

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

## **Re ingeniería Red Neumática Depósito Régimen Las Torres- Zona D**

Trabajo de titulación para optar al Título  
Profesional de INGENIERO DE EJECUCIÓN  
EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Alumno:  
Fabián Felipe Valtierra Flores

Profesor Guía:  
Guillermo Jorge Augusto Valenzuela

2019

## **RESUMEN**

La presente memoria plantea una re ingeniería básica de la red neumática del Depósito Las Torres – Zona D. Donde se realiza una evaluación del sistema en funcionamiento, ya que el taller tuvo una ampliación, sin considerar los nuevos requerimientos de aire comprimido para abastecer los diferentes puntos de trabajo, manteniendo los mismos equipos. A partir de esto, el taller presenta deficiencias en el funcionamiento de sus herramientas, ya que el caudal y la presión de aire son insuficientes para realizar los trabajos de forma simultánea, afectando la productividad del mantenimiento de los buses. Frente a esta situación se vislumbró oportunidades de mejora a través de una re ingeniería básica, ya que el taller que abastece de energía neumática debe tener los equipos adecuados según los requerimientos. Se realiza memoria de cálculos, basada en los principios de mecánica de fluidos y termodinámica, para determinar la nueva red neumática, la que incluye el nuevo caudal de aire requerido por la ampliación del taller, los diámetros y tipo de cañerías, la selección del compresor y selección del tanque de aire. A través de estos cálculos se determina un adecuado funcionamiento de los servicios del taller, lo que corresponden a Desabolladura, Pintura, Vulcanización y Mecánica. A partir de los resultados obtenidos se realiza un presupuesto estimado con los gastos de capital (CAPEX) y costos de operaciones y servicios (OPEX).

Para concluir, se sugiere mantener registros de la memoria de cálculo y los costos mensuales que estos generan, para realizar comparativas y acceder a oportunidades de mejora, evitando una nueva ingeniería básica y todo lo que conlleva.

**Keywords:** Red neumática- Aire comprimido – Caudal – Presión.

## Índice

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 1: ESTABLECER EL ESTADO ACTUAL DE LA RED NEUMÁTICA VERSUS NECESIDADES DE AIRE COMPRIMIDO.</b>	<b>7</b>
<b>1. La Empresa</b>	<b>8</b>
1.1 Zona de Estudio	9
1.1.2 Oportunidad de Mejora	10
<b>1.2 FUNDAMENTOS DEL AIRE COMPRIMIDO</b>	<b>11</b>
1.2.1 Capacidad de aire requerido	13
1.2.2 Nivel de presión requerida	14
1.2.3 Descripción general y componentes de una red de aire comprimido	14
1.2.4 Configuración de las redes de aire comprimido	15
1.2.5 Compresor rotativo de tornillo	17
1.2.6 Proceso de compresión	18
1.2.7 Funcionamiento interno del compresor de tornillo lubricado	19
1.2.8 Regulación del compresor	21
1.2.9 Carga/descarga	21
<b>CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE INGENIERÍA BÁSICA</b>	<b>22</b>
<b>2 Memoria de cálculos.</b>	<b>23</b>
2.1 Caudal estimado de las herramientas	23
2.1.1 Estimación del caudal de aire de la planta	24
2.1.2 Relación de compresión.	25
2.1.3 Proceso Politrópico	25
2.1.4 Temperatura de compresión	26
2.1.5 Calculo de caudal de diseño	26
2.1.6 Bosquejo de la red principal y puntos de conexión	28
2.1.7 Cálculos de diámetro de cañerías y velocidades del fluido	29
2.1.8 Cálculo número de Reynolds	30
2.1.9 Rugosidad relativa de las cañerías	31
2.1.10 Factor de fricción	32
2.1.11 Presión de operación	33
2.1.13 Ecuación de flujo en función de la velocidad	34
<b>2.2 Selección del compresor</b>	<b>37</b>
2.2.1 Selección del tanque acumulador de aire	38
<b>Capítulo 3: EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DEL DISEÑO PRESENTADO</b>	<b>40</b>
<b>3.1 Inversión (CAPEX)</b>	<b>41</b>
3.1.1 Red neumática	41
3.1.3 Instalación	43
3.1.4 Valor estimado de la inversión	43
<b>3.2 Gastos operativos (OPEX)</b>	<b>43</b>

3.2.1 Repuestos	43
3.2.2 Mantenimiento	43
3.2.3 Repuestos requeridos por mantención:	44
3.2.4 Energía	45
3.2.5 Valor estimado de costos operacionales	45
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>47</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>50</b>

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Mapa recorrido Express de Santiago Uno	8
Figura 2. Equipos sala de compresores Zona D, Express de Santiago Uno	9
Figura 3. Taller de mantenimiento Zona D, Express de Santiago Uno	10
Figura 4. Configuración general de un sistema de aire comprimido	12
Figura 5. Diseño de una red abierta	16
Figura 6. Diseño de una red cerrada	16
Figura 7. Diseño de una red interconectada	17
Figura 8. Funcionamiento de la unidad compresora	19
Figura 9. Funcionamiento completo del compresor	21
Figura 10. Bosquejo de la red neumática Depósito Las Torres	28
Figura 11. Diagrama de Moody	32
Figura 12. Curva de Respuesta del Sistema	36
Figura 13. Recta de desplazamiento positivo	37
Figura 14. Curva de funcionamiento	38
Figura 15. Compresor tornillo modelo G7 Atlas Copco	41
Figura 16. Compresor de tornillo Somar modelo SCT1010	42
Figura 17. Tanque acumulador de 1000 litros Schulz	42

