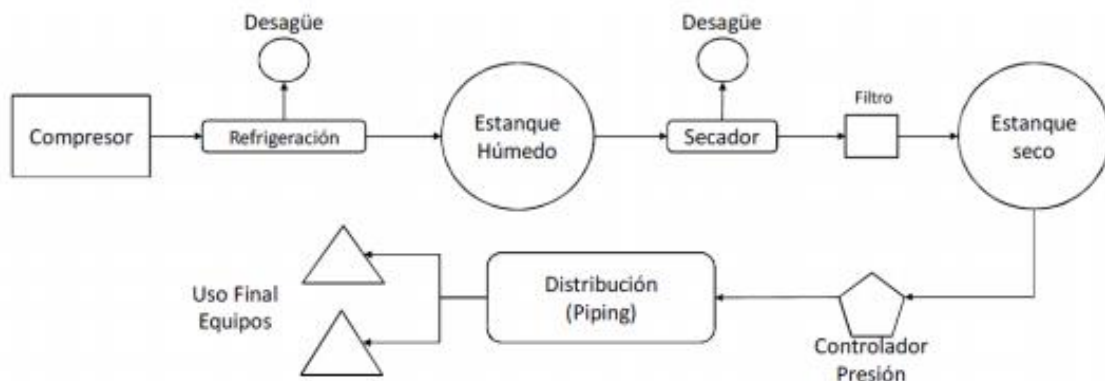


Figura 3. Equipos que componen un sistema neumático.

Fuente: Mundo automatizado, 2012.

#### 3.5.1 Compresor

Son máquinas que están diseñadas con la finalidad de aumentar la presión de los gases. Normalmente se aspira el aire a una presión atmosférica y se expulsa a una presión más elevada mediante el aporte de energía externa. La palabra compresor es un vocablo genérico, en el cual se incluyen todas las máquinas que aumentan la presión estática de un gas.

Dentro de las clasificaciones que podemos encontrar, una de ellas es mediante el rango de incremento de la presión (Sánchez, 2012).

$$\text{Ventiladores} \quad P \leq 0.07 \frac{\bar{K}_g}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Sopladores} \quad P \leq 2.5 \frac{\bar{K}_g}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Compresores} \quad P > 2.5 \frac{\bar{K}_g}{\text{cm}^2}$$

### **3.5.1.1 Dimensionamiento del compresor**

El proceso para la correcta elección de un compresor, viene definido por el tipo de aplicación que va a alimentar y los requerimientos de la misma, aunque en la actualidad la elección está basada generalmente en parámetros de eficiencia energética. Dentro de los factores importantes que se consideran, son la demanda de aire y la presión de trabajo del equipo.

### **3.5.1.2 Cálculo de la demanda de aire**

Producto de los continuos avances en la tecnología, gran parte de la empresas industriales se encuentran en constante evolución, y esto significa que los requerimientos de aire comprimido varían. Es por esto, que para determinar la capacidad del compresor necesaria para poder alimentar una herramienta, máquina o grupo de accionamientos neumáticos, es necesario tener en cuenta los siguientes datos:

- ❖ **Coeficiente de utilización:** es el margen de operación intermitente o factor de servicio, el cual indica el tiempo en que el componente neumático está parado, es decir, es la fracción del tiempo total de funcionamiento en el que la máquina consume aire comprimido.
- ❖ **Consumo específico:** está referido al consumo de aire requerido por una herramienta, para el servicio intermitente a la presión de trabajo dada por el fabricante. Este consumo es expresado en aire libre (NI/min o Nm<sup>3</sup>/min).

- ❖ Coeficiente de simultaneidad: es el promedio de los coeficientes de utilización de cada herramienta neumática utilizada en la industria. Este se multiplica por el consumo de aire total de los equipos, entregando el consumo real de aire utilizado según el tiempo de cada máquina. Los manuales suelen proporcionar valores de este coeficiente en función del número de máquinas que alimenta la instalación.

Por lo que, para poder determinar la capacidad de los compresores, se comenzará determinando el consumo del área de fibras, al que habrá que añadirle un 10 % por pérdidas de aire admisibles por fugas, además considerar un 20 % para prever posibles ampliaciones (Carnicer, & Royo, 1996).

### 3.5.1.3 Clasificación del compresor

Algunos expertos concuerdan en que estos se pueden agrupar en dos grandes grupos y estos a su vez se subdividen en otros compresores. Estos dos principales grupos trabajan con dos principios de compresión de aire: la compresión de desplazamiento positivo y la compresión dinámica. Cada uno de ellos tiene una característica que los hace idóneos para un determinado tipo de aplicación, véase figura 4.

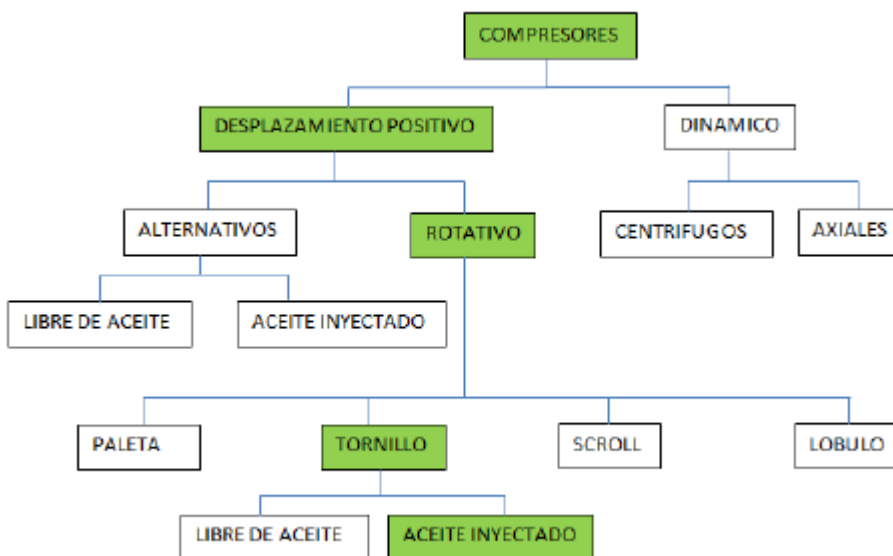


Figura 4. Esquema de la clasificación de los compresores.

Compresores de desplazamiento positivo: en este tipo de compresores el principio de funcionamiento se basa en la disminución del volumen de aire en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, produciéndose el incremento de la presión interna hasta llegar al valor requerido, momento en que el aire es liberado al sistema. Además permite generar altas presiones.

Compresores dinámicos: Por otra parte, el principio de funcionamiento de estos compresores se basa en el aumento de presión, debido a que se produce un incremento en la aceleración conferida al aire, cierta velocidad o energía cinética, que se convierte en presión al desacelerar el gas, aceleración molecular producida cuando este pasa a través de un difusor (Fernández, 2008).

Dentro de los principales tipos de compresores, encontramos las siguientes características:

### ***Alternativos***

- ◆ Para bajas, medianas y altas presiones.
- ◆ Para capacidades moderadas.
- ◆ Ruidosos.
- ◆ Flujo intermitente del gas comprimido.
- ◆ Necesitan depósitos de aire.

### ***Rotativos***

- ◆ Para presiones bajas.
- ◆ Para capacidades moderadas.
- ◆ Silenciosos.
- ◆ Flujo continuo de gas.
- ◆ No necesitan depósito de aire.

### ***Centrífugos***

- ◆ Para presiones medianas (con varias etapas).
- ◆ Para capacidades medianas.

### *Axial*

- ◆ Para presiones medianas (con varias etapas).
- ◆ Para grandes capacidades.
- ◆ Máquinas voluminosas, accionadas normalmente por turbina a gas.

### **3.5.2 Refrigeración**

Posterior a la compresión del aire, este se calienta por lo que su capacidad para retener vapor de agua aumenta. Mientras que, un aumento de presión en el aire, produce una notable reducción de la capacidad para retener el agua. En resumen, mientras el aire se comprime en el compresor, las altas temperaturas evitan que el agua condense, por lo que una vez dentro de las conducciones, producto del descenso de temperatura y presiones relativamente altas, se conlleva a la condensación de agua en las tuberías.

Debido a lo anterior, ya que es necesario eliminar en su totalidad las posibles condensaciones, se reduce la temperatura del aire en un dispositivo que se coloca junto a la salida del compresor, para que el descenso no tenga lugar en las líneas del suministro. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se agrega un enfriador (aftercooler) lo más cercano al compresor. En conclusión, se distinguen 2 procesos de refrigeración que, por lo general, se realizan con agua, aceite o aire.

Refrigeración Intermedia (intercooler): esta se realiza entre la primera y la segunda etapa de compresión, siendo su principal objetivo el reducir el trabajo necesario para la compresión del aire.

Refrigeración Posterior (aftercooler): esta se realiza después de la segunda compresión y antes del estanque, siendo su objetivo el extraer la humedad del aire (Fernández, 2008).

### **3.5.3 Almacenamiento**

El estanque de almacenamiento es un equipo de gran importancia dentro de la red de aire comprimido, debiendo cumplir ciertas normas de seguridad. Este equipo es capaz de reducir el condesado si es instalado en conjunto con el compresor. Por otro lado, mantiene un caudal constante

y sin variaciones de presión, ayudando a compensar los picos de requerimientos de CFM (Cubic Feet Minute), cumpliendo su objetivo de almacenar una gran cantidad de aire comprimido.

El lugar de instalación debe ser cerca de los puntos de mayor requerimiento de aire comprimido (CFM), para poder tener un flujo constante en puntos de mayor lejanía respecto del cuarto de los compresores o dentro del conjunto del compresor. Además, a través del intercambio de calor con el ambiente disminuye la temperatura del aire, facilitando el desprendimiento de humedad en forma de condensado. Por consecuencia, el acumulador de aire debe estar equipado con un dispositivo de drenaje de condensados (Jiménez & Soto, 2014).

Para un correcto dimensionamiento del volumen del acumulador, según lo recomendado por el Manual Técnico de Aire Comprimido (Castilla y León, 2012). Por lo cual, la relación es:

$$V = \frac{0,25 \times q_c \times p_1 \times T_0}{f_{\max} \times (p_v - p_L) \times T_1} \quad (6)$$

Donde:

- V = volumen de aire del receptor [l]
- $q_c$  = capacidad del compresor [l/s]
- $p_1$  = presión de aspiración del compresor [bar(a)]
- $f_{\max}$  = ciclo carga/descarga compresor [s]
- $(p_v - p_L)$  = diferencia de presión entre carga y descarga [bar]
- $T_0$  = temperatura de aire en el receptor [K]
- $T_1$  = temperatura de aire del compresor [K]

### 3.5.4 Dispositivos para tratamiento del aire

Mencionado anteriormente, el aire comprimido transporta contaminantes que pueden reducir la vida útil de los equipos neumáticos, entre los que destacan: la humedad del aire, aceite, partículas atmosféricas, entre otros.

Producto de ello se precisa un tratamiento de aire adecuado, utilizando filtros para poder eliminar las partículas y el contenido de aceite, mientras que, la humedad del aire se va reduciendo a medida que pasa por enfriadores y secadores (EREN, 2012). Para lo anterior, se deben poseer conocimientos sólidos apoyados en bases teóricas de la humedad del aire.

#### **3.5.4.1 Humedad del aire**

Además de los fundamentos teóricos de la composición del aire seco mencionados anteriormente, el aire atmosférico posee una cierta proporción de humedad en su contenido, que depende de las condiciones climáticas de cada lugar. Teóricamente, existen varios tipos de humedad con gran relevancia en el estudio que se realiza, definidas a continuación:

Humedad absoluta: es el peso del vapor de agua, expresado en kg, existente en un kilogramo de aire seco. Es representado por la letra  $W$  y la siguiente relación:

$$W = \frac{\text{kg vapor de agua}}{\text{kg aire seco}} \quad (7)$$

Humedad de saturación: es el máximo peso de vapor de agua que admite un kg de aire seco a una presión y temperatura determinada, representándose por  $W_s$ .

Humedad relativa: es la relación entre la humedad absoluta existente,  $W$ , y la humedad máxima que el sistema podría contener, es decir, la humedad de saturación  $W_s$ , puede ser representado por  $W_r$  y se entrega en porcentaje.

$$W_r = \frac{W}{W_s} * 100 \quad (8)$$

Cuando la humedad relativa se presenta como un 100%, significa que el ambiente se encuentra saturado, es decir, en el que  $W = W_s$ . Por otro lado, una humedad relativa del 0% indica que se trata de un ambiente de aire totalmente exento de humedad. Finalmente el grado de saturación del aire, se puede conocer a través del porcentaje que indica la humedad relativa.



Cuando ocurre el proceso conocido como compresión, el aire entra al equipo bajo condiciones de presión, temperatura y humedad atmosféricas. Debido al aumento de presión, se registra un considerable aumento de temperatura, siendo regulada esta última por el enfriador. En esta parte del proceso, la humedad absoluta permanece constante en todo momento, es decir, el vapor de agua que contiene cada kilogramo de aire seco no cambia, sufriendo cambios la humedad de saturación producto de las nuevas condiciones de presión y temperatura. Luego de obtener un alza de 100 % de la humedad relativa, comienza la formación del condensado y la posterior elección de purgas (Hidalgo, 2008).

En definitiva, el poder conocer la humedad del aire dentro de este análisis radica en advertir la cantidad de agua que circula por un caudal determinado. La ecuación 9, presentada a continuación es el resultado del producto de la densidad del aire por el caudal másico de aire seco, representando la cantidad de agua.

$$\dot{M} = \rho * \dot{V} \quad (9)$$

Dónde:

$\dot{M}$  = Flujo másico (Cantidad de agua) [kg/s]

$\rho$  = Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

$\dot{V}$  = Flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/s]

### **3.5.4.2 Secadores**

Estos equipos vienen a solucionar problemas tales como la formación de hielo en las válvulas y controles. Esto puede producir, por ejemplo, un efecto Venturi producto de estrangular aire de alta presión a muy baja presión en un régimen de flujo elevado. Debido a las bajas temperaturas que se obtendrán, el efecto Venturi hará que cualquier humedad en el aire se congele y forme hielo.

Otra razón para usar secadores de aire en un sistema de aire comprimido, son las posibles gotas de agua que pueden producir un golpe de ariete en un sistema de aire que tenga alta presión y un flujo elevado, derivando en corrosión, óxido y complicaciones con los lubricantes dentro del sistema.

Existen 2 principales clases de secadores de acuerdo al uso que tengan los sistemas y el nivel de remoción de humedad que este pueda generar.

Secadores por adsorción: los secadores de adsorción utilizan unas técnicas de secados diferentes, consiguiendo una deshumidificación segura del aire comprimido, obteniendo temperaturas entre  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $-80^{\circ}\text{C}$  (Mundo compresor, 2019).

Secadores por refrigeración: en estos equipos el aire comprimido es pasado por sobre un juego de bobinas refrigeradas. Se pueden recolectar y remover los vapores de aceite y humedad del aire que condensan a través de un punto de drenaje (ASHM, 2018).

De acuerdo a las especificaciones técnicas de los compresores que se utilizan en planta, en la actualidad los secadores empleados son por adsorción de la marca Atlas Copco MD600 ilustrados en la figura 5, buscando limpiar y secar el aire.



Figura 5. Imagen ilustrativa de Secador Atlas Copco MID 600

### **3.5.4.3 Filtros**

Son elementos usados para evitar mayores daños en el compresor, ya que se encargan de eliminar las partículas atmosféricas e impurezas.

Se pueden encontrar tres clases de filtros:

- ◆ Filtros de entrada: estos pueden ser filtros secos o húmedos. El primero de estos utiliza cartuchos desechables. Por otro lado en el filtro húmedo, el aire entrante pasa a través de un baño de aceite y luego a través de un filtro de malla de alambre fino (Jiménez, 2012). En el filtro seco los cartuchos son reemplazados durante el servicio, mientras que los filtros húmedos se limpian utilizando una solución detergente.
- ◆ Filtros intermedios: se posiciona antes de los secadores, con la finalidad de proteger el secador instalado para su correcto funcionamiento.
- ◆ Filtros finales: estos filtros se instalan antes del uso final del aire. Su principal finalidad es la protección de los equipos y herramientas neumáticas. La selección de este viene definida según especificaciones y características necesarias (Mundo compresor, 2019).