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Factor de simultaneidad	23
Tabla 2. Cálculo de caudal base estimado. Elaboración propia	23
Tabla 3. Resultados diámetros y velocidades por tramo	30
Tabla 4. Resultados Número de Reynolds	31
Tabla 5. Resultado rugosidad	31
Tabla 6. Resultados Factor de fricción	33
Tabla 7. Resultados Pérdidas por tramo	34
Tabla 8. Resultado de la ecuación de flujo	35
Tabla 9. Resultados de las ecuaciones en función del caudal al cuadrado	36

## INTRODUCCIÓN

El aire comprimido corresponde al aire que ha sido sometido a presión a través de un compresor, máquina cuya función es aspirar el aire atmosférico aumentando su presión hasta llegar a un valor requerido. En la actualidad, el aire comprimido posee un auge en la industria al ser una fuente de energía y aire acumulado que se puede generar localmente; por su seguridad, además de su facilidad de uso y las múltiples aplicaciones que se le puedan otorgar, entre las que se encuentran el uso en movimiento de maquinaria, sistema de frenos, herramientas neumáticas, sistema de respiración humana, ventilación, procesos neumáticos, entre otros.

La presente memoria plantea una re ingeniería básica para el sistema de aire comprimido de la sala de compresores del Depósito Las Torres Zona-D de Express de Santiago Uno, empresa dedicada al sistema de transporte urbano de la capital, debido a que este depósito fue implementado en un antiguo terminal correspondiente a otra empresa, la cual poseía una menor flota de buses. Al establecer el estado actual de la red neumática se visualiza oportunidades de mejora, ya que Express de Santiago, al tener un mayor requerimiento de mantenciones debido a una mayor cantidad de servicios, expandió la red neumática de su depósito sin realizar un diagnóstico y posterior implementación de una adecuada sala de compresores según la necesidad de esta nueva red, lo que trajo como consecuencia un alto costo energético, reduciendo considerablemente la eficiencia del terminal y aumentando los costos de mantención. La re ingeniería se realizará a partir de los principios de la Termodinámica y Mecánica de Fluidos para determinar un adecuado diseño de la red neumática, evaluando costos del diseño a presentar, el que considera los equipos adecuados, para asegurar un óptimo funcionamiento.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

-Elaborar Ingeniería Básica para el sistema de aire comprimido a fin de que cumplan todas las especificaciones de diseño.

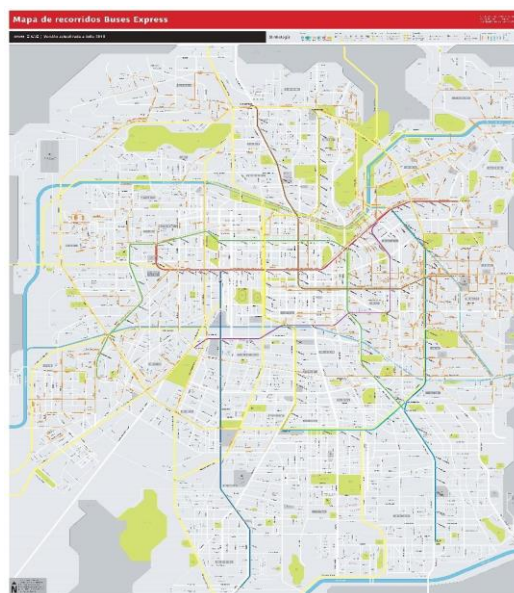
### **Objetivos específicos**

- Establecer el estado actual de la red neumática versus necesidades de aire comprimido.
- Desarrollar una Ingeniería básica.
- Evaluar los costos del diseño presentado.

**CAPÍTULO 1: ESTABLECER EL ESTADO ACTUAL DE LA RED NEUMÁTICA  
VERSUS NECESIDADES DE AIRE COMPRIMIDO.**

## 1. La Empresa

Express De Santiago Uno S.A es una empresa de buses que se incorporó en octubre de 2005 al Sistema de Transporte Urbano de la capital, esta posee una flota operativa de 1.414 buses que opera 72 servicios, su frecuencia de viajes semanales corresponde a más de 80 mil, con presencia en 33 de las 35 comunas de la región metropolitana, movilizandando a más de tres millones y medio de personas a la semana. La operación de esta organización funciona a través de siete depósitos, más el centro de Operación de Flota. Presta servicios a la empresa de transporte público Red a través de un contrato de concesión, la que concluía en octubre del año 2018, pero al incorporar buses nuevos con tecnología menos contaminante fue extendido contractualmente. En octubre de 2018 la empresa Inversiones Alsacia S.A tuvo el fin de su período de concesión, por lo que Express Santiago Uno asumió los 10 primeros servicios dejados de operar por dicha empresa.



**Figura 1.** Mapa recorrido Express de Santiago Uno.  
Fuente: RED (2019).

## 1.1 Zona de Estudio

La zona de estudio corresponde al “Depósito Régimen Las Torres-Zona D” ubicada en Avenida Diagonal Las Torres 2095 comuna de Peñalolén, posee un equipo de 621 trabajadores, quienes le otorgan un funcionamiento de 24 horas al día. El equipo está dividido en 580 choferes y auxiliares, 36 operarios de taller, 4 colaboradores de Recursos Humanos, 1 encargado de infraestructura.

El depósito tuvo una reestructuración del sistema realizada en 2011 por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, que consistía en un cambio de concepto de zonas alimentadoras para dar paso a la creación de las llamadas unidades de negocio. Durante la transición de este concepto, el que se concretó en 2012, la empresa Express Santiago Uno se adjudica los servicios correspondientes a Zona D, la que en ese entonces estaba siendo administrada por la empresa STP Santiago. Express de Santiago Uno hace uso del mismo espacio físico, realizando modificaciones al taller según las necesidades organizacionales. El antiguo taller, operado por STP, estaba compuesto por el área de vulcanización, área de desabolladura, área de pintura y área de mantenimiento mecánica, los que utilizan energía neumática para su funcionamiento, provista a través de la sala de compresores, la que se compone de un compresor primario, compresor secundario, secador de aire por enfriamiento y un depósito.



**Figura 2.** Equipos sala de compresores Zona D, Express de Santiago Uno.  
Fuente: Recopilación de imágenes propias.

### 1.1.2 Oportunidad de Mejora

La modificación del taller de mantenimiento consistió en una ampliación física para disponer de mayor espacio destinado a las mismas áreas de trabajo, ampliando además la red neumática para otorgar los puntos de trabajo necesarios y así dar funcionalidad a la extensión. Lo anterior se llevó a cabo sin realizar las correspondientes modificaciones a la sala de compresores, por lo que no se consideró el nuevo caudal de aire requerido para tal extensión, las dificultades de esto se perciben en la imposibilidad de dar un uso simultáneo a los puntos de trabajo, reduciendo así la eficiencia del taller.



**Figura 3.** Taller de mantenimiento Zona D, Express de Santiago Uno.  
Fuente: Recopilación de imágenes propias.

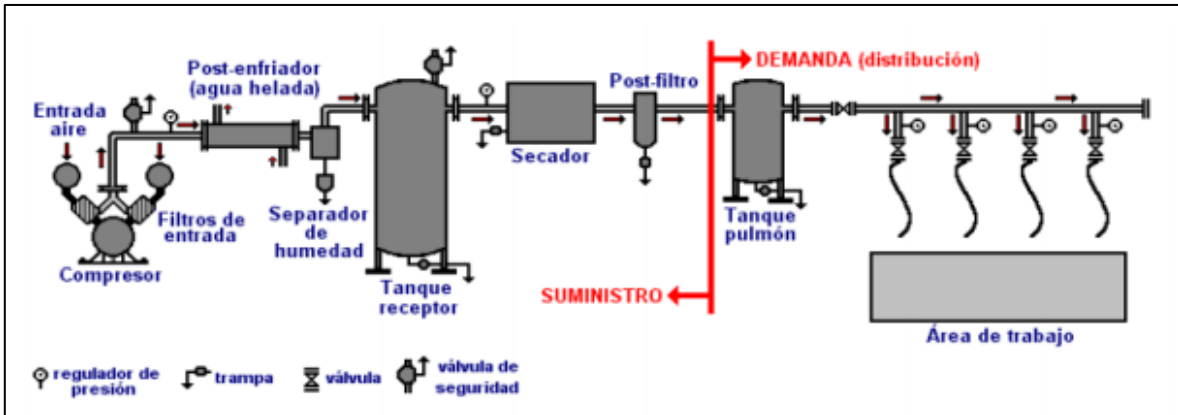
Lo anterior se contrapone con los valores planteados a nivel organizacional, entre los que destacan la Eficiencia y el Servicio, considerándose imprescindible un óptimo funcionamiento en los elementos de mantención para brindar un adecuado servicio frente a la contingencia, de esta forma acoplarse a la misión y visión organizacional “nos mueve ser tu mejor experiencia de viaje”, “ser referentes de excelencia”, donde se debe considerar la relevancia de elementos técnicos, como la adecuada mantención y funcionamiento de sus buses y talleres.

## **1.2 FUNDAMENTOS DEL AIRE COMPRIMIDO**

El aire comprimido es el resultado de aire atmosférico sometido a presión, está compuesto por lo general en un 78% de Nitrógeno, un 21% de Oxígeno y en un 1% de otros gases, físicamente es inodoro, incoloro e insípido.

La presión del aire atmosférico depende de la altura geográfica. Como altitudes de referencia para la presión y la temperatura del aire suelen darse las siguientes:  $P_0 = 1.013 \text{ bar}$  y  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  (condiciones estándar) o  $P_0 = 1.013 \text{ bar}$  y  $T_0 = 0^\circ\text{C}$  (condiciones normales)

Un sistema de aire comprimido se divide en dos partes: el suministro y la demanda. En el suministro es posible encontrar el paquete de compresión, el que está compuesto por el compresor, el motor de éste, depósitos, controladores y equipo de tratamiento de aire, entre los que se encuentra el filtro, secadores, enfriadores, tanques de almacenamiento, entre otras. En la demanda se encuentra el cabezal principal, el que está compuesto por las líneas principales de distribución, lubricadores, válvulas, reguladores de presión, equipo neumático, entre otros. Los elementos identificados, correspondientes a los del suministro y de la demanda, poseen una aplicación específica cuya función es mejorar el desempeño del sistema, por tanto, de debe resguardar su funcionamiento a través de un mantenimiento adecuado.



**Figura 4.** Configuración general de un sistema de aire comprimido.  
Fuente: Paredes (2016).

La calidad del aire comprimido en el punto de consumo (máquina), está definida por tres parámetros:

- Pureza, referida a la humedad y a la suciedad por partículas sólidas contenidas en el aire.
- Presión, referida al valor adecuado y constante.
- Lubricación, de acuerdo al área de aplicación.

La pureza del aire comprimido está influenciada por:

- Calidad del aire de aspiración.
- Filtro de aspiración.
- Tipo de compresor utilizado.
- Mantenimiento del compresor.
- Separador de partículas sólidas contenidas.
- Refrigerador posterior.
- Sistema de distribución de aire (tubería, disposición, etc.).