#### **3.5.4.4 Controladores de Presión**

Es común que toda la instalación neumática presente una presión de trabajo diferente a la existente en la red y preferentemente más baja. La función de estos dispositivos es poder estabilizar la presión del sistema, ya que presiones de trabajo muy altas, producen grandes pérdidas de carga y un mayor desgaste en los componentes, por el contrario, trabajando con presiones bajas, el rendimiento del sistema obtenido es malo. Estos sistemas de regulación están controlados de forma neumática o con controladores electrónicos PID.

Para poder regular dicha presión, existen diversos tipos de regulares entre los cuales, los que más destacan son el de diafragma y de pistón (Tecnología para la industria, 2018).

#### **3.5.4.5 Piping**

Pese a que se recomienda utilizar tuberías con bajo coeficiente de fricción y corrosividad (aleaciones de aluminio, cobre y polímeros), muchos de los sistemas de distribución utilizan aceros al carbono, resultando ser particularmente sensibles a la corrosión.

### **3.5.4.6 Válvula de seguridad**

Las válvulas de seguridad o también llamadas de presión directa, son válvulas que reducen la presión del sistema. El sistema de funcionamiento es bastante simple, debido a que son válvulas cargadas axialmente que al alcanzar una presión predefinida de tarado se abren automáticamente por la acción del fluido o presión sobre el disco de cierre de la válvula (Turmo, 1999).

### **3.5.4.7 Actuadores presentes en el sistema neumático**

Los actuadores neumáticos convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico. Dentro del área de fibra, se pueden encontrar dos tipos de actuadores que destacan por estas características, pueden ser lineal o rotativo.

Los actuadores rotatorios, su función principal es convertir la presión hidráulica de un fluido en potencia rotativa y desarrollar un torque instantáneo, como se aprecia en la figura 6. Dentro del área son usadas para activar y desactivar la succión de las bombas de vacío, en las mordazas o prensas y en la apertura y cierre de válvulas de gran tamaño.

Por otro lado, los actuadores lineales actúan convirtiendo el movimiento de rotación de un motor de corriente continua en un movimiento lineal, de esa manera es posible elevar, ajustar o empujar objetos pesados (Jiménez & Soto, 2014).



Figura 7. Actuador Lineal.

Fuente: Elaboración propia



Figura 6. Actuador Rotativo.

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 Distribución de aire comprimido

Una instalación de aire comprimido consta de tres tipos diferentes de tuberías como se puede apreciar en la figura 8.

- ◆ Tuberías principales: son las líneas que salen desde el depósito de acumulación y llevan el máximo caudal que consume la planta. Debe poseer la mayor sección posible para que se eviten pérdidas de presión y debe tener un margen de seguridad para posibles ampliaciones de la línea de montaje. Este margen debe ser tomado en cuenta con respecto al caudal total a aportar.
- ◆ Tuberías secundarias: son las líneas que derivan de la tubería principal para conectarse con las tuberías de servicio. El caudal circulante es asociado a los elementos alimentados exclusivamente por esta tubería. De manera similar que en la tubería principal, también en su diseño debe considerar posibles ampliaciones en el futuro.
- ◆ Tuberías de servicio: son las tuberías que proporcionan el servicio a los equipos neumáticos. En sus extremos presentan conectores rápidos y sobre ellas se ubican las unidades de mantenimiento. Dentro de sus recomendaciones podemos encontrar, no sobrepasar de tres el número de equipos alimentados por la línea, utilizan diámetros mayores a  $\frac{1}{2}$ " , entre otras (Monografías, 2019).

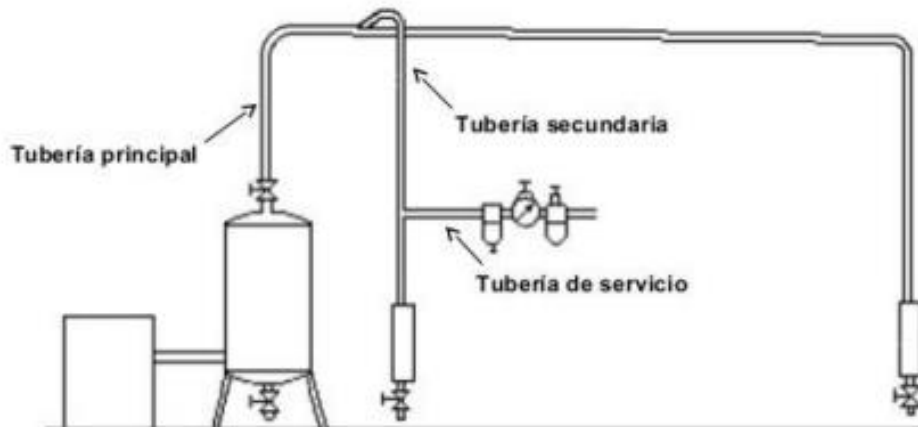


Figura 8. Esquema de los tipos de tuberías presentes en una instalación de aire comprimido (Fuente: Paredes y Pérez, 2017)

### 3.7 Distribución de las redes de aire comprimido

Dentro de la distribución de aire comprimido se encuentran tres tipos de circuitos que son utilizados en la industria, dependiendo de su forma de distribución es posible encontrar los siguientes: red de aire abierta, red de aire cerrada y red de aire mixto.

#### 3.7.1 Red de aire abierta

Esta red se constituye por solo una línea principal, de la cual se desprenden las secundarias y las de servicio. Una de sus principales ventajas es la poca inversión inicial que se necesita, ya que conlleva menos materiales. Una de las consideraciones a tener al momento de elegir este tipo de distribución, es que los puntos de consumo estén lo más cercano a la unidad compresora, así como se ilustra de manera representativa en la figura 9, ya que presentan muchas pérdidas de presión y caudal a lo larga de la línea. Otra desventaja de este tipo de red es su mantenimiento, ya que ante una posible reparación de la red “aguas abajo” del punto de corte, esta puede afectar o detener la producción.

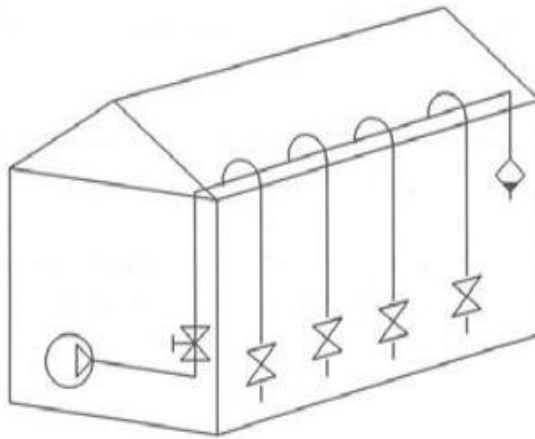


Figura 9. Esquema de una red de aire comprimido abierta.

Fuente: Paredes y Pérez, 2017

### 3.7.2 Red de aire cerrada

Esta red presenta una configuración de la línea principal como tipo anillo o varios de estos. A diferencia de la anterior configuración de red, esta es de una alta inversión inicial, aunque presenta mayores facilidades para las labores de mantenimiento, producto de que ciertas partes de la red pueden ser aisladas sin afectar la producción.

Es altamente utilizado, ya que tiene la ventaja de poder mantener la disponibilidad uniforme de presión, caudal y la velocidad de aire constante en varios puntos del circuito, debido a que el aire se conduce siempre hasta el punto real de trabajo desde dos direcciones, lo que se traduce en menores caídas de presión, como se observa en la figura 10. Lo mencionado anteriormente, presenta desventaja relacionada con los equipos de mantenimiento como: filtros, reguladores, lubricadores y algunas válvulas, por traer predefinida una dirección de flujo, debido a esto no se pueden instalar en la línea principal de aire, instalándose al final de cada rama.

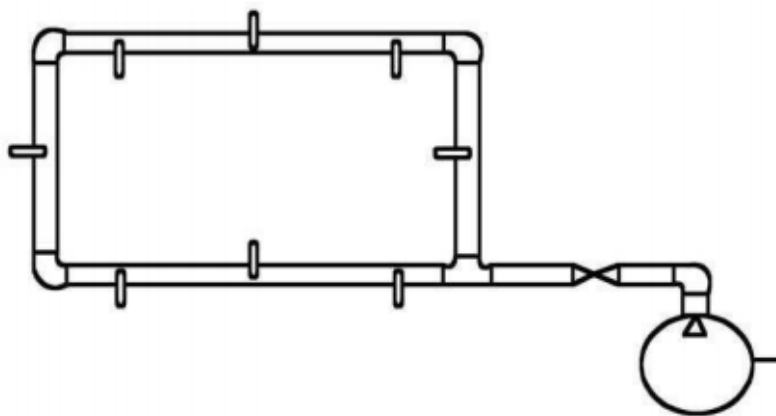


Figura 10. Esquema de una red cerrada de aire comprimido

Fuente: Paredes y Pérez, 2017

### 3.7.3 Red de aire mixto

En este tipo de configuración de la red, se aprovechan las ventajas de ambas disposiciones que se mencionaron con anterioridad. Presenta similitudes con la red cerrada, pero esta tiene implementada un “bypass” entre las líneas principales, véase figura 11.

La red requiere una inversión inicial alta, además de presentar los mismos inconvenientes que la red cerrada, pero presenta un excelente desempeño cuando requiere mantenimiento (Colombero, 2013).

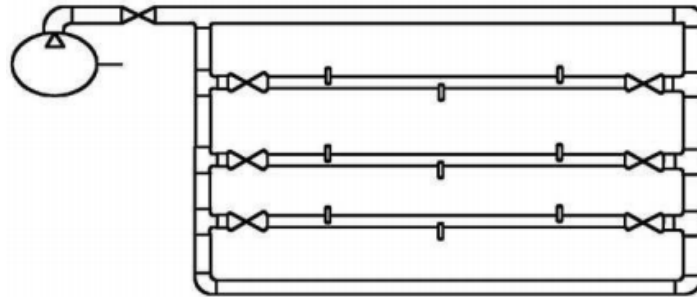


Figura 11. Esquema de una red de aire mixto.

Fuente: Paredes y Pérez, 2017

### 3.8 Pérdida de carga

Es común que la presión obtenida a la salida del compresor, no corresponda a la misma magnitud que la obtenida en los puntos de consumo, debido a que la red de distribución de aire comprimido produce pérdidas de presión. Las pérdidas por fricción se pueden componer de pérdidas regulares (fricción en las tuberías) y pérdidas singulares (pérdidas producidas por accesorios de tuberías). Por lo tanto, las caídas de presión dependen de:

- ◆ Flujo másico y propiedades de aire.
- ◆ Diámetro interior, largo y rugosidad de las cañerías.
- ◆ Número de accesorios.

Para las pérdidas de carga los valores máximos admisibles en el cálculo de las diferentes partes de la red de aire comprimido, se pueden ver en la siguiente tabla 2:



Tabla 2. Valores admisible de pérdida de carga en líneas de aire comprimido.

Tipo de tramo	$\Delta p$ Admisible [Bar]
Tuberías principales	0,03
Tuberías secundarias	0,05
Tuberia de servicio	0,02
	0,1

El cálculo de la caída de presión puede ser determinado a través de ecuaciones, gráficos, tablas o software. En los casos donde no se pueda obtener directamente la pérdida de carga, se utilizará la ecuación 10, que es una ecuación utilizada por la empresa Sulzer, cuando se trabajan flujos de aire comprimido.

$$P_f^2 - P_i^2 = 76,35 \times \frac{L_t \cdot Q_n^{1,875}}{D^5} \quad (10)$$

Dónde:

- $P_f$  = Presión final [bar (a)]
- $p_i$  = Presión inicial [bar(a)]
- $L_t$  = Largo total de la cañería [m]
- $D$  = Diametro interior tubería [mm]
- $Q_n$  = Caudal volumétrico normal [ $Nm^3/h$ ]

En la figura 12, se adjuntan los valores de las diferentes longitudes equivalentes correspondientes a las pérdidas de cargas, mencionado anteriormente debido al largo de la red, tipo, cantidad y tamaño de los accesorios (EREN, 2012).

Longitud equivalente de tubería en metros												
Componentes		Diámetro interior de tubería en mm (d)										
		25	40	50	80	100	125	200	250	300	400	
Válvula de bola abierta 100%		0.3 5	0.5 8	0.5 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Válv. diafragma abierta 100%		1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Válv. angular abierta 100%		4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula de globo		7.5	12	15	24	30	36	45	60	-	-	-
Válvula antirretorno de clapeta		2.0	3.2	4.0	5.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Codo R=2d		0.3	0.5	0.5	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Codo R=d		0.4	0.6	0.6	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Ángulo 90°		1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
T, salida en línea		0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
T, salida angular		1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reductor		0.5	0.7	1.0	2.0	2.6	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.8

Figura 12. Longitud equivalente de accesorios.tubería en metros.

Fuente: Rodríguez- Galbarro, 2017

## Capítulo IV: “Situación Actual”

Para la realización de un análisis detallado de la red de aire comprimido de la unidad de fibras en la Planta de CMPC Pulp, es de suma importancia el poder conocer la instalación y sus puntos de consumo, aunque lamentablemente la empresa no cuenta con toda la información ni planos relacionados a la red de aire comprimido, por lo que fue necesario la realización de un respectivo levantamiento.

A continuación se detallaran los equipos que están presentes en la planta, equipos que forman parte del sistema neumático, detallando su uso y en qué medida utilizan el aire de la red.

Finalmente se realizarán los cálculos de consumos reales en la planta, utilizando diferentes metodologías, teoría o ensayos programados que serán detallados en el transcurso del análisis. Otro punto importante a considerar son: las correspondientes pérdidas de carga producidas en la línea, el condensado generado y correcta capacidad del acumulador son otros estudios que se deberán realizar.

### 4.1 Equipos consumidores de aire en área de Fibra

**Válvulas de control:** son equipos que realizan la función de regular el caudal de un fluido que se comanda a distancia por medio de una señal neumática o eléctrica sobre un servoactuador que la posiciona acorde a la orden de un controlador.

**Válvulas on-off:** son aquellas válvulas automatizadas que regulan el paso del fluido en forma discreta, es decir, la válvula se abre completamente para permitir el paso de un fluido (sin importar su caudal ni presión), o se cierra completamente para cortar el paso.

**Actuadores giratorios (válvulas mariposas):** estas válvulas están encargadas de abrir y cerrar el paso de distintos fluidos a través de las tuberías, realizando un giro de 90°. Están formadas por un cilindro de doble efecto y una guillotina de acero inoxidable.

**Actuadores lineales (guillotinas):** estas válvulas están encargadas de abrir y cerrar el paso de la materia prima, para así controlar su avance a lo largo del proceso. Están formadas por un cilindro de doble efecto y una guillotina de acero inoxidable.

#### 4.2 Compresores en Planta

El sistema de la red de aire comprimido cuenta con seis compresores de tornillo rotativos exentos de aceite, algunos de ellos con secadores externos, internos y sin secadores, como se especifica en la tabla 5. A continuación se presentan de forma detalla las diferentes características de los equipos.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de los compresores n°1, 2, 3, 4 y 5 presentes en Planta Laja.

<b>COMPRESOR #1</b>	
Marca /Modelo	Atlas Copco/ ZR 4
Año	1988
Presión máxima	10,5 bar
Caudal aire libre / Caudal normal	470 l/seg
Potencia motor	186 kW
Peso	4080 kg

<b>COMPRESORES # 2 ,#4 , #5</b>	
Marca /Modelo	Atlas Copco/ ZR 250
Año	2001
Presión máxima	10 bar
Caudal aire libre / Caudal normal	629 l/seg
Potencia motor	250 kW
Peso	3920 kg

<b>Compresor # 3</b>	
Marca /Modelo	Atlas Copco / GA160
Año	1995
Presión máxima	10,4 bar
Caudal aire libre / Caudal normal	760 l/seg
Potencia motor	300 kW
Peso	7170

El compresor #3 se subdivide en dos unidades, el 3A y 3B respectivamente. Son utilizados como compresores de respaldo, pero debido a que no poseen secador la calidad de aire que estos entregan no es la misma que la presentada por los otros compresores. Estos compresores no están exentos del uso de aceite.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del compresor n°6 presente en CMPC Planta Laja.

COMPRESOR # 6	
Marca /Modelo	Atlas Copco/ ZR 315 VSD
Año	2011
Presión máxima	10,4 bar
Caudal aire libre / Caudal normal	760 l/seg
Potencia motor	300 kW
Peso	7170

El compresor #6, emplea la tecnología de accionamiento de velocidad variable (VSD), para asegurar que los procesos realizados utilicen el aire necesario en el momento preciso. De este modo, no solo se asegura que el compresor no utilice más energía de la necesaria, sino que disminuye el consumo de energía con mayor eficacia, además de poseer de manera integrada un secador. En la tabla 5, se presenta el caudal de aire que pueden generar los compresores.