Todo el aire aspirado por el compresor contiene una cantidad de agua en forma de vapor que depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente. La calidad del aire está determinada por la proporción de humedad y de contaminación (partículas de polvo o aceite)

que permite la aplicación final del mismo. En general, se utilizan 4 niveles de calidad en función de su aplicación. En la industria se utiliza alguno de los cuatro primeros, entre ellos:

- Aire de planta: puede estar relativamente sucio y húmedo. Por sus características, es empleado en herramientas neumáticas y para usos generales.
- Aire para instrumentos. Aire con cantidades de humedad y suciedad moderadas, por lo que es usado en laboratorios, sistemas de aplicación de pintura por rocío o pintura en polvo, controles de climas, etc.
- Aire de proceso. Aire con muy poca humedad y casi nula suciedad; por sus características, es utilizado en la industria química, alimenticia, farmacéutica y electrónica.
- Aire para respiración. Aire sin humedad y totalmente libre de aceite y polvos, por lo que se usa para recargar tanques de equipos de buceo, en hospitales, consultorios dentales, etc.

Es relevante destacar que, a mayor calidad del aire, mayor será el costo para producirlo porque una alta calidad de aire usualmente implica equipo adicional, el cual no únicamente incrementa la inversión del capital inicial, sino que también hace que el sistema global sea más caro de operar en términos de consumo de energía y costos de mantenimiento.

### 1.2.1 Capacidad de aire requerido

La capacidad del sistema de aire comprimido se determina a partir de la suma del consumo promedio que requiere cada una de las herramientas y por la operación de cada proceso de todo el taller, considerando factores de carga de cada uno de éstos. Todo sistema puede presentar alzas de demanda que se pueden solventar a través de tanques de almacenamiento o tanques pulmón; los que serán más efectivos si se localizan lo más cerca posible de donde se requieran estas altas demandas.

### 1.2.2 Nivel de presión requerida

A partir de los requerimientos de presión de cada una de las herramientas, las que generalmente ya han sido probadas por sus fabricantes a dichas presiones, se determinará el nivel de presión que necesita el sistema. Respecto a las presiones requeridas por los diferentes procesos, éstas deben ser especificadas por el ingeniero de proceso. El nivel de presión del sistema se definirá a partir de ambos requerimientos, desde el enfoque energético y de mantenimiento se considera que, a mayor nivel de presión, mayor será el costo. En cambio, cuando se precisa el nivel de presión del sistema, se considerará las pérdidas del sistema a través de las tuberías y accesorios de los equipos adicionales, como filtros, secadores, separadores, etc.

### 1.2.3 Descripción general y componentes de una red de aire comprimido

Una red de aire comprimido corresponde al conjunto de todas las tuberías que inician desde el depósito, instaladas fijamente y acopladas entre sí, y que conduce el aire comprimido a los diferentes puntos de toma para los equipos consumidores individuales.

En la industria, una red de aire comprimido suele contar con 8 dispositivos, los que se describirán a continuación:

1. Equipos de filtración previos al compresor. Estos dispositivos son utilizados para eliminar las impurezas del aire antes de la compresión con el fin de proteger al compresor y evitar el ingreso de contaminantes al sistema.
2. Compresor. Es el encargado de convertir la energía mecánica, en energía neumática comprimiendo el aire. La conexión del compresor a la red debe ser flexible para evitar la transmisión de vibraciones debidas al funcionamiento del mismo.
3. Equipos de enfriamiento del aire comprimido. Los equipos de enfriamiento son la inversión más rentable para reducir las altas temperaturas del aire comprimido que sale del

compresor. Es necesario enfriar el aire a 30°C – 35°C antes de que entre al secador o filtro en el tratamiento posterior del aire comprimido.

4. Depósitos. Almacenan el aire comprimido y equilibran las pulsaciones del aire procedente del compresor, a la vez que suministra una superficie grande de intercambio de calor que permite disminuir parcialmente la alta temperatura del aire luego de la compresión. Los tanques o pulmones tienen como función principal regular el caudal, evitar cambios bruscos en la presión y el asentamiento de partículas y humedad.

5. Equipos de filtración en línea. Se encargan de filtrar y eliminar las partículas de polvo del aire comprimido hasta una calidad adecuada para el promedio de aplicaciones conectadas a la red.

6. Secadores. Se utilizan para aplicaciones que requieren un aire supremamente seco.

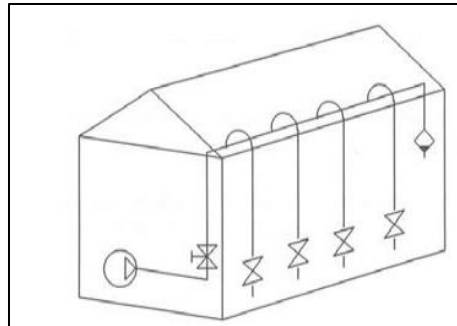
7. Red de conductos. Se pueden dividir en conductos principales, que conectan el compresor con el anillo de distribución, y las tuberías o ramales de distribución, desde los que se alimentan las derivaciones a cada herramienta o punto de consumo.

8. Equipos adicionales. Equipos de purga, unidades de mantenimiento (formadas por filtro, regulador de presión y lubricador), secadores adicionales, instrumentación, etc.