Tabla 5. Generación de aire comprimido CMPC Pulp Planta Laja.

Compresor	Capacidad pies <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /hora	Secador	Serie
1	1476	41,8	2507,7	MD 600	APF 204952
2	1539	43,6	2614,8	MD 600	APF 192086
3-A /3-B	1876			No	
4	1539	43,6	2614,8	MD 600	AIQ 012442
5	1539	43,6	2614,8	MD 600	AIQ 013208
6	1772	50,2	3010,6	INCORPORADO	
	9741	222,7	13362,7		

A continuación en la figura 13, se presenta una esquematización del circuito y sus elementos, que componen la sala de compresores.

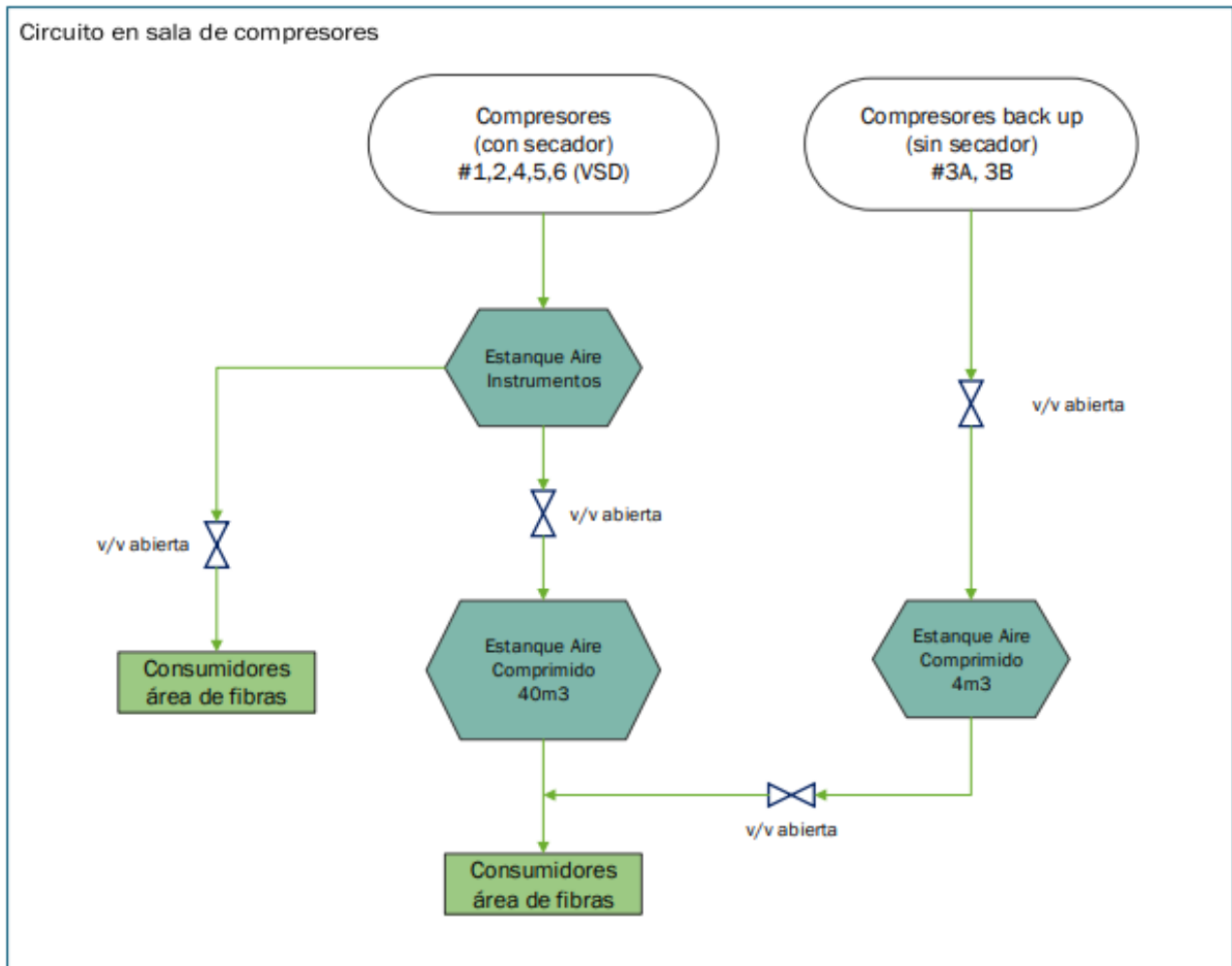


Figura 13. Circuito en sala de compresores.

Fuente: Elaboración propia

- ◆ Todos los compresores parten en modo manual local (operador).
- ◆ Compresores # 1, 2, 4, 5, & 6 (VSD, este último modula variaciones de presión).
- ◆ Compresores de respaldo 3A & 3B, ambos sin secador de aire.

### 4.3 Demanda de aire existente

La estimación de la demanda de aire de los equipos instalados en el área de fibra, se realizó a través de dos métodos.

- ◆ Especificaciones por catálogo

A través del manual se estimó el caudal para el normal funcionamiento del equipo, según las especificaciones del fabricante.

Cuando no se especificaba el consumo o en la empresa se desconocía la información sobre él, se llevó a cabo el segundo método.

- ◆ Equipos con cilindros neumáticos

Para poder determinar el consumo de aire, se realizó el cálculo del volumen desplazado por los pistones de los equipos, utilizando la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot c \cdot n \cdot p \cdot N \cdot 10^{-6} \quad (11)$$

Dónde:

Q = Consumo de aire [Nl/min]

d = Diámetro de cilindro [mm]

N = Número de efectos de cilindro

c = Carrera del cilindro [mm]

n = Número de ciclos completos por minuto

p = Presión de trabajo absoluta [bar]

Para corroborar los valores entregados por el manual, se realizó de forma analítica el cálculo del caudal de un cilindro de simple efecto y otro de doble efecto. Para esto, se debió cronometrar el tiempo de cada uno de ellos. El detalle se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6. Datos cilindros de simple y doble efecto.

Datos cilindro simple efecto		Datos cilindro doble efecto	
Tiempo (s)	18	T avance (s)	24
Lc (mm)	50	T retroceso (s)	26
∅ Embolo (mm)	25	Lc (mm)	150
		∅ Émbolo (mm)	30
		∅ Vástago (mm)	10

Para el cálculo de la velocidad, utilizaremos la siguiente expresión:

$$V = \frac{L_c}{t} \quad (12)$$

Dónde:

Lc= Longitud de carrera [m]

V= velocidad [m/s]

t= tiempo promedio [s]

$$Q_s = V_a * A_e = \frac{0,05}{18} * \frac{\pi}{4} (0,025)^2 = 1,3635 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 0,0816 \text{ [l/min]}$$

Para el cilindro doble efecto, se ocupó la siguiente expresión:

$$Q_d = [(V_a * A_e) + V_R * (A_E - A_V)]$$

Dónde:

Q<sub>D</sub> = consumo específico del cilindro de doble efecto [m<sup>3</sup>/s]

V<sub>a</sub> = velocidad de avance en m/s

V<sub>R</sub> = velocidad de retroceso en m/s

A<sub>E</sub> = área del embolo en m<sup>2</sup>

A<sub>V</sub> = área del vástago en m<sup>2</sup>



Tabla 7. Consumo de aire comprimido actual en el área de fibra.

Sector Fibra	Válvula Control [Nm <sup>3</sup> /h]	Válvula On - Off [Nm <sup>3</sup> /h]	Σ Consumo Real [Nm <sup>3</sup> /h]
Blanqueo	299,60	29,2	328,8
Deslignificación	1693,95	165,1	1859,1
Digestor	667,97	62,2	730,17
Clasificación/Lavado	1312,33	67,9	1380,23
Planta Química	426,39	31,5	457,89
<b>Total general</b>	<b>4400,24</b>	<b>355,9</b>	<b>4756,1</b>

Como se mencionó con anterioridad, la planta presenta dos suministros de aire comprimido diferentes, que salen desde la sala de compresores con dos tuberías independientes. Dentro de las utilidades que se le da al aire de fábrica dentro del área, destaca por sobre las otras el uso como soplador de espacios para realizar una limpieza rápida. La medición de este consumo no se encuentra en ningún manual, pero tampoco puede ser determinada de forma empírica, por lo que se estimará un 15 % del aire de instrumentos como uso de fábrica.

Tabla 8. Consumo de aire en el área de fibra.

	aire instrumentos	aire fábrica	Total caudal Fibra
Consumo m <sup>3</sup> /h	4756,1	713,4	5469,5

Obteniendo el caudal real que consumen los instrumentos neumáticos, se puede calcular la cantidad de aire comprimido que deben generar los compresores. En la tabla 9, se adjuntan las consideraciones mencionadas en el capítulo 3, tales como; adicionar un 10 % que es relativo a las pérdidas por fuga y un 20 % para futuras ampliaciones que se puedan realizar en el área. Al ser un proceso continuo las máquinas y equipos, se encuentran funcionando de manera intermitente, por lo que para el cálculo se consideraron todos los equipos.

Tabla 9. Caudal requerido en el área de fibras.

Caudal de aire real	5.469,56 [Nm <sup>3</sup> /h]
10 % debido a fugas	546,96 [Nm <sup>3</sup> /h]
20 % para ampliaciones	1.093,91 [Nm <sup>3</sup> /h]
<b>Caudal de aire requerido</b>	<b>7.110,43 [Nm<sup>3</sup>/h]</b>

#### 4.4 Caídas de presión

Para determinar las pérdidas de carga de la línea de aire comprimido, se utilizaron los fundamentos teóricos mencionados en el capítulo 3, específicamente la ecuación n°10. Se consideró el cálculo de las pérdidas de carga desde el acumulador hasta el punto más lejano del sistema.

Tramo A-B, véase a detalle en tabla 10.

$$D = 168.3 \text{ mm}$$

$$Q_n = 4452.1 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P_i = 6,976 \text{ Bar.}$$

- Largo del tramo: 60 m.
- Cantidad de Tees: 2 Tees lineal con una longitud equivalente de 6 m.
- Cantidad de codos: 4 codos de 90 ° y 3 codo de 45 ° con una longitud equivalente de 41,4 m.
- Uniones: 2 uniones con una longitud equivalente de 0,8 m.

Por lo tanto,

$$L_t = 36 + 5,4 + 6 + 0,8 = 48.2 \text{ m}$$

(Longitud equivalente seleccionada a partir de la figura 12)

Por lo que, utilizando la ecuación 10:

$$6,97^2 - P_f^2 = 76,35 \times \frac{108,2 \cdot 4756,1^{1,875}}{168,3^5} \rightarrow \rightarrow \rightarrow P_f = 6,95 \text{ bar}$$

La pérdida de presión en el tramo A-B es:

$$\Delta P_{Tramo A-B} = 6,976 - 6,95 = 0,03 \text{ bar}$$

A continuación se presentan los valores de las pérdidas de cargas desde el acumulador hasta los puntos principales de consumo.

Tabla 10. Resumen análisis de caídas de presión.

Tramo	D. Nominal (pulg)	Largo (m)	Accesorios (m)	Largo total (m)	Q (Nm3/h)	P inicial [Bar]	P final [Bar]	Caída presión [Bar]
A-Á	6"	12	66,4	78,4	4756,1	7	6,98	0,024
AB	6"	60	48,2	108,2	4452,1	6,976	6,95	0,030
BC	4"	55	53,1	106,1	4237,3	6,95	6,75	0,195
CE	3"	19	15,5	34,5	3459,1	6,75	6,60	0,154
EF	3"	24	43,5	67,5	1859,1	6,60	6,50	0,096
FG	1 1/2"	64	28,6	92,6	625	6,50	6,13	0,368
GM	1 1/2"	24	19,2	43,2	352	6,13	6,07	0,061
CH	1 1/2"	7	7,6	14,6	849,1	6,75	6,65	0,098
CD	1 1/2"	22	15,2	37,2	627	6,75	6,61	0,142
BI	3"	18	22	40	3356,1	6,95	6,78	0,164
IJ	2"	78	24	102	748,2	6,78	6,60	0,179
IK	2"	42	16,5	58,5	291,5	6,60	6,59	0,018

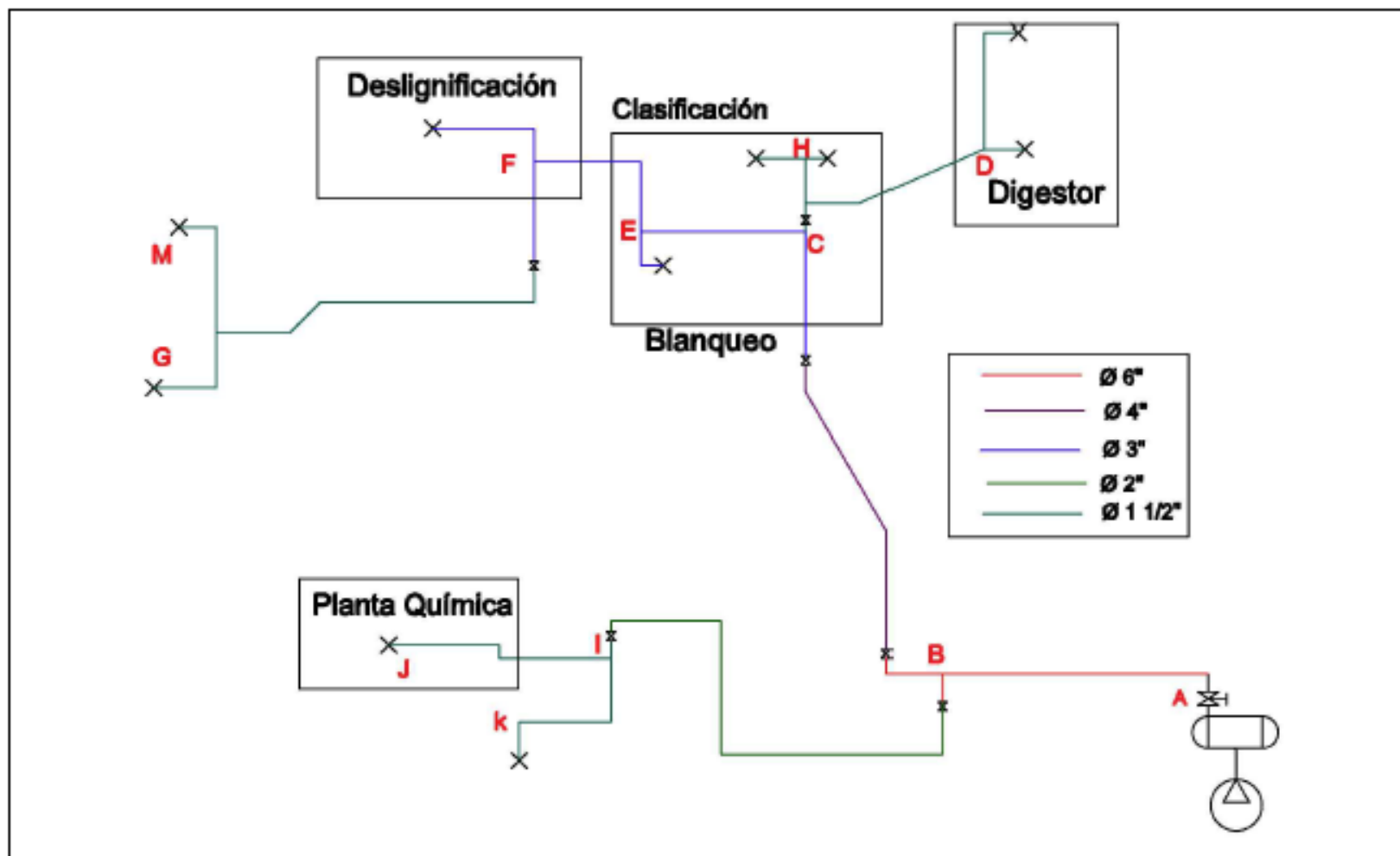


Figura 14. Esquema simplificado de la red de aire comprimido.

Debido a la incorporación de nuevos equipos e instalaciones producto del proyecto de modernización, han surgido nuevos consumidores de aire, principalmente a partir de instrumentos los cuales han afectado la disponibilidad de los compresores, generando como consecuencia, la disminución de presión, con valores cercanos a los 6 bares y en ocasiones inferiores a este. Como se puede ratificar en la tabla 10, esto se produce principalmente en los sectores más alejados de la sala de compresores, fallando con los estándares y requerimientos básicos de los equipos. En la tabla 11, se observan de manera resumida las longitudes equivalentes de los accesorios vistos en la red actual.

Tabla 11. Longitud equivalente de accesorios red actual

<b>AÁ</b>			
Tubería Ø 6"			
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
Tes	3	1	3
codos 90°	9	2	18
codos 45°	1,8	0	0
Válvula de globo	45	1	45
Uniones	0,4	1	0,4
<b>AB</b>			
Tubería Ø 6"			
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
Tes	3	2	6
codos 90°	9	4	36
codos 45°	1,8	3	5,4
Válvula de globo	45	0	0
Uniones	0,4	2	0,8
<b>BC</b>			
Tubería Ø 4"			
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
Reducción	4,1	1	4,1
codos 90°	7,5	3	22,5
codos 45°	1,5	1	1,5
Válvula de globo	25	1	25
<b>CE</b>			
Tubería Ø 3"			
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
Reducción	2,6	1	2,6
codos 90°	6	2	12
Uniones	0,3	3	0,9
<b>EF</b>			
Tubería Ø 3"			
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	1,2	1	1,2
codos 90°	6	7	42
Uniones	0,3	1	0,3

<b>FG</b>	Tubería Ø 1 1/2"		
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	0,6	2	1,2
codos 90°	3	8	24
Uniones	0,1	4	0,4
Tes	1	2	2
Reducción	1	1	1
<b>GM</b>	Tubería Ø 1 1/2"		
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	1,3	0	0
codos 90°	4,5	4	18
Uniones	0,1	2	0,2
Tes	1	1	1
<b>CH</b>	Tubería Ø 1 1/2"		
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	0,6	1	0,6
codos 90°	3	2	6
Uniones	0,1	0	0
Tes	1	1	1
<b>CD</b>	Tubería Ø 1 1/2"		
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	0,6	2	1,2
codos 90°	3	4	12
Uniones	0,1	0	0
Tes	1	2	2
<b>BI</b>	Tubería Ø 3"		
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	0,6	2	1,2
codos 90°	6	3	18
Uniones	0,1	2	0,2
Reducción	2,6	1	2,6
<b>IJ</b>	Tubería Ø 2"		
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	1,3	2	2,6
codos 90°	4,5	4	18
Uniones	0,2	2	0,4
Tes	1,5	2	3
<b>IK</b>	Tubería Ø 2"		
Accesorios	Longitud equivalente (m)	Cantidad	Total
codo 45°	1,3	1	1,3
codos 90°	4,5	3	13,5
Uniones	0,2	1	0,2
Tes	1,5	1	1,5

#### 4.5 Cálculo de condensado

Para poder determinar la cantidad de agua que existe dentro de la red de aire comprimido, se utilizaron los fundamentos teóricos vistos en el capítulo 3, ecuación 7. Para este cálculo son necesarios los datos de entrada del compresor y los datos de salida del enfriador. Este punto, es una de las observaciones de gran relevancia por los problemas que puede ocasionar a los equipos una mala identificación de cuanto es el condensado disponible en las líneas.

##### Entrada del compresor n° 2

- Humedad relativa: 52 %
- Temperatura bulbo seco: 20 °C
- Presión: 1 Bar
- Caudal nominal: 2264 Nm<sup>3</sup>/h
- Densidad del aire: 1,204 kg/m<sup>3</sup>

##### Salida del enfriador

- Humedad relativa: 100 %
- Temperatura bulbo seco: 9 °C
- Presión: 7 Bar
- Caudal nominal: 2264 Nm<sup>3</sup>/h

Al aumentar la presión del aire producto de la acción del compresor, no es posible utilizar la tabla psicométrica para la presión definida a la salida del enfriador (7 bar), es por esta razón que se utilizó el software EES para poder obtener la humedad absoluta. A continuación en la tabla 12 se presenta el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 12. Resultados Software EES.

Punto	Presión (bar)	T.B.S (°C)	Wr %	Densidad kg/m <sup>3</sup>	$\omega_1 \left( \frac{\text{kg v. a}}{\text{kg a. s}} \right)$
1	1	20	53,6	1,198	0,00779
2	7	9	100	8,638	0,001021

Para poder calcular los datos en la entrada del compresor, se utilizó la carta psicométrica, determinando el valor de la humedad específica del aire a la presión atmosférica normal. De igual manera, se comprobó el valor obtenido por carta con los resultados obtenidos en EES, los diagramas asociados a dichos estados, se presentarán en anexo D.

El contenido de agua, según la tabla psicométrica es:

$$\omega_1 = 0,00779 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

Luego, se realizó la diferencia entre las humedades específicas, obteniendo el total del condensado producido, en kg de vapor de agua por kilo de aire seco, como se aprecia a continuación:

$$\omega_1 - \omega_2 = 0,00779 - 0,001021 = 0,006769 \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

#### ♦ Cantidad de agua condensada

Para determinar el caudal de agua condensada, en litros por hora, es necesario realizar el siguiente análisis utilizando los fundamentos teóricos mencionados en el capítulo 3, ecuación 9:

$$\dot{M} = \rho * \dot{V}$$

$$\dot{M} = [0,006769] \left( \frac{\text{kg v. a}}{\text{kg a. s}} \right) * 1,198 \left( \frac{\text{kg a. s}}{\text{m}^3} \right) * 2264 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 18,35 \left( \frac{\text{L}}{\text{h}} \right)$$

Por lo tanto, la diferencia entre la cantidad de agua que se produce en el proceso de compresión y que es posible retener en el paso por el enfriador es de 18,35 (L/h), que sería finalmente el condensado que se debería eliminar a través de los purgadores.





Figura 16. Sistema de filtrado y purgadores



Figura 15. Conjunto actuador.

En el segundo piso del área de blanqueo, se encuentran dispuestos los filtros que impiden la llegada de impurezas y en donde se purga el condensado proveniente de las líneas principales. En el área mencionada, se ubican tres sistemas de filtrado con sus respectivas purgas, como se puede apreciar en la figura 16. Estos están compuestos, por 10 REVERSE ULTIPOR FILTER de la marca PALL y en los costados se ubican unas válvulas de corte, donde se purga entre material particulado (partículas corroídas producto del acero carbono) y condensado.

En el apartado cercano a los consumidores, se encuentran los posicionadores que ayudan a que las válvulas lleguen a la posición correcta para dirigir el aire. Estos presentaban en ocasiones fallas, donde el obturador no se movía, debido a que se trababa con partículas de corrosión que llegaban hasta ese punto. En esos casos, era necesario que el operario lo limpiara de forma manual para poner en funcionamiento nuevamente el equipo.

## Capítulo V: “Diagnóstico y Propuestas”

Posterior al análisis realizado en el área de fibras, en términos de consumo de caudal por cada sub área en específico y las pérdidas de carga principales, se adoptaron posibles mejoras donde se presentaba mayor consumo de aire comprimido. Específicamente, el área a mejorar es deslignificación, presentando equipos de gran tamaño y consumo.

Dentro de los tipos de disposición de redes, para esta área se realizará una disposición de aire comprimido cerrada, ayudando a poder distribuir de manera uniforme el aire comprimido por esa área y confirmar una presión constante alrededor de este anillo de aire.

Uno de los puntos importantes del porque elegir este tipo de disposición, es la facilidad que entrega en labores de mantenimiento, aislando sectores específicos del área para ser intervenidos sin el agravante de afectar la producción, lo cual era ocasionado hoy en día.

En conjunto al trabajo realizado con ingeniería, confirmando lo propuesto por ellos en estudios realizados previamente a mi llegada a la planta, pudieron ser reafirmados en este estudio asociados a la pérdida de presión que aquejaba los puntos más alejados de la red de aire. Se trabajó en la propuesta de reemplazo para un compresor que presentaba múltiples fallas y que hace años daba señales de haber llegado al final de su vida útil.

### 5.1 Nuevo compresor para reemplazo de compresor 1

Hoy en día no hay capacidad para dejar compresores fuera de servicio para realizar las mantenciones rutinarias por horas de operación, las cuales son necesarias para un buen servicio, a menos que presentaran fallas imprevistas, lo que implicaría dejar maquinarias sin funcionamiento. Sumado a esto, el término de vida útil del compresor N° 1 que presenta fugas, recalentamiento de sus componentes, y está discontinuado de repuestos para su mantención.

♦ Selección de compresor

En este apartado se incluyen dos grandes tipos de compresores, los que utilizan aceite (con filtros) y los exentos de aceite (oil free). El primero de estos presenta un costo de inversión inicial menor, pero un mayor costo de energía, mantención y una alta probabilidad de contaminación. Por otro lado, en los oil free se garantiza aire exento de aceite y un flujo sin contaminación, por lo que la decisión final se encontraba entre los siguientes modelos: un GA315 y un ZR315 respectivamente.

Es en este contexto, donde la planta requería el cumplimiento de la nueva norma ISO 8573-1 (2001), donde esta última introdujo un standard para medir los vapores de aceite. Una nueva clase (clase 0) fue introducida para cubrir un requerimiento más estricto de calidad. En resumen la nueva norma quedaría como se observa a continuación en la tabla 13:

Tabla 13. Clases y concentraciones totales de aceite en  $\text{mg}/\text{m}^3$  de acuerdo a norma ISO 8573-1.

<b>Clase</b>	<b>Concentración total aceite (aerosol, líquido, vapor) <math>\text{mg}/\text{m}^3</math></b>
<b>0</b>	<b>0 aceite, 0 riesgo</b>
<b>1</b>	<b><math>\leq 0,01</math></b>
<b>2</b>	<b><math>\leq 0,1</math></b>
<b>3</b>	<b><math>\leq 1</math></b>
<b>4</b>	<b><math>\leq 5</math></b>

En el caso de elegir un compresor de aceite más filtros, para ISO 8573- clase 1, esta elección produciría un impacto en la pérdida de carga del compresor en aproximadamente 2,6 bar. En la figura 17 se observan los componentes requeridos en compresor GA315 el cual desempeña su labor con aceite.

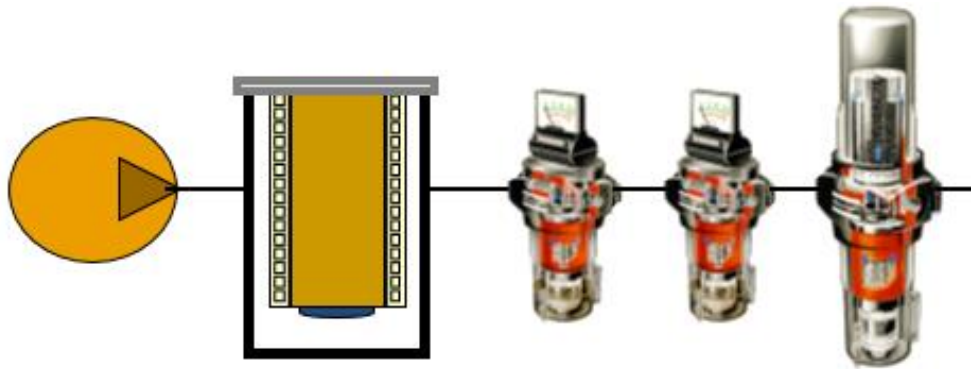


Figura 17. Disposición de filtros en compresor GA315.

Tabla 14. Pérdidas de carga generadas por los filtros del compresor GA315.

	Separador	DD	P	QP	
Pérdida de carga máxima bar	1	1	1	0,49	
Pérdida de carga inicial bar	0,096	0,096	0,096	0,096	
Promedio de vida útil bar	0,75	0,75	0,75	0,35	<b>Total=2,6</b>

Eso representa una diferencia de 2,6 bares, que corresponde a 108.8 kW para un flujo de 44,7 m<sup>3</sup>/min, considerando una compresión politrópica con n =1,3 entre un GA315 y un ZR315 que eran los modelos en estudio.

$$108.8 \text{ kW} \times 8.760 \text{ hrs/año} \times \$34 / \text{kW-h} = \$32.404.992/\text{año}$$

Por los costos que posee una instalación de esas características (GA315), en términos de gastos energéticos y en cuanto a la pérdida de calidad del aire suministrado a la red, es que se eligió finalmente el **ZR315 VSD**, véase la figura 18.



Figura 18. Compresor ZR315 VSD.

El principio de funcionamiento de este compresor, se puede ver ilustrado en la figura 19.

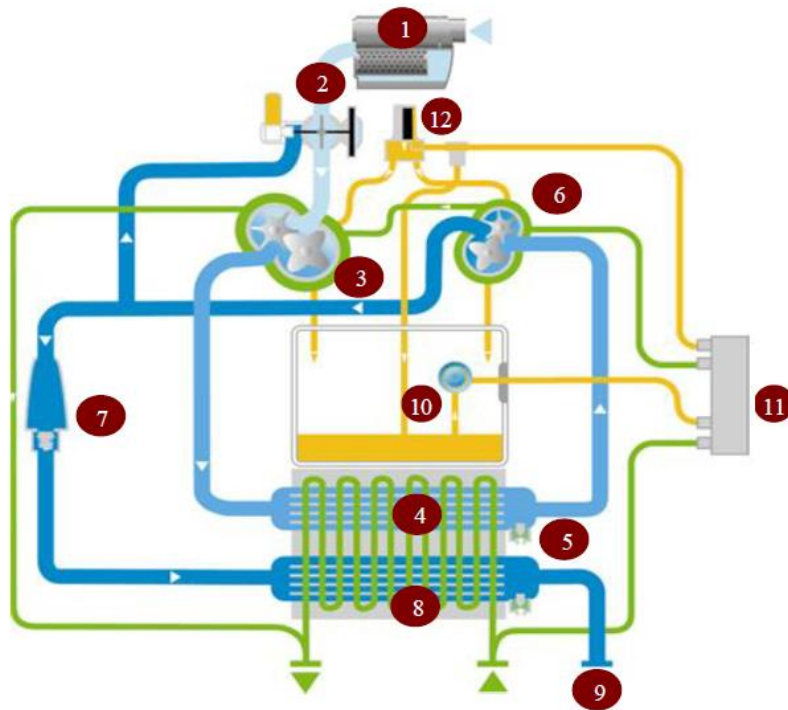


Figura 19. Principio de funcionamiento del ZR 315.

El aire (línea azul) se aspira al compresor a través del filtro de entrada (1) donde el aire se limpia. Posterior a eso, el flujo pasa a través de la válvula de estrangulación (2) con una válvula de venteo integrada que se ocupa de la regulación todo/nada.

En el primer ciclo de compresión (3), la presión de aire se eleva hasta la presión intermedia, tras lo cual el aire se enfría en el refrigerador intermedio (4). Un sistema de separación de humedad trabaja con el flujo proveniente del refrigerador intermedio, para luego entrar en la etapa de alta presión (6). En esta etapa, la presión es elevada a su presión final, pasando desde el amortiguador de pulsaciones con válvula antirretorno integrada (7), hasta el refrigerador posterior (8) donde se enfría y la humedad es separada y evacuada respectivamente. Finalmente, el aire comprimido abandona el compresor a través de la conexión de salida (9).

Respecto al flujo amarillo, corresponde a la trayectoria del aceite dentro del motor, donde la bomba de aceite (10) aspira el aceite del cárter y es bombeado a través del refrigerador de aceite (11) y un filtro de alta eficiencia (12) para poder suministrar aceite limpio y frío a los rodamientos y engranajes; el aceite retorna después a la caja de engranajes.

♦ Ubicación en sala de compresores.

El compresor n° 7 quedó establecido entre los compresores n°6 y n°2, además presenta un secador de aire integrado, como se puede visualizar en la figura 20 y 21 respectivamente. .

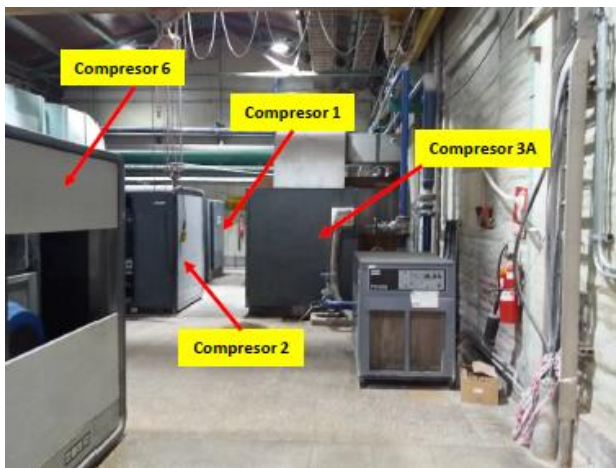


Figura 20. Ubicación compresor ZR315.



Figura 21. Secador de aire integrado.