#### 1.2.4 Configuración de las redes de aire comprimido

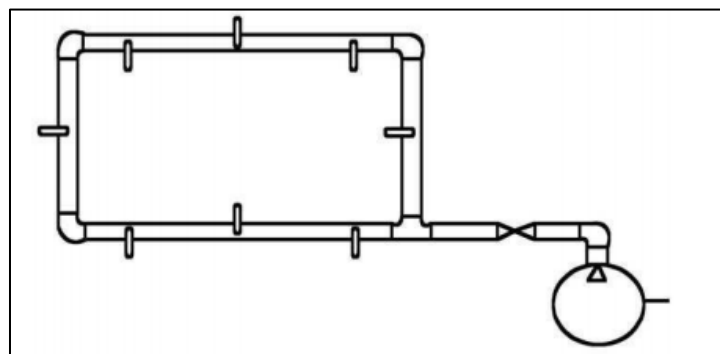
Existen diversas configuraciones para una red de aire comprimido, entre las que de encuentran:

Red abierta: Está constituida por una línea principal, desde la que se desprenden las líneas secundarias y las líneas de servicio. La principal ventaja de esta red radica en una escasa inversión inicial para la configuración de esta, además, es posible implementar en la red las inclinaciones necesarias para la evacuación de condensados. La principal desventaja corresponde a su mantenimiento, ya que ante una reparación cabe la posibilidad de que se interrumpa el suministro de aire “aguas abajo” del punto de corte, implicando una detención de la producción.



**Figura 5.** Diseño de una red abierta.  
Fuente: Paredes (2016).

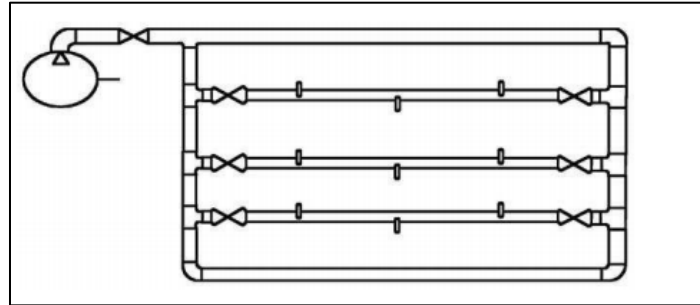
Red Cerrada: Se caracteriza por formar un anillo a partir de la línea principal. Con este tipo de red se facilitan las labores de mantenimiento de manera considerable debido a que es posible aislar ciertas partes de la red sin la necesidad de detener la producción, aunque la inversión inicial es mayor en comparación a la red abierta.



**Figura 6.** Diseño de una red cerrada.  
Fuente: Paredes (2016).

Red Interconectada: Esta configuración es similar a la red cerrada, con la diferencia que esta posee una implementación de bypass entre las líneas principales. Si bien la inversión inicial

es considerablemente más alta, este tipo de red presenta un óptimo desempeño frente al mantenimiento.



**Figura 7.** Diseño de una red interconectada.  
Fuente: Paredes (2016).

#### 1.2.5 Compresor rotativo de tornillo

El compresor rotativo de tornillo es un equipo de desplazamiento positivo, cuyo funcionamiento produce un incremento de la presión interna hasta llegar al valor de diseño esperado, a través de un proceso en el que disminuye el volumen del aire en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, para, finalmente, liberar el aire al sistema.

El compresor de tornillo lidera en tecnología en comparación al compresor alternativo o de pistón, si bien ambos sistemas son de desplazamiento positivo, la diferencia radica en la forma de comprimir. El compresor de pistón comprime el aire a través de dos fases, la de aspiración y compresión, generando alteraciones en el flujo; mientras que el compresor de tornillo comprime de forma continua a lo largo del rotor, produciendo un flujo de aire constante.

### 1.2.6 Proceso de compresión

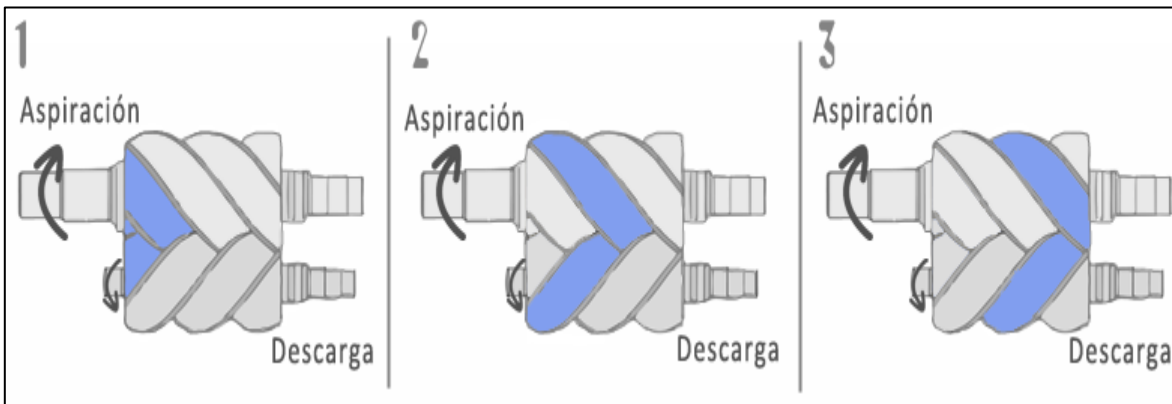
En la figura 8, es posible observar la composición del compresor, el que está formado por dos rotores que giran en paralelo y en sentido contrario en el interior de una carcasa. Estos rotores poseen un plano diferente, el denominado “macho” entra en la cavidad del rotor denominado “hembra” creando una cámara donde se acumula el aire aspirado.