A través de la nueva inclusión a la sala de compresores, este nuevo ZR315 VSD reemplazará al antiguo compresor n° 1 (ZR4), que se encontraba presentando fallas en los últimos meses tiempo que ha llegado al fin de su vida útil. Debido a esto, la batería de los compresores tendrá un flujo total con un aumento del **3%**.

Tabla 15. Resumen de los datos de la nueva sala de compresores.

Compresor	Modelo	Ubicación	Consumo actual (CFM)	Consumo proyectado (CFM)	Aumento Capacidad
1	ZR4	1° Piso	1.476	1.772	20%
2	ZR250	1° Piso	1.539	1.539	
3A	GA160	1° Piso	939	939	
3B	GA160	2° Piso	939	939	
4	ZR250	1° Piso	1.539	1.539	
5	ZR250	1° Piso	1.539	1.539	
6	ZR315 VSD	1° Piso	1.772	1.772	
<b>Total</b>			9.743	10.039	3%

### 5.2 Configuración de la nueva red

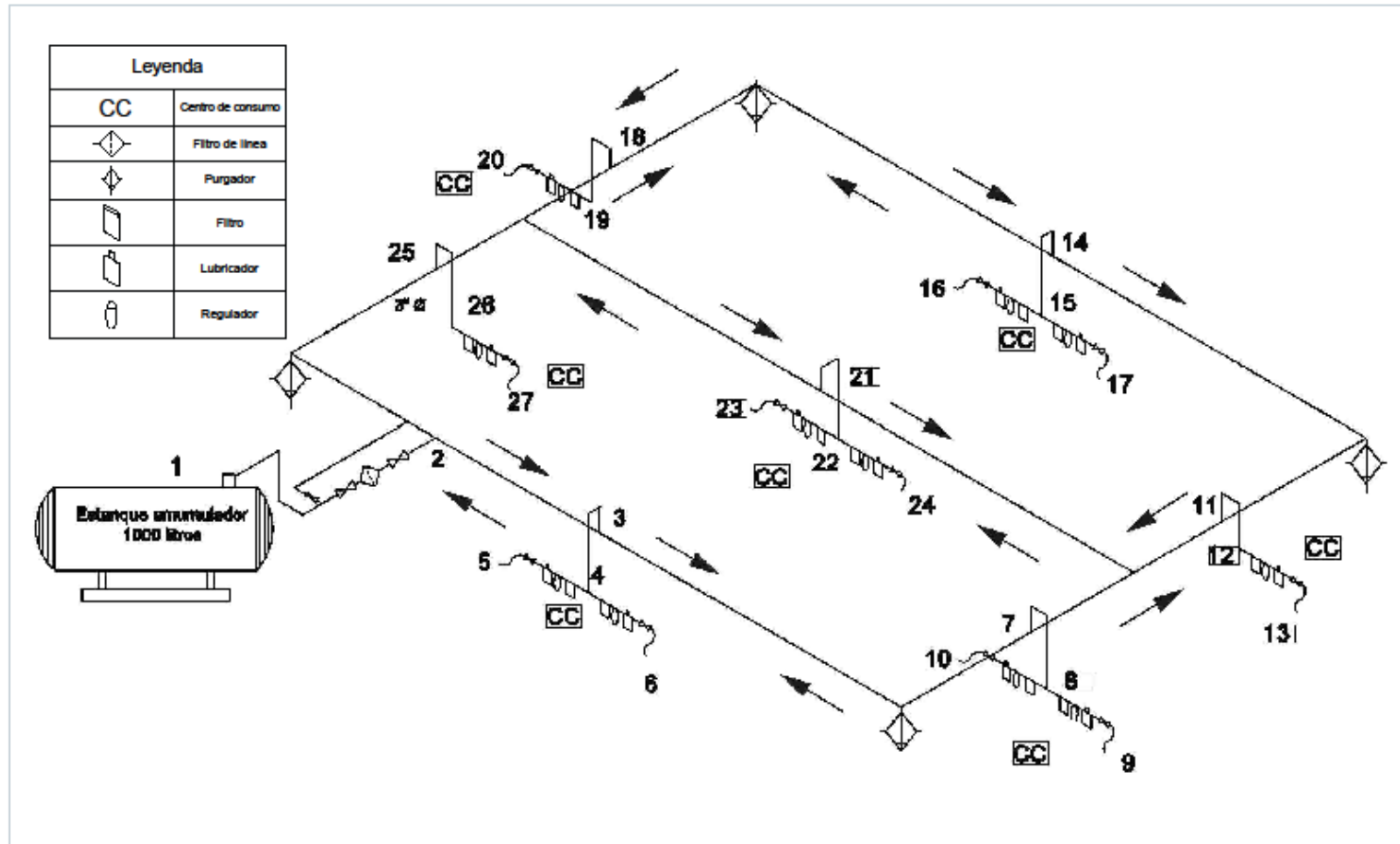


Figura 22. Nueva disposición de red



Posterior al diseño de la red, se debieron efectuar los respectivos cálculos que presentaría esta nueva disposición. A continuación en la tabla 16 se aprecian un análisis detallados de cada tramo.

Tabla 16. Análisis de la nueva disposición de red

Tramo	Tipo red	Flujo efectivo [lt/s]	Largo total [m]	P entrada [Bar]	DP [Bar]	P salida [Bar]	Diámetro [mm]	Diámetro nominal [pulg]
1-2	Distribución	516	12	6,5	0,017	6,48	88,9	3"
2-3	Distribución	516	6	6,48	0,060	6,42	60,3	2"
3-4	secundarias	516	6	6,42	0,186	6,24	48,3	1 1/2"
4-5	mangueras	516	8	6,24	0,502	5,74	42,4	1 1/4"
4-6	mangueras	516	6	6,24	0,373	5,86	42,4	1 1/4"
3-7	Distribución	516	12	6,42	0,122	6,30	60,3	2"
7-8	secundarias	516	6	6,30	0,189	6,11	48,3	1 1/2"
8-9	mangueras	516	9	6,11	0,581	5,53	42,4	1 1/4"
8-10	mangueras	516	8	6,11	0,513	5,60	42,4	1 1/4"
7-11	Distribución	516	10	6,30	0,103	6,20	60,3	2"
11-12	secundarias	516	6	6,20	0,193	6,01	48,3	1 1/2"
12-13	mangueras	516	9	6,01	0,592	5,41	42,4	1 1/4"
11-14	Distribución	516	11	6,20	0,116	6,08	60,3	2"
14-15	secundarias	516	6	6,08	0,196	5,89	48,3	1 1/2"

15-16	mangueras	516	9	5,89	0,606	5,28	42,4	1 1/4"
15-17	mangueras	516	5	5,89	0,328	5,56	42,4	1 1/4"
14-18	Distribución	516	8	6,08	0,086	6,00	60,3	2"
18-19	secundarias	516	6	6,00	0,199	5,80	48,3	1 1/2"
19-20	mangueras	516	6	5,80	0,403	5,39	42,4	1 1/4"
18-25	Distribución	516	8	6,00	0,087	5,91	60,3	2"
25-26	secundarias	516	6	5,91	0,202	5,71	48,3	1 1/2"
26-27	mangueras	516	10	5,71	0,701	5,01	42,4	1 1/4"
25-2	Distribución	516	12	6,48	0,121	6,36	60,3	2"
7-21	Distribución	516	18	6,30	0,187	6,11	60,3	2"
21-22	secundarias	516	6	6,11	0,195	5,92	48,3	1 1/2"
22-23	mangueras	516	10	5,92	0,673	5,25	42,4	1 1/4"
22-24	mangueras	516	8	5,92	0,532	5,39	42,4	1 1/4"
18-21	Distribución	516	12	6,11	0,128	5,99	60,3	2"
25-21	Distribución	516	15	6,11	0,161	5,95	60,3	2"
11-21	Distribución	516	14	6,11	0,150	5,96	60,3	2"

### 5.3 Componentes de la nueva red de aire

Es necesario definir los accesorios y componentes que deben ser seleccionados para el área seleccionada:

- Estanque acumulador
  - Filtros de línea
  - Purgadores
  - Dimensionamiento
  - Disposición de tomas
- ◆ Selección de purgadores de condensado

Para evitar la reducción en la vida útil de todos los dispositivos y equipos neumáticos, es de gran importancia que la mayor parte del agua o cualquier otra partícula que no debería estar en el proceso, sea removida del aire seco.

Una forma de dar solución a la problemática anterior, es la implementación de un sistema de purgación de agua automática, que pueda drenar la cantidad de agua existente en las líneas de distribución, asegurando la continuidad operativa de la planta.

Se seleccionaron los purgadores electrónicos de condensado de la marca Kaeser, de la serie ECO-DRAIN (ver figura 23), presentado en el catálogo (véase Anexo I). Para el modelo en específico, se deben considerar variables, tales como:

- ✓ Requerimientos de aplicación específica (conexiones, drenaje, campos de aplicación).
- ✓ Normas para instalaciones y equipos (rango de presión, tipo de conexión).
- ✓ Parámetros de servicios (caudal máximo por línea, variaciones de carga, etc.)

Los trabajadores del área solo disponían de purgadores manuales para eliminar el condensado, estimando intervalos de tiempo para el drenaje y dejando otras actividades de forma secundaria.

Los nuevos purgadores seleccionados, se dispondrán con una configuración específica de acuerdo a las necesidades, esta es:

- ◆ Cada cuatro (4) horas / 30 segundos de purga de condensado.



Figura 23. Purga Eco Drain

- ◆ Disposiciones de tomas.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, las cañerías secundarias deben estar conectadas desde la parte superior de la cañería principal, véase car, disminuyendo de manera sustancial el condensado que llegaría a los equipos. Realizar la conexión desde la parte inferior, solo produciría que el condensado formado al interior de la cañería, descendiera por gravedad afectando de manera directa los equipos consumidores.

Para realizar un correcto dimensionamiento de esta toma de aire, o bifurcaciones de línea secundaria a línea de servicio deben ser calculadas según el diámetro de la tubería como se muestra en la figura 24. Además se instalarán válvulas de paso para poder cerrar el flujo, en diferentes puntos determinados.

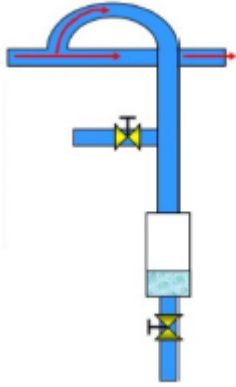


Figura 25. Toma de aire cuello de ganso. Fuente: Instituto Jovellanos

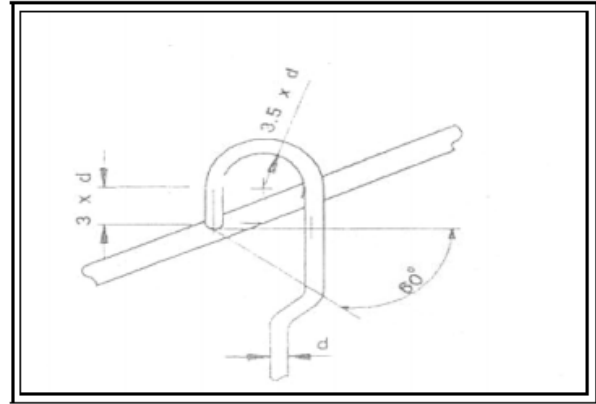


Figura 24. Cálculo de cuello de ganso

Fuente: Instituto Jovellanos

◆ **Inclinación de la red**

Es importante mencionar, que cuando el circuito presenta una disposición de aire comprimido cerrada, la pendiente en los conductos es nula. Esto es producto de lo incierto sobre el sentido de circulación, ya que éste dependerá de los consumos y por lo tanto la pendiente carece de sentido. Por tal razón, sólo se puede utilizar el circuito cerrado cuando se trata el aire a la salida del compresor con equipos secadores.

◆ **Selección de cañerías**

Para el respectivo cálculo del diámetro de las cañerías que se utilizarán en la nueva disposición, se tendrán en consideración las siguientes variables:

- ❖ Presión de funcionamiento: 6,5 bar
- ❖ Caudal : 1859,1 Nm<sup>3</sup>/h
- ❖ Caída de presión : 0,04 bar (condición ideal)
- ❖ Largo de cañería: 142 m

El área de deslignificación, es atravesada por una línea principal que pasa por sobre los equipos con una dimensión de 3", desde donde salen las respectivas líneas secundarias. En la tabla 16 se puede apreciar el dimensionamiento por tramo obtenido.

#### ◆ Selección de Filtros

Es conveniente disponer de los filtros de línea previos a los puntos de consumo, con motivo de adecuar perfectamente el sistema de filtrado a los valores admisibles en cuanto a partículas o algún rastro de aceite, así como el vapor condensando antes de que este alcance el punto final de consumo.

El tipo de selección, depende de la demanda presente en la línea y los requerimientos de filtración como se mencionaba. El tipo de equipo utilizado requiere los más altos niveles de filtración, especificados en el catálogo de la empresa Kaeser. Según este último, las características del filtro son las siguientes:

- Tamaño de las partículas filtrantes  $> 0,1 \mu\text{m}$
- Carga máxima de humedad en entrada:  $1 \text{ g/m}^3$

Para las condiciones presentadas, el filtro elegido es el MicroFiltro Fino FE.

La presente propuesta de filtrado se verá complementada con lo disponible en planta, que se ubica en un área cercana a la propuesta. Este último, cuenta con un sistema filtrante de 10 (diez) filtros, específicamente el REVERSE ULTIPOR FILTER de la marca PALL destinados por área, que serán una de las barreras importantes que impedirán la llegada de material particulado a los consumidores.

#### ◆ Manifolds

Es recomendable la instalación de Manifolds, donde se encuentren instalados 3 o más equipos neumáticos conectados a una línea secundaria en común, como por ejemplo, el área propuesta en este caso se encuentra compuesta por múltiples actuadores lineales que presentan el mismo ramal.

## 5.4 Levantamiento

Se realizó un levantamiento completo desde la sala de compresores, siguiendo las líneas principales y secundarias hasta los puntos de consumo de mayor importancia. En algunos casos, se encontraron falencias que serán detalladas a continuación:

### ◆ Tomas sala de compresores

En la sala de compresores, donde se encuentran ubicados los 7 compresores hasta el momento, se encontraron deficiencias en las tomas desde las líneas que salen desde los compresores. Como se ha mencionado con anterioridad, las tomas de servicio o bajantes nunca deben hacerse desde la parte inferior de la tubería, sino por la parte superior a fin de evitar que el condensado descienda por la misma tubería. Justamente este problema presentaban las conexiones que iban desde los compresores hasta la línea de aire que recorre la sala de compresores, es así como los compresores #1,2,3,4,5,6 están instalados bajo este tipo de disposición. Debido a la mala instalación, es que el condensado baja por la misma tubería, acumulándose en una válvula, para posteriormente ser vaciado de forma manual.

Debe ser una prioridad que en las futuras adquisiciones de compresores con sus respectivas instalaciones de piping, estas sean realizadas de manera correcta (véase figura 25), como se realizó en las últimas conexiones provenientes desde el compresor # 7 (ver Anexo E).

La tomas y conexiones en las bajantes se realizarán lateralmente colocando en su parte inferior un grifo de purga o un drenaje automático.

### ◆ Falta de ventilación

Actualmente según lo recopilado en registros e información presente en la empresa, la sala presenta deficiencias de ventilación y refrigeración de los equipos, lo que ocasiona que los compresores no funcionen adecuadamente frente a los cambios de temperatura presentes en verano, con caídas por sobre temperatura.

#### ♦ **Filtros de aire de la sala de compresores**

Los filtros de pared existentes están saturados, apreciable en el Anexo E, lo cual genera un aumento de la caída de presión y por consecuencia una disminución de caudal de aire de ventilación que ingresa a la sala, en ocasiones cuando esto ocurre, se abre la puerta principal lo que ocasiona el ingreso de aire con polución.

#### ♦ **Refrigeración de aire de compresores**

El aire de refrigeración que presentan los compresores, es evacuado al exterior a través de ductos horizontales con uno o más codos, ocasionando pérdida de carga sobre el diseño del equipo, afectando de manera directa el caudal y por consecuencia el equipo no se refrigera adecuadamente. Además, es habitual que se abran las puertas del compresor lo que produce un aumento en términos de ganancia térmica en la sala, lo cual genera un colapso en la temperatura de ingreso a los equipos en verano. Además, al presentar una falta de aislación en el ductor, esto produce ganancias térmicas extras en la sala.