Los dos rotores giran desplazando el aire desde el lado de aspiración al de descarga, efecto producido por su diseño en forma de tornillo helicoidal, desarrollado de forma particular para conseguir una máxima eficiencia. A través de ambos tornillos, el aire circula directamente hacia la zona contraria a la aspiración, donde incrementa la presión debido a la reducción del espacio. El aire se va acumulando en la zona de compresión, debido al desplazamiento continuo de los tornillos, hasta alcanzar la presión requerida por el diseño del equipo, luego se produce la liberación del aire en la tubería de descarga logrando un funcionamiento continuo del compresor, manteniendo la presión constante del sistema al que se encuentra conectado.

El compresor de tornillo puede tener diferentes componentes, los que se integrarán al conjunto formado por los dos tornillos y su carcasa, según su aplicación, presión de trabajo requerida o el diseño de cada fabricante, entre los que se encuentran:

- Conjunto de rotores o tornillos
- Motor de accionamiento principal. Habitualmente suele ser eléctrico (trifásico o monofásico) o de combustión interna, pero según su aplicación puede ser otro tipo de accionamiento como los realizados por turbinas de vapor, motores neumáticos, hidráulicos, etc.
- Sistema de regulación y control de la aspiración. Un elemento importante en el funcionamiento del compresor que permite la regulación de la entrada del aire en el equipo.
- Sistema de lubricación general del equipo completo. Los compresores llevan instalado un circuito cerrado que incluye el sistema de filtrado y refrigeración del aceite.
- Sistema de refrigeración del lubricante. Mantiene el lubricante a la temperatura óptima de trabajo.

- Sistema de enfriamiento del aire comprimido. Para reducir la temperatura del aire comprimido a la idónea para su uso.
- Sistema de filtrado. Indispensable para eliminar partículas y restos contaminantes del aire comprimido.
- Equipo de arranque y control. Cada compresor, en función de su diseño o aplicación, lleva instalado un sistema de control que regula el funcionamiento del equipo, su arranque y paro.



**Figura 8.** Funcionamiento de la unidad compresora.  
Fuente Mundo compresor (2019).

### 1.2.7 Funcionamiento interno del compresor de tornillo lubricado

El conjunto formado por los rotores y el motor de accionamiento, correspondiente a elementos 3 y 4 de la Figura 9, forman la base del compresor, independientemente de que dicho accionamiento sea con un motor eléctrico, de combustión, hidráulico, etc.

A través de la válvula (2) y el filtro (1), el aire es aspirado por el compresor, entrando en el tornillo (3) por la zona de aspiración. Luego, el aire circula a través de los dos tornillos y es comprimido sobre el recipiente de separación aire/aceite (5). Al interior de este recipiente receptor (5), el aire comprimido realiza un giro brusco debido a que su entrada está forzada para conseguir esto, con la finalidad de que se logre desprender la mayor cantidad de aceite. El aire comprimido sale al exterior, para mejorar la eficiencia de esa separación, a través de

un filtro separador con propiedades coalescentes (6), que desecha el resto de aceite en la corriente de aire hasta un residual ínfimo (inferior a 3 ppm, según cada fabricante).

El proceso de compresión se caracteriza, entre otras cosas, por la generación de calor. Los compresores están equipados con intercambiadores de calor (7) los que disminuyen la temperatura del aire comprimido hasta llegar a la adecuada para su uso seguro, ya que no se puede entregar de forma directa, al sistema, el aire salido del tornillo debido a su alta temperatura, la que generalmente oscila alrededor de los 100 °C. Estos intercambiadores pueden ser Aire/Aire o Aire/Agua. El aire comprimido pasa por la válvula de retención y mínima presión(11) antes de llegar al intercambiador. Esta válvula tiene una función doble, manteniendo la presión interna del circuito de aire a los valores mínimos especificados por el fabricante y evitando el retroceso de aire desde la red.

Respecto a la lubricación de estos compresores, se debe realizar con un aceite exclusivamente formulado para este trabajo. El aceite, luego de ser separado en el recipiente (5), circula por un circuito cerrado que incluye un sistema de filtro (8) para eliminar las impurezas que ha podido recoger del aire, y un refrigerador (9) para reducir su temperatura. El aceite será inyectado nuevamente en el tornillo cuando se encuentre limpio y a la temperatura adecuada. Dentro del circuito de lubricación se encuentra una válvula termostática (10), ya que el aceite del compresor no debe estar frío ni excesivamente caliente, esta válvula determinará si el aceite fluye hacia el refrigerador o retorna directamente al tornillo. La relevancia de un aceite de lubricación adecuado radica en que es un elemento fundamental para el funcionamiento y rendimiento de los compresores. En el compresor se utiliza el aceite para diversas funciones:

- 1- Lubricar. El aceite se utiliza para lubricar los tornillos y los rodamientos.
- 2- Sellar. Es muy importante que la mínima tolerancia existente entre los rotores quede sellada con el propio aceite de lubricación y evite la pérdida de eficiencia del conjunto.

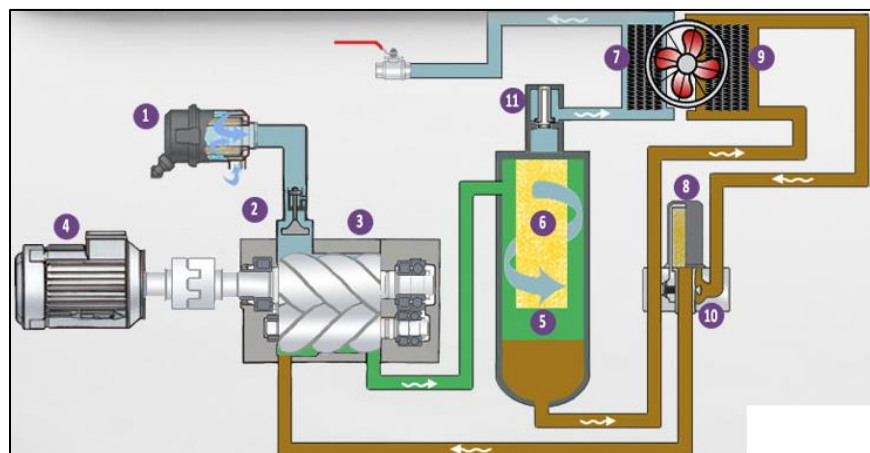
3- Enfriar. El aceite inyectado es el fluido refrigerante con el cual se evacua el calor de compresión.

### 1.2.8 Regulación del compresor

La regulación de un compresor de tornillo es una parte importante del funcionamiento del equipo. En su mayoría, los compresores poseen una regulación basada en la presión del sistema, es decir, se comprimirá aire hasta que la presión del sistema llegue al valor deseado.

### 1.2.9 Carga/descarga

Este es el sistema más habitual. Como se puede ver en la Figura 9, aguas arriba del filtro, está situada la válvula de aspiración (2). Esta válvula regula la entrada de aire en el tornillo. El compresor ha entrado en carga cuando la válvula de aspiración se abre y el tornillo aspira el aire exterior, lo que ocurre luego de que el sistema llega al valor de presión mínima. Cuando en el sistema se llega a la presión máxima, la válvula de aspiración (2) se cierra y el compresor deja de suministrar aire. En este momento se dice que el compresor está en descarga. Para mantener la presión del sistema entre los valores requeridos, esta maniobra se repite las veces que sea necesario. Durante todo este proceso el motor principal se mantiene en funcionamiento.



**Figura 9.** Funcionamiento completo del compresor.

Fuente: Mundo compresor (2019).

## **CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE INGENIERÍA BÁSICA**

## 2. Memoria de cálculos.

### 2.1.1 Definición de variables de operación y diseño de la red neumática.

El primer paso corresponde a definir y fijar las variables de operación y diseño del sistema de aire comprimido. Los valores se fijan en las siguientes condiciones ambientales: temperatura 20°C, Presión atmosférica 1,013 bar.

### 2.1.2 Caudal estimado de las herramientas

Para calcular el caudal estimado de requerimiento, se debe considerar las herramientas neumáticas que se utilizan en la planta, las que corresponden a elementos potentes que requieren aire comprimido para su funcionamiento; además de un caudal mínimo y una presión establecida de trabajo. El cálculo se obtiene multiplicando la cantidad de herramientas por el porcentaje de uso y factor de simultaneidad.

El factor de simultaneidad se obtiene a partir de:

N.º dispositivos neumáticos de consumo	Factor de simultaneidad	N.º dispositivos neumáticos de consumo	Factor de simultaneidad
1	1	9	0,73
2	0,94	10	0,71
3	0,89	11	0,69
4	0,86	12	0,68
5	0,83	13	0,67
6	0,8	14	0,66
7	0,77	15	0,65
8	0,75	100	0,2

**Tabla 1.** Factor de simultaneidad.  
Fuente: Hesse – Festo en Creus (2011)

Herramientas	Cantidad	Caudal (cfm)	Presión (psi)	% uso	Factor de simultaneidad	Caudal Estimado
Desmontador de llanta	1	7,46	145	40%	1	2,98
Gata neumatica	3	10,59	145	30%	0,89	9,00
Inflador neumático	2	2,12	120	70%	0,94	2,79
Lijadora orbital	3	28,15	90	70%	0,89	52,61
Pistola pulverizadora	2	10,59	100	70%	0,94	13,94
Pistola aire manual	3	12,36	90	80%	0,89	26,40
Llave de impacto	4	28,25	120	80%	0,86	77,74
bomba neumatica	2	4,24	90	60%	0,94	4,78
total	20					191

**Tabla 2.** Cálculo de caudal base estimado. Elaboración propia.

El caudal base estimado requerido para el funcionamiento de las herramientas de la planta es de 191 cfm.

### 2.1.3 Estimación del caudal de aire de la planta

Si bien se conoce el caudal requerido para el funcionamiento de las herramientas, se debe considerar ampliaciones y fugas, las que serán estimadas en un 30% y 5% respectivamente. El cálculo de este requerimiento se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_i = [base + base * 0,3 + (base + base * 0,3) * 0,05]$$

Donde:

base= Caudal estimado requerido en cfm.

0,3= Porcentaje de singularidades y ampliación estimado.

0,05= Porcentaje de fugas estimado.

En base al cálculo realizado, el caudal de aire requerido por la planta es de  $Q_i = 442$  m<sup>3</sup>/h.

#### 2.1.4 Relación de compresión.

Corresponde a la razón geométrica que resulta entre la presión absoluta de descarga y la presión absoluta de succión. El uso de esta razón es necesaria para determinar el proceso Politrópico y la temperatura de compresión. Se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$r = \frac{P_d}{P_i}$$

Donde:

Pd= Presión de diseño

Pi= Presión ambiente

En base al cálculo realizado, la relación de compresión corresponde a r= 10,9.

#### 2.1.3 Proceso Politrópico

El proceso politrópico es un proceso termodinámico que engloba a los procesos de expansión y compresión, relacionando la presión y el volumen de un cierto gas. Está expresado a partir de la siguiente ecuación:

$$Pv^n = cte$$

Donde:

P= Presión

v= Volumen específico

n= Índice politrópico (puede ser cualquier número real)

cte = Constante

Cálculos para encontrar índice politrópico (n):

$$n = |1 - \ln(\frac{T2}{T1})/\ln(r)|^{-1}$$

Donde:

ln= Logaritmo natural

T2= Temperatura de compresión estimada en 110°C

T1= Temperatura ambiente a 20°C

r= Relación de compresión

En base al cálculo realizado, el índice politrópico corresponde a n= 10,9.