#### ♦ **Designación norma NCh19**

Esta norma establece un sistema común para ayudar en la identificación de los fluidos conducidos en sistemas de tuberías. El uso de esta norma, proporciona una mayor seguridad y disminución de las causas de error, confusión o inoperancia en casos de emergencia.



Tabla 17. Clasificación de materiales y designación de colores.

Clasificación	Color de fondo	Color de letras
Materiales de alto peligro inherente		
Líquidos o gases radioactivos	Amarillo Púrpura	Negro Amarillo
Materiales de bajo peligro inherente		
Líquidos Gases	Verde Azul	Blanco Blanco
Materiales de protección y combate de incendios		
Agua, espuma, CO <sub>2</sub>	Rojo	Blanco

En algunos puntos de la línea, se encontraron cañerías que por el paso de los años la pintura estaba en proceso de descascaramiento u otras por el simple hecho de ser nuevas, no poseían la respectiva identificación con la que deben contar las líneas de aire comprimido (azul).

♦ **Material cañerías**

El material de las tuberías de aire comprimido es un factor importante, tanto en su instalación como para mantener la condición operativa de la red y de la planta. Al ser una planta de aproximadamente 60 años, los estudios y componentes han variado en gran medida durante el transcurso de la planta. Debido a esto, las líneas principales de la red están fabricadas de acero al carbono, material de moda en los años 60, facilitando la corrosión y acumulación de moho en las tuberías afectando de manera directa a los equipos consumidores.

## Capítulo VI: “Evaluación de costos”

Para llevar a cabo una evaluación de costos, es necesario establecer parámetros de comparación e identificar costos y beneficios, medirlos y valorarlos comparablemente. Lo cierto es que existen muchas fórmulas financieras empleadas para analizar qué tan oportuno puede ser un proyecto para una empresa, independiente del área en el que opere o del tipo de producto al que se aluda. En este caso en particular se utilizó payback, determinando el número de períodos de retorno de la inversión.

### 6.1.3 Payback

El payback o plazo de recuperación, es un criterio para evaluar inversiones, definido como el período de tiempo requerido para recuperar el capital inicial de una inversión. Por medio de este indicador, se puede estimar el número de períodos que se demora en recuperar el dinero desembolsado al comienzo de una inversión.

### 6.2. Pérdidas por falla y mantenimiento

Para determinar el beneficio en el análisis de costos, se realizó una estimación la cual fue respaldada por acontecimientos ocurridos a lo largo de un año, esta información está respaldada en anexo H.

- Es necesario por planificación realizar al menos una vez al año mantención a cada uno de los compresores. Eso conlleva una pérdida de tiempo anual, que se traduce en pérdidas de producción en toneladas.
- Se estima que por lo menos uno de estos equipos falla al año, traduciendo de la misma manera ese tiempo de normalización en pérdidas de producción.
- Por mantención de equipos, se estima que se pierde sólo un 70% de producción porque se puede ejecutar algunas en la Parada General de Planta (PGP).

- Se consideró una mantención anual de equipos, por un valor de US\$ 120.000.

Tabla 18. Pérdida por falla y mantenimiento.

			MANTENCION EQUIPOS (cada 8.000 horas)		FALLA IMPREVISTA DE EQUIPO	
<b>SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE PLANTA.</b>			Tiempo anual	Pérdida de producción anual	Tiempo normalización	Pérdida producción
Equipo	Capacidad cfm	Impacto en el proceso frente a indisponibilidad de compresores.	días	ton	días	ton
Producción	212	ton/día				
Máquina 15	112	ton/día				
Máquina 12	100	ton/día				
Compresor 1 (sin secador)	1.300	Ante la falla de este compresor, se debe dejar F/S Máquina 15.	0,5	66,7	1,0	112
Compresor 2 (sin secador)	1.500	Cualquiera de estos compresores que falle significa dejar F/S máquinas papeleras 12 y 15.	0,7	142,0	2,0	424
Compresor 4	1.500		0,7	142,0	2,0	424
Compresor 5	1.500		0,7	142,0	2,0	424
Compresor 6	1.700		1,0	212,0	2,0	424

En la tabla 18 se presentan los tiempos que demora en la mantención cada uno de los compresores, asociado a su respectiva pérdida de producción. Además, se puede visualizar el tiempo de normalización de un equipo, cuando presenta fallas imprevistas.

### 6.3. Beneficio por ahorro

Luego de haber definido, las toneladas por pérdida de producción debido a mantenimiento y producto de una falla imprevista, esta debe ser transformada a un valor monetario para ser ingresada en el flujo de caja. Para esto, hay que tener la siguiente consideración:

- Margen de utilidades: 260 US\$/ton

De acuerdo a este indicador de conversión, las pérdidas por mantención y falla pueden ser visualizadas en la tabla 19. Finalmente, el beneficio total quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Beneficio total} = 128.284 + 110.240 = \$238.524 \text{ US\$/año}$$

Tabla 19. Beneficio por ahorro.

MANTENCION EQUIPOS (cada 8.000 horas)		FALLA IMPREVISTA DE EQUIPO		
Pérdida de producción anual [Ton]		Pérdida producción [Ton]		Se estima que uno de estos equipos podría fallar en el año
Por mantención de equipos (se estima que se pierde sólo un 70% de producción porque se pueden ejecutar algunas en PGP.	493,4	Por falla de equipo	424	Pérdida de producción Ton/año
	128.284		110.240	US\$/año

#### 6.4 Detalles de inversión

Para determinar los costos, se consideraron los siguientes puntos desde la adquisición hasta la puesta en marcha. En la tabla 20, se aprecia el costo en US\$ de cada segmento. El detalle de cada segmento, se encuentra en el Anexo C.

Tabla 20. Detalles de inversión.

Detalles Inversión		Valor (US\$)
<b>Ingeniería</b>	Ingeniería instalación equipo y piping.	30.360
<b>Adquisiciones</b>	Piping para nuevo compresor PRV	12.000
	Total materiales mecanicos y civiles	8.450
	Nuevo compresor	208.000
<b>Montaje de equipos</b>	Modificaciones piping existente para nuevo compresor PRV.	12.000
	Instalación sistema eléctrico y de control nuevo equipo compresor y secador.	12.000
<b>Sub total</b>		282.810
<b>Puesta en marcha</b>		6.000
<b>Total</b>		<b>288.810</b>

### 6.5 Resultados del estudio económico

Finalmente, a través de los indicadores de análisis y una tasa de impuesto del 12%, se determinó que el proyecto es viable, siendo recuperada la inversión casi al final del segundo año

Tabla 21. Resultados criterios económicos.

<b>Tasa de descuento</b>	12%
<b>Payback años</b>	2,8

## Capítulo VII: “Conclusiones”

La red de aire comprimido de una planta con tantos años de servicio como CMPC Pulp Planta Laja ha hecho que múltiples equipos, espacios y accesorios presenten un notorio deterioro. Debido a ello, la empresa se ha propuesto ajustar e implementar mejoras en el proceso, garantizando el cumplimiento continuo de la planta.

En primera instancia, se realizó de manera satisfactoria el levantamiento neumático, para establecer los parámetros en términos de distribución y consumo. Una vez finalizado el estudio de la demanda de aire comprimido efectuado en el área de fibras, se presentaron diversas consideraciones, en donde, un 10% representó las pérdidas por fuga y el 20% restante fue para futuras ampliaciones ratificando el funcionamiento del sistema. A través del cálculo de pérdidas de carga se observó una caída de presión fuera de los valores admisibles en líneas de aire comprimido, perjudicando de esta forma el rendimiento del sistema.

Posterior a eso, se propuso un rediseño para mejorar el área que presentó un mayor consumo y que dentro de sus registros manifestó dificultades o fallas por la falta de presión. Esta nueva red presenta una disposición cerrada, tipo anillo de aire, reutilizando parte de los componentes ya existentes en la instalación y seleccionando acero inoxidable para las nuevas cañerías, entre otros componentes de la red. Dentro de las opciones, se posicionó como la mejor alternativa el anillo, prometiendo mantener una distribución más uniforme del aire comprimido, evitando pérdidas de presión y teniendo la facultad de poder sin mayor complejidad ejecutar labores de mantenimiento, dejando estas aisladas permitiendo así no afectar la zona productiva.

Dentro de las falencias más significativas que pudieron ser apreciadas al momento de realizar las inspecciones en terreno fueron las fallas en los equipos consumidores, en donde, una de ellas se repetía de manera constante en la mayoría de las áreas. Gran parte de las fallas que presentaron los posicionadores neumáticos, se debieron a la presencia de partículas de corrosión las cuales eran desprendidas desde las cañerías principales. Esto debido a que con el transcurso del tiempo, han sufrido un ataque electroquímico producto del entorno que las rodea, y en este caso en particular fue como consecuencia del condensado producido y acumulado a lo largo de los años. Lo anterior tiene directa relación con la antigüedad operativa de la planta, ya que las líneas principales que salen desde

la sala de compresores tienen aproximadamente 60 años desde que fueron instaladas siendo fabricadas con el material más utilizado para dicha época el cual fue acero al carbono.

Al momento de iniciar este proyecto, el sistema de alimentación de aire en la planta contaba con una batería de seis compresores más dos compresores auxiliares sin secadores, para poder satisfacer así las necesidades de aire de instrumentos y servicios de todas las áreas. Producto de la incorporación de nuevos equipos e instalaciones del proyecto de modernización, surgieron nuevos consumidores de aire principalmente provenientes de instrumentos que han afectado la disponibilidad de compresores, disminuyendo la presión que normalmente se encontraba sobre 6 bar, haciéndola en ocasiones disminuir cercana a los 6 bar, información que fue ratificada mediante el análisis realizado. En ese momento, no había capacidad para dejar compresores fuera de servicio para realizar las mantenciones rutinarias por horas de operación, las cuales eran necesarias para conseguir un buen servicio, a menos que presentaran fallas imprevistas, lo que implicaría dejar maquinarias sin funcionamiento. Sumado a esto, había llegado a su fin la vida útil del compresor N°1 en el cual se visualizaban fugas, recalentamiento de sus componentes, y estaba discontinuado de repuestos para su mantención. Enfocados en solucionar y mejorar estos problemas, se comenzó a desarrollar el proyecto dedicado a la adquisición de un nuevo compresor, en reemplazo del ya mencionado.

Se desarrolló una evaluación económica en base a los eventos ocurridos en la planta, siendo el proyecto viable y aconsejable. Respecto al período de recuperación, el indicador Payback entrega una estimación cercana a los 3 años. Finalmente, dentro de los beneficios esperados, se encuentra el poder contar con una operación estable en los compresores, realizando las mantenciones periódicas dentro de los plazos recomendados por el fabricante, para así poder evitar detenciones imprevistas que atenten contra la continuidad operativa de la planta

## Capítulo VIII: “Bibliografía”

- Aceros y sistemas hidráulicos de México, (ASHM). (2018). Secadores de aire de tipo refrigeración. Recuperado de: <http://www.ashm.mx/blog/secadores-de-aire-de-tipo-refrigeracion/> (Accedido el 28 de septiembre de 2019).
- Atlas Copco. (2017). Refrigeración: Compresores refrigerados por agua frente a los refrigeradores por aire. Recuperado de: <https://www.atlascopco.com/es-cl/compressors/wiki/compressed-air-articles/cooling-system-water-cooled-and-air-cooled> (Accedido el 25 de septiembre de 2019).
- Barroso, J, Losada, T, Ayarzagüena, B, Cámara, A, Yagüe, C. (2012). Presión Atmosférica. Recuperado de: <http://meteolab.fis.ucm.es/meteorologia/presion-atmosferica--2> (Accedido el 20 de septiembre).
- Carnicer, E. Royo, E. (1996). Aire Comprimido, Teoría y cálculo de las instalaciones. Madrid: Paraninfo.
- CMPC Celulosa. (2015). Memoria Anual CMPC Planta Laja. Recuperado de: <https://www.cmpccelulosa.cl/CMPCCELULOSA/interior.aspx?cid=526&..> (Accedido el 20 de septiembre de 2019).
- Colombero, E. (2013). Introducción al aire comprimido y estudio de redes de aire. Recuperado de: <https://tecnicayateismo.wordpress.com/2013/06/13/introduccion-al-aire-comprimido-y-estudio-de-redes-de-aire/> (Accedido el 03 de octubre de 2019).
- Compañía levantina de reductores, (CLR). (2019). Actuadores lineales o rotativos. Recuperado de: <https://clr.es/blog/es/actuadores-lineales-rotativos/> (Accedido el 12 de septiembre).
- EDIGAR. (2017). Calidad del aire comprimido. Recuperado de: <https://maquinasyequipos.com.ar/calidad-del-aire-comprimido/> (Accedido el 05 de octubre de 2019).
- Fernández, P. (2008). Compresores. Universidad de Cantabria. Recuperado de: [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/compresores-y-ventiladores.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/compresores-y-ventiladores.pdf) (Accedido el 15 de septiembre de 2019).
- Gutiérrez, A. (2007). Evolución de la producción de celulosa en Chile. Recuperado de: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/evolucion-de-la-produccion-de-celulosa-en-chile-1990-2006-2> (Accedido el 23 de septiembre de 2019).
- Hidalgo, J. (2008). Tratado de enología. Tomo 1. Segunda edición. Madrid: Mundi-Prensa.

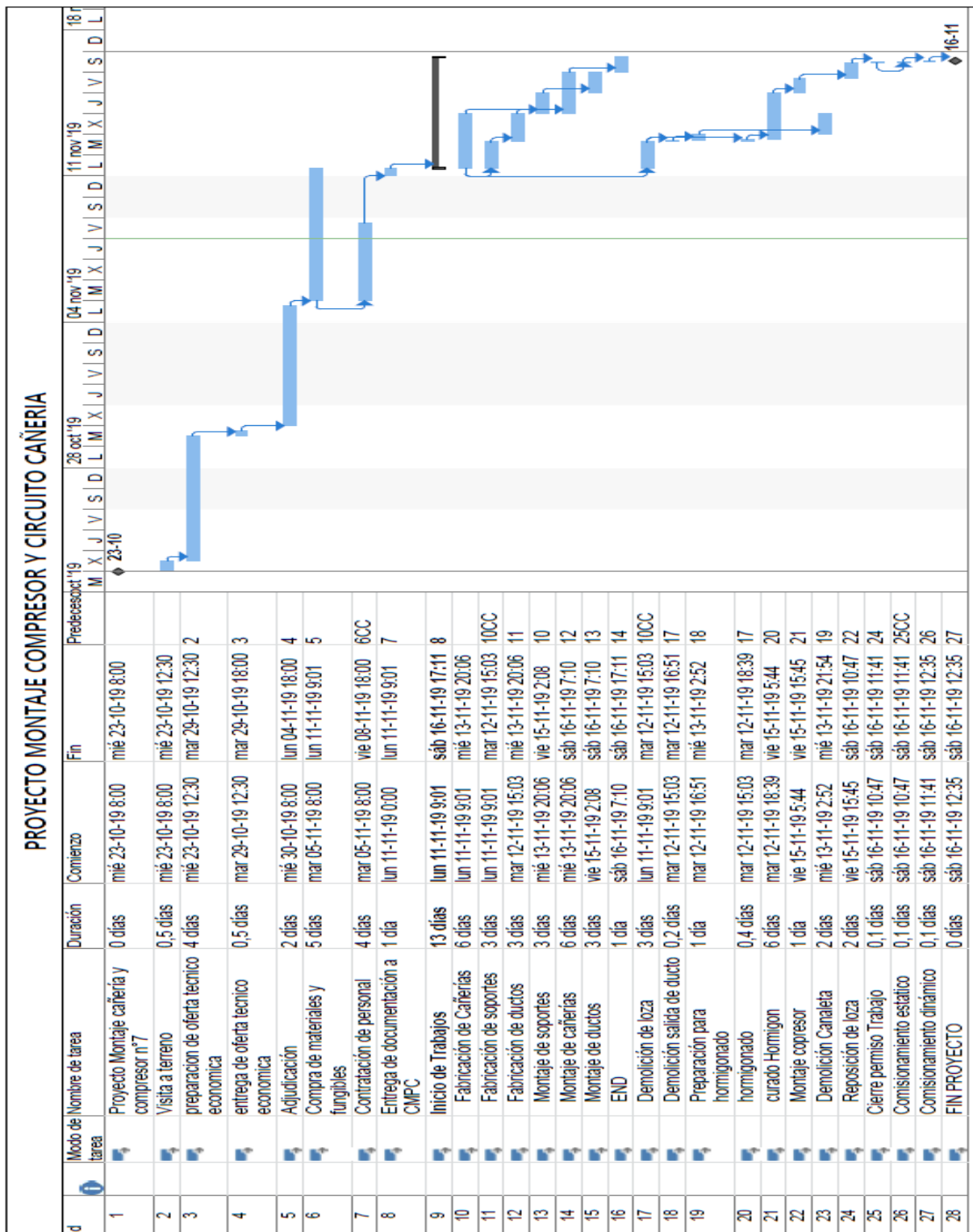


- Jiménez, D. Soto, C. (2014). Análisis de la red de aire comprimido Planta de Harina Camanchaca S.A. Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Chile.
- Luraschi, M. (2007). Análisis de cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Melo, R (2001). Tecnología de la Celulosa y el Papel volumen II. Concepción: Talleres dirección de docencia.
- MESSER Ibérica. (2012). Gases del aire. Recuperado de: <https://www.messer.es/gases-aire> (Accedido el 25 de septiembre de 2019).
- Monografías. (2019). Redes de aire comprimido. Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos16/redes-de-aire/redes-de-aire.shtml> (Accedido el 12 de octubre).
- Mundo Automatizado. (2012). Red de distribución neumática. Recuperado de: <http://mundoautomatizado.blogspot.com/2014/11/red-de-distribucion-neumatica.html> (Accedido el 03 de octubre de 2019).
- Mundo compresor: portal industrial. (2019). Cómo funciona un secador de adsorción. Recuperado de: <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/como-funciona-secador-adsorcion> (Accedido el 12 de octubre de 2019).
- Mundo compresor: portal industrial. (2019). La filtración en las líneas de aire comprimido. Recuperado de: <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/filtracion-lineas-aire-comprimido> (Accedido el 28 de septiembre de 2019).
- Osorio, R. (2015). Leyes del gas ideal. Recuperado de: <http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/ocw/mod/page/view.php?id=261> (Accedido el 17 de septiembre de 2019).
- Perales, M. (2014). Puntos de eliminación de condensado. Recuperado de: <https://prezi.com/nqa9mf7xy4mb/puntos-de-eliminacion-de-condensado/> (Accedido el 22 de octubre de 2019).
- Regional de la Energía de Castilla y León, (EREN). (2012). Manual técnico de aire comprimido Valladolid. Editorial: Junta de castilla y León.
- Rodríguez, H. (2012). Diseño de sistemas de aire comprimido. Recuperado de: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn201.html> (Accedido el 25 de septiembre de 2019).