#### 2.1.5 Temperatura de compresión

$$T2 = T1(r)^{\frac{n-1}{n}}$$

Donde:

T2= Temperatura de compresión en °C

T1= Temperatura ambiente estimada en 20°C

r = Relación de compresión

n = Índice Politrópico

En base al cálculo realizado, la temperatura de compresión corresponde a T2= 99°C.

#### 2.1.6 Calculo de caudal de diseño

El cálculo de caudal de diseño corresponde al caudal de aire en base a la relación de compresión y el proceso Politrópico. Para conseguir este cálculo, se requiere de la Ley de conservación de la masa, la que plantea que, en un sistema aislado, durante toda la reacción

química común, la masa total del sistema permanece constante, es decir la masa de succión es igual a la masa de descarga. Se expresa de la siguiente forma:

$$\dot{m}_N = \dot{m}_d$$

Donde:

$\dot{m}$  = Magnitud física que expresa la variación de la masa con relación al tiempo en un área específica en Kg/s

$\dot{m}_N$  = Flujo másico de entrada

$\dot{m}_d$  = Flujo másico de salida

$\dot{m}_N = \dot{m}_d$  Se demuestra a partir de la siguiente ecuación, con la que se obtendrá el caudal de aire de diseño para la red neumática:

$$\rho_i * A_i * v_i = \rho_d * A_d * v_d$$

$$\rho_i * Q_i = \rho_d * Q_d$$

$$Q_d = Q_N \frac{\rho_i}{\rho_d} \rightarrow Q_d = \frac{Q_i}{r^n}$$

Donde:

$\rho_N$  = Densidad del aire a 20°C 1,2Kg/m<sup>3</sup>

$Q_i$  = Caudal inicial en m<sup>3</sup>/h

$Q_d$  = Caudal de diseño en m<sup>3</sup>/h

r = Relación de compresión

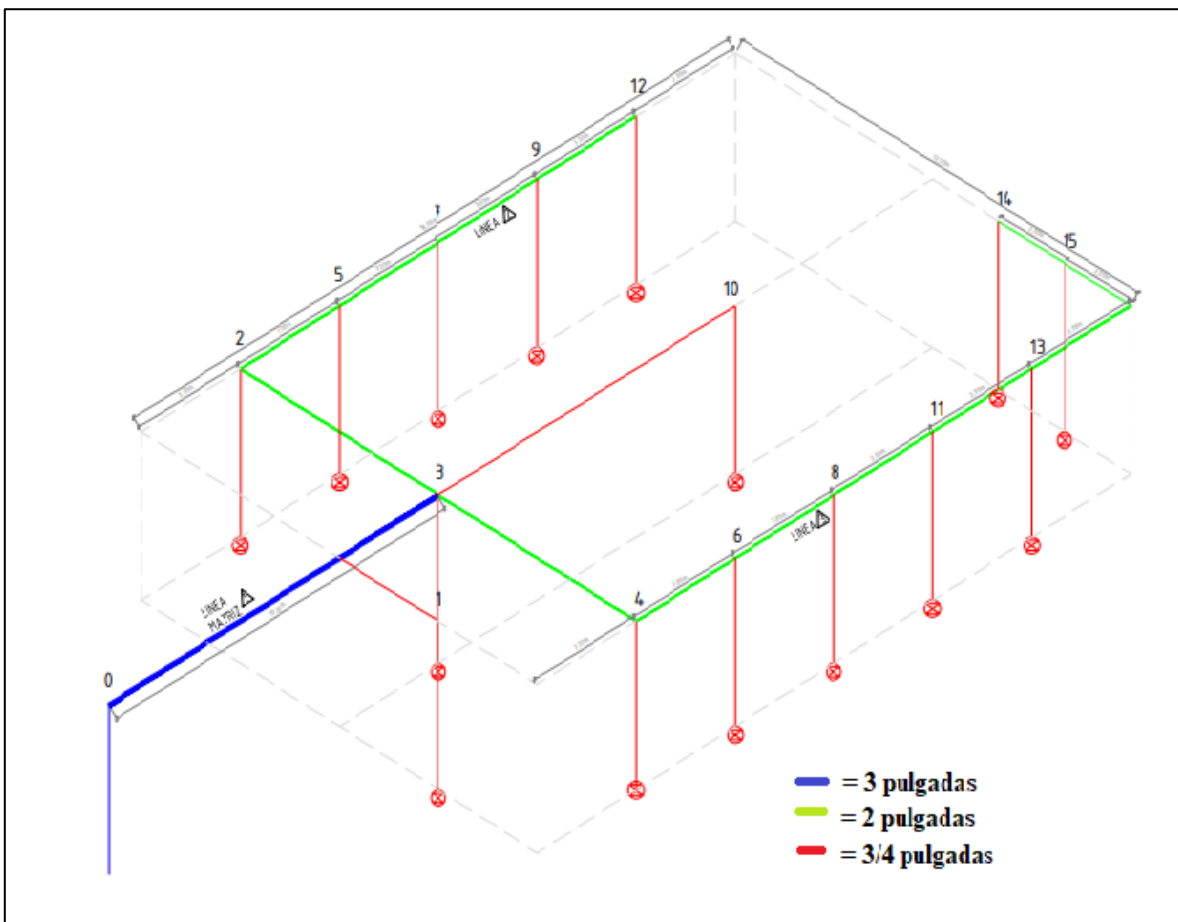
n = Índice politrópico

En base al cálculo realizado