- Sánchez, R. (2012). Guía de laboratorios: Termodinámica aplicada. Recuperado de: <https://adecca.ubiobio.cl/session/login> (Accedido el 29 de septiembre).
- Szklanny, S. (2012). Curso Aire comprimido para instrumentos: Problemas y soluciones. Recuperado de: <http://www.svsconsultores.com.ar/index.php/2017/10/30/articulo-aire-de-instrumentos-problemas-y-soluciones/> (Accedido el 12 de octubre de 2019).
- Tecnología para la industria. (2018). Sistema de control de aire comprimido para mejorar la eficiencia en la planta. Recuperado de: <https://tecnologiaparalaindustria.com/sistema-de-control-de-aire-comprimido-para-mejorar-la-eficiencia-en-la-planta-2/> (Accedido el 21 de octubre de 2019).
- Turmo, E. (1999). NTP 510: Válvulas de seguridad, selección. Recuperado de: [https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp\\_510.pdf/98694ac4-8c0b-4c4c-b30b-29fd880121e7](https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_510.pdf/98694ac4-8c0b-4c4c-b30b-29fd880121e7) (Accedido el 28 de octubre de 2019).

## Capítulo IX: “Anexos”

### Anexo A. Carta Gantt proyecto de montaje del compresor nuevo y su circuito de cañería.



**Anexo B.** Cotización realizada para el nuevo compresor de CMPC Planta Laja.

## ZR 315 VSD (FF) 512-1712 CFM 8,6bar

COMPRESOR DE AIRE DE TORNILLO ROTATIVO EXENTO DE ACEITE DE ATLAS COPCO, CON ACCIONAMIENTO DE VELOCIDAD VARIABLE, CON O SIN SECADOR FRIGORÍFICO INTEGRADO

El ZR 315 VSD (FF) de Atlas Copco mantiene en marcha la producción de la forma más fiable y eficiente en las condiciones más difíciles. Los primeros compresores de aire del mundo con la certificación CLASE 0 según ISO 8573-1 edición 2, 2010; garantizan un aire totalmente exento de aceite para proteger sus procesos y productos finales.



### COTIZACIÓN

Número de cotización: 387954  
 Fecha: 24 Agosto 2018  
 4/19

### Resumen de precio


N° Parte	Descripción	Cant	Precio Unitario	Precio Total (USD)
8154177809	ZR315VSDA2-FF-8.6-50	1	241.815 USD	241.815
<b>TOTAL NETO (IVA no incluido) USD</b>				<b>241.815</b>


### Pago y condiciones de entrega

Válido hasta:	23 Septiembre 2018
Términos de pago:	Cash On Delivery (COD)
Plazo de entrega:	14 a 16 semanas segun OC
Incoterms y Ubicación:	DAP - Santiago

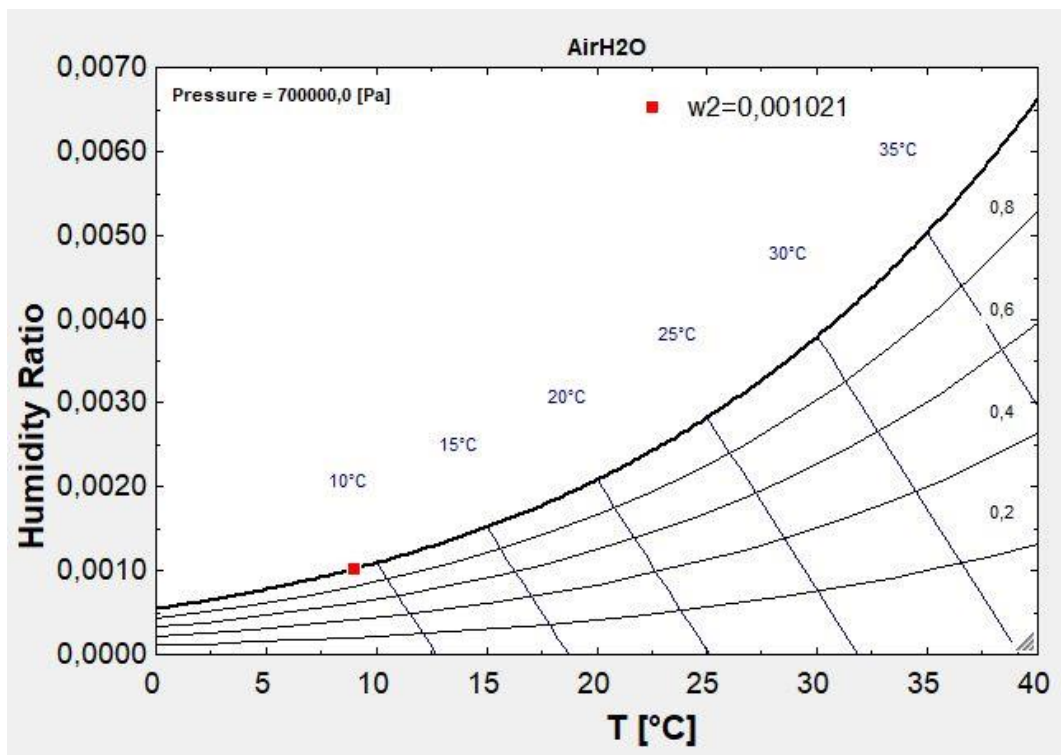
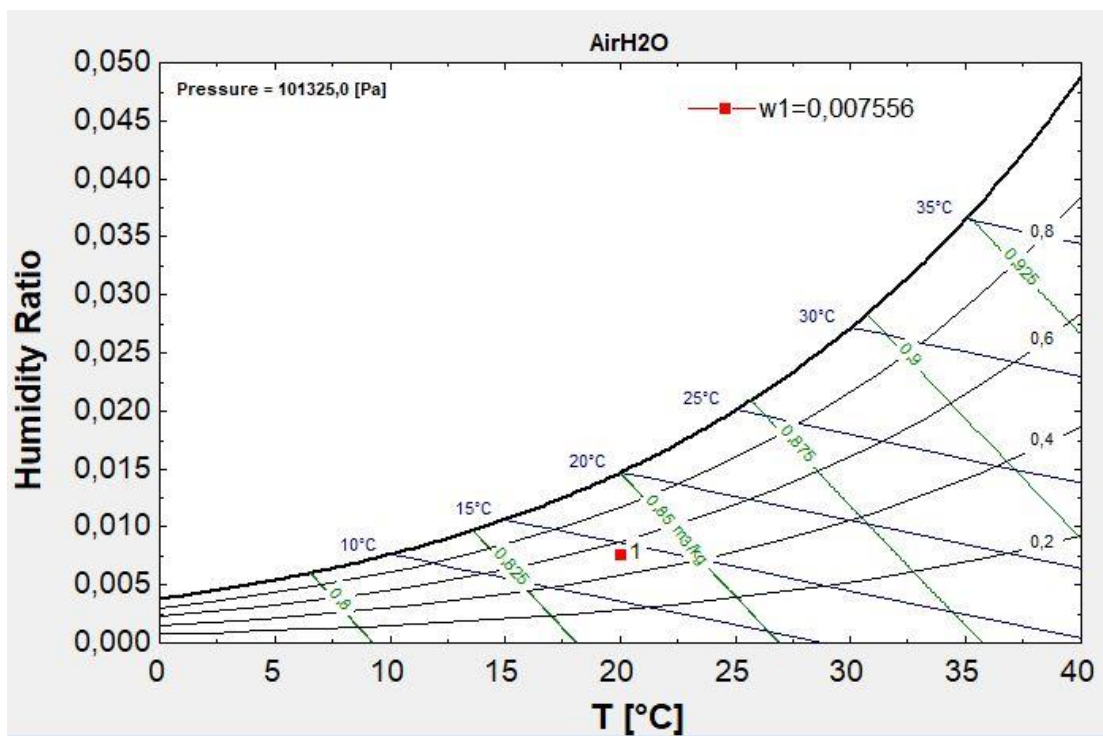
**Anexo C. Detalle de costos asociados al compresor N° 7**

<b>MATERIALES CAÑERIAS, ESTRUCTURAS</b>							
PROYECTO		: Montaje Compresor N°7			FECHA:	17-10-2019	
EMPRESA		: CMPC Laja			REV:	0	
LUGAR		: Area Alimentacion y Distribucion Energia Electrica					
N°DOCUMENTO		: 2001-044-04-00140-FN-001					
Item	Cant.	Uni.	Componente	Marca	Modelo	Uni\$	Total \$
<b>CAÑERIAS Y FITTINGS</b>							<b>\$ 5.887.450</b>
1	1	GL	CAÑERIAS Y FITTINGS (VER DETALLE)			\$ 2.923.050	\$ 2.923.050
2	10	cu	UNIONES SOLDADAS DIAMETRO 4"			\$ 122.400	\$ 1.224.000
3	2	cu	UNIONES SOLDADAS DIAMETRO 3"			\$ 91.800	\$ 183.600
4	8	cu	UNIONES SOLDADAS DIAMETRO 2"			\$ 61.200	\$ 489.600
5	8	cu	UNIONES SOLDADAS DIAMETRO 0,5"			\$ 45.900	\$ 367.200
6	1	GL	SOPORTES PARA CAÑERIAS			\$ 700.000	\$ 700.000
<b>ESTRUCTURA PLATAFORMA</b>							<b>\$ 1.200.000</b>
7	200	kg	ESTRUCTURA DUCTOS			\$ 6.000	\$ 1.200.000
<b>OBRAS CIVILES</b>							<b>\$ 450.000</b>
8	1	M3	HORMIGON FUNDACION COMPRESOR			\$ 450.000	\$ 450.000
<b>EQUIPOS</b>							<b>\$ 132.925.000</b>
9	1	cu	COMPRESOR			\$ 132.925.000	\$ 132.925.000
						\$ -	\$ -
						\$ -	\$ -
						\$ -	\$ -
						\$ -	\$ -
						\$ -	\$ -
						\$ -	\$ -
						\$ -	\$ -
						\$ -	\$ -
<b>TOTAL</b>							<b>\$ 140.462.450</b>

		<b>Costos hora - hombre Mecanico</b>			
<b>PROYECTO</b>	:	140			
<b>EMPRESA</b>	:	CMPC Laja			
<b>LUGAR</b>	:	Area Alimentacion y Distribucion Energia Electrica			
<b>Total personal</b>		<b>9</b>			
<b>Días trabajo</b>		<b>10</b>			
				<b>Costo total HH</b>	<b>\$ 9.600.000</b>
<b>Cargo</b>		<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad HH</b>	<b>P/U Unidad</b>	<b>Costo</b>
Supervisor		1	150	\$ 12.000	\$ 1.800.000
Capataz		1	150	\$ 10.000	\$ 1.500.000
Prevencionista		1	150	\$ 7.000	\$ 1.050.000
Maestro 1		2	150	\$ 6.500	\$ 1.950.000
Maestro 2		4	150	\$ 5.500	\$ 3.300.000

		<b>Costo gastos auxiliares</b>			
<b>PROYECTO</b>	:	140			
<b>EMPRESA</b>	:	CMPC Laja			
<b>LUGAR</b>	:	Area Alimentacion y Distribucion Energia Electrica			
<b>Total gastos auxiliares</b>					<b>\$ 5.169.000</b>
<b>Ítem</b>		<b>Días</b>	<b>Valor</b>	<b>Cantidad personas</b>	<b>Total</b>
Colacion		15	\$ 4.000	8	\$ 480.000
Alojamiento		15	\$ 7.200	8	\$ 864.000
<b>Ítem</b>		<b>Cantidad</b>	<b>Días</b>	<b>Valor</b>	<b>Total</b>
Arriendo vehículo		1	15	\$ 30.000	\$ 450.000
Grúas					\$ 2.000.000
Andamio (m2)		20	1	\$ 15.500	\$ 310.000
Combustible		10	1	\$ 35.000	\$ 350.000
Oficina		2	5	\$ 7.500	\$ 75.000
Container		1	1	\$ 250.000	\$ 250.000
Baño químico		2	15	\$ 13.000	\$ 390.000

Anexo D. Diagramas software EES.





**Anexo E.** Imágenes Sala de compresores



Figura 28. Aire de instrumento



Figura 26. Cuello de ganso en sala de compresores



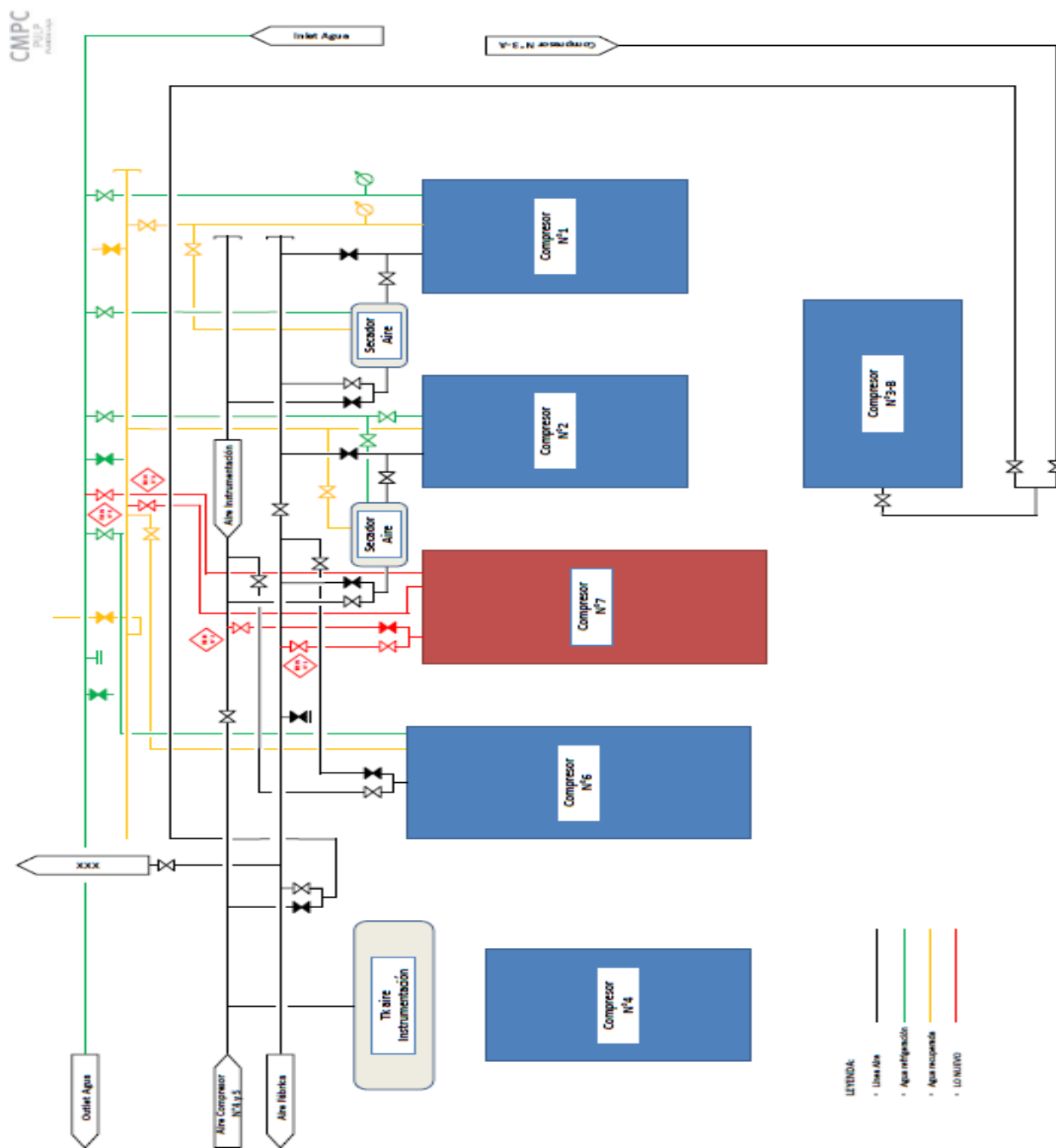
Figura 27. Filtros en sala de compresores

**Anexo F. Caudal de válvulas**

Tabla 22. Caudal de válvulas según actuador

<b>Catálogo de actuadores [L/min]</b>		
VPVL650	650	15,2
VPVL700	700	21,3
VPVL800	800	40
667/30	667/30	0,54
667/35	667/35	0,93
667/40	667/40	0,93
667/45	667/45	1,56
667/50	667/50	1,56
667/46	667/46	2,18
667/60	667/60	2,18
667/76	667/76	2,18
667/70	667/70	3,49
667/87	667/87	3,49
667/80	667/80	4,8
667/100	667/100	12,78
657/30	657/30	0,54
657/34	657/34	0,93
657/40	657/40	0,93
657/45	657/45	1,56
657/50	657/50	1,56
657/46	657/46	2,18
657/60	657/60	2,18
657/76	657/76	2,18
657/70	657/70	3,49
657/87	657/87	3,49
657/80	657/80	4,8
657/100	657/100	12,88
B1C13	B1C13	2,3
B1C6	B1C6	0,33
B1C9	B1C9	0,6
B1C11	B1C11	1,1

**Anexo G. Nueva disposición en sala de compresores.**



CMPC  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

**Anexo H. Detenciones debido a fallas.**

Tabla 23. Detenciones debido a fallas

Área	Fecha inicio		Fecha termino		Causa	Duración
Digestor	17-07-2017	11:20:00	17-07-2017	17:00:00	F/S DIGESTOR Y CLASIFICACION POR BAJA PRESION DE AIRE EN FCA.	5:40:00
Designificación y lavado	17-07-2017	11:20:00	17-07-2017	22:40:00	F/S DESLIG. Y LA PRENSA SUND (POR FALTA DE AIRE PARA LOS INSTRUMENTOS)	11:20:00
Blanqueo	17-07-2017	11:20:00	17-07-2017	21:10:00	BLANQUEO CAE POR FALTA DE AIRE INSTRUMENTO	9:50:00
Área Química	17-07-2017	1:50:00	17-07-2017	3:20:00	FALLA DE COMPRESORES DE AIRE EN ANERGIA	1:30:00
	17-07-2017	11:20:00	17-07-2017	23:59:00	F/S PLANTA POR FALTA DE AIRE EN PLANTA	12:39:00
	18-07-2017	0:00:00	18-07-2017	3:05:00	F/S PLANTA POR FALTA DE AIRE EN PLANTA	3:05:00

Anexo I. Catálogo de componentes Kaeser

[www.kaeser.com](http://www.kaeser.com)

**KAESER**  
COMPRESORES

**Purgadores automáticos de condensado Serie ECO-DRAIN**

para caudales hasta 1700 m<sup>3</sup>/min



# Serie ECO-DRAIN

## Purgadores electrónicos de condensado

El condensado que se forma en todos los sistemas de producción de aire comprimido debe poder evacuarse de manera fiable en todos aquellos puntos donde se acumula para evitar averías y problemas de corrosión. Los purgadores electrónicos de condensado ECO-DRAIN de KAESER KOMPRESSOREN, regulados según el nivel, son ideales para cumplir esta importante tarea.

### Evacuación del condensado sin pérdidas de presión

Los purgadores de condensado ECO-DRAIN procuran una evacuación del condensado segura y sin pérdidas de presión. La fiabilidad del proceso queda garantizada incluso si la formación de condensados sufre oscilaciones fuertes y el condensado contiene muchas impurezas o un alto porcentaje de aceite.

### El estándar Industrial

La gran calidad, seguridad y fiabilidad del ECO-DRAIN lo hacen ideal para el funcionamiento continuo de la industria. Además, hay modelos especiales para aplicaciones concretas, como sistemas con condensados agresivos, zonas con peligro de congelación y aplicaciones de alta presión o de vacío. KAESER KOMPRESSOREN le ofrece un ECO-DRAIN adaptado a las necesidades de cada aplicación.

### El ECO-DRAIN en el sistema

Los sistemas de aire comprimido formados por valiosos compresores y componentes de tratamiento exigen purgadores de condensado de alta fiabilidad. Estos deben integrarse perfectamente en el sistema, de manera que los controladores individuales de los compresores (SIGMA CONTROL 2) el controlador maestro (SIGMA AIR MANAGER 4.0) reciban de inmediato sus señales y puedan reaccionar rápidamente para mejorar la seguridad de servicio y conseguir una mayor economía.



La evacuación segura de los condensados debe quedar garantizada en todos los puntos de acumulación de su sistema de aire comprimido. La mejor forma de conseguirlo es utilizar purgadores de condensado regulados electrónicamente.

## Evacuación segura del condensado sin pérdidas de presión



Imagen: ECO-DRAIN 81

www.kaeser.com

## Datos técnicos

Modelo	Presión min. / máx. bar <sub>g</sub>	Zona climática <sup>1)</sup>	Caudal máx. del compresor según la zona climática 1/2/3 m <sup>3</sup> /min	Capacidad máx. del secador 1/2/3 m <sup>3</sup> /min	Capacidad del filtro <sup>2)</sup> máx. 1/2/3 m <sup>3</sup> /min	Campos de aplicación Condensado <sup>3)</sup> a/b	Contacto libre de potencial Contacto	Dimensiones an x prof x al mm	Peso kg	Alimentación eléctrica
ECO-DRAIN 30	0,9/16	1/2/3	3/2,5/1,5	6/5/3	30/25/15	a/b	-	164 x 65 x 118	0,8	95...240 VAC ±10% (50...60 Hz) / 100...125 VDC ±10%
ECO-DRAIN 31	0,9/16	1/2/3	6/5/3,5	12/10/7	60/50/25	a/b	*	179 x 74 x 130	0,9	
ECO-DRAIN 32	0,9/16	1/2/3	12/10/7	24/20/14	120/100/70	a	*	211 x 74 x 157	1,6	
ECO-DRAIN 32 CO	0,9/16	1/2/3	12/10/7	24/20/14	120/100/70	a/b	*	211 x 74 x 157	1,6	230 V / 1 Ph / 50-60 Hz
ECO-DRAIN 12	0,9/16	1/2/3	8/6,5/4	16/13/8	80/65/40	a	*	158 x 65 x 141	0,8	
ECO-DRAIN 12 CO	0,9/16	1/2/3	8/6,5/4	16/13/8	80/65/40	a/b	*	158 x 65 x 141	0,8	
ECO-DRAIN 13	1,0/16	1/2/3	35/30/20	70/60/40	350/300/200	a	*	212 x 93 x 162	2,0	
ECO-DRAIN 13 CO	0,9/16	1/2/3	35/30/20	70/60/40	350/300/200	a/b	*	212 x 93 x 162	2,0	
ECO-DRAIN 14	0,9/16	1/2/3	150/130/90	300/250/180	1500/1300/900	a	*	252 x 120 x 180	2,9	
ECO-DRAIN 14 CO	0,9/16	1/2/3	150/130/90	300/250/180	1500/1300/900	a/b	*	252 x 120 x 180	2,9	
ECO-DRAIN 16 CO	0,9/16	1/2/3	1700/1400/1000	3400/2800/2000	-	a/b	*	290 x 290 x 290	5,9	
ECO-DRAIN 12 CP PN 63 <sup>4)</sup>	1,2/63	1/2/3	8/6,5/4	16/13/8	80/65/40	a/b	*	146 x 65 x 141	0,9	
ECO-DRAIN 13 CO PN 25 <sup>4)</sup>	1,2/25	1/2/3	35/30/20	70/60/40	350/300/200	a/b	*	197 x 93 x 162	2,2	

<sup>1)</sup> Zona climática: 1 = seco/frío (norte de Europa, Canadá, norte de los EE.UU, Asia Central); 2 = moderado (centro y sur de Europa, algunas zonas de Sudamérica, norte de África);

<sup>2)</sup> 3 = húmedo (regiones costeras del sureste asiático, Centroamérica, Oceanía, regiones del Amazonas y el Congo)

<sup>3)</sup> Instalación detrás del secador

<sup>4)</sup> a = Condensado de un compresor refrigerado por fluido, b = Condensado agresivo

<sup>5)</sup> Para altas presiones

► Para todos los modelos se considera un campo de temperaturas de +1 °C a +60 °C

## Opciones

Para modelos a partir del ECO-DRAIN 12

### Sistema de calentamiento

Protege el ECO-DRAIN de congelación; regulado termostáticamente; para temperaturas ambiente de hasta -25 °C; (no para la versión de alta presión, 63 bar) Conexión eléctrica 230 V / 1 Ph / 50 – 60 Hz, máx. 125 W; equipo suministrado: Barra calentadora, adaptador de conexión, juntas planas.

### Calefacción para tuberías

Protege de congelación las conducciones de entrada y salida; temperaturas desde - 25 hasta + 60 °C; potencia 10 W/ftm; montaje a cargo del cliente; equipo suministrado: caja de toma de corriente, cinta calentadora.

**KAESER**  
**COMPRESORES**

[www.kaeser.com](http://www.kaeser.com)

## Filtros, separadores centrífugos

Flujo volumétrico de 0,58 a 248 m<sup>3</sup>/min





## Datos técnicos

Serie de filtros: FB, FC, FD, FE, FF, FG, FFG - Tamaños de filtro: 6, 10, 18, 28, 48, 71, 107, 138, 177, 221, 185, 283, 354, 526, 708, 885, 1420, 1950, 2480  
 Versiones: "normal" con purgador por flotador - "D" con purgador de condensados controlado electrónicamente según el nivel ECO DRAIN  
 Carcasa de aluminio para filtros de tamaño 6 hasta 221, carcasa de acero para filtros de tamaño 185 hasta 2480

Código de denominación:  
Carcasa del filtro



### Filtros de aire comprimido para máx. 16 bar, temperatura de servicio máx. +66°C

Flujo volum. <sup>*)</sup> m <sup>3</sup> /min FB - FFG	Tamaño del filtro	Toma de aire comprimido FB - FFG	Peso lg (versión normal)					Dimensiones A, B, C en mm (versión normal)					FFG	Altura (para mantenimiento) mm
			FB - FC	FD	FE - FF	FG	FFG	FB - FC	FD	FE - FF	FG			
0,58	6	R 3/8	3,6	3,5	3,6	3,4	7,1	105, 233, 163	105, 306, 224	105, 306, 224	105, 182, 163	210, 306, 224	76	
1,0	10	R 1/2	3,7	3,6	3,7	3,5	7,3	105, 306, 224	105, 306, 224	105, 306, 224	105, 255, 244	210, 306, 224	76	
1,75	18	R 1/2	3,9	3,8	3,9	3,7	7,7	105, 367, 285	105, 367, 285	105, 367, 285	105, 316, 285	210, 367, 285	76	
2,83	28	R 3/4	4,4	4,3	4,4	4,2	8,7	133, 389, 298	133, 389, 298	133, 389, 298	133, 338, 298	266, 389, 298	89	
4,83	48	R 1	4,8	4,7	4,8	4,6	9,5	133, 497, 406	133, 497, 406	133, 497, 406	133, 446, 406	266, 497, 406	89	
7,1	71	R 1 1/2	4,6	4,5	4,6	4,4	9,1	164, 579, 482	164, 579, 482	164, 579, 482	164, 528, 482	328, 579, 482	102	
10,7	107	R 1 1/2	5,1	5,0	5,1	4,9	10,1	162, 693, 596	164, 693, 596	164, 693, 596	164, 642, 596	328, 693, 596	102	
13,8	138	R 2	12,7	12,6	12,7	12,5	25,3	194, 789, 681	194, 789, 681	194, 789, 681	194, 739, 681	388, 789, 681	102	
17,7	177	R 2 1/2	15	14,9	15	14,8	29,9	194, 935, 827	194, 935, 827	194, 935, 827	194, 885, 827	388, 935, 827	102	
22,1	221	R 2 1/2	17,2	17,1	17,2	17	34,3	194, 1091, 983	194, 1091, 983	194, 1091, 983	194, 1040, 983	388, 1091, 983	102	
18,5	185	DN 80	29,9	28,4	29,3	28,6	58,6	350, 1130, 950	350, 1025, 845	350, 1025, 845	350, 1130, 950	700, 1130, 950	610	
28,3	283	DN 80	41,1	37,0	40,1	37,2	78	400, 1205, 1013	400, 1045, 853	400, 1205, 1013	400, 1045, 853	800, 1205, 1013	610	
35,4	354	DN 80	41,8	37,4	40,5	38,1	79,3	400, 1240, 1013	400, 1045, 853	400, 1205, 1013	400, 1045, 853	800, 1205, 1013	610	
52,6	526	DN 100	53,4	48,4	51,5	49,7	101,9	440, 1240, 1023	440, 1085, 868	440, 1240, 1023	440, 1085, 868	880, 1240, 1023	610	
70,8	708	DN 100	70	64,4	66,7	66,2	133,6	535, 1255, 1022	535, 1105, 872	535, 1255, 1022	535, 1105, 872	1070, 1255, 1022	610	
88,5	885	DN 100	71,7	65,4	67,7	67,8	136,2	535, 1255, 1022	535, 1105, 872	535, 1255, 1022	535, 1105, 872	1070, 1255, 1022	610	
142	1420	DN 150	126,5	118,4	121,5	122,4	244,6	600, 1355, 1043	600, 1215, 903	600, 1355, 1043	600, 1215, 903	1200, 1355, 1043	610	
195	1950	DN 150	182,8	171,4	175,9	177,1	353,7	720, 1520, 1183	720, 1245, 908	720, 1520, 1183	720, 1245, 908	1440, 1520, 1183	610	
248	2480	DN 150	237,7	224,4	228,9	231,7	461,3	750, 1540, 1192	750, 1265, 917	750, 1540, 1192	750, 1265, 917	1500, 1540, 1192	610	

#### Factores de corrección

Sobrepresión de servicio	bar	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Factor de conversión para flujo volumétrico		0,38	0,52	0,63	0,75	0,88	1	1,13	1,26	1,38	1,52	1,65	1,76	1,87	2	2,14

Código de denominación:  
Filtro de alta presión



### Filtros de aire comprimido para 48 ó 62 bar

Flujo volum. <sup>*)</sup> m <sup>3</sup> /min	Tamaño del filtro	Toma de aire comprimido	Peso lg					Dimensiones A, B mm					Altura mm	Presión de servicio máx. bar
			FB	FC	FE	FF	FG	FB	FC	FE	FF	FG		
1,75	18	R 1/2	9					371 x 146					300	62
2,83	28	R 1	9					371 x 117					300	62
7,1	71	R 1	12					591 x 117					520	48
14,2	142	DN 65	35					930 x 350					650	48

#### Factores de corrección

Sobrepresión de servicio	bar	7	25	40	64
Factor de conversión para flujo volumétrico		1	3	5	8

\*) Rendimiento total a 7bar de sobrepresión, referido a 1bar abs. y 20°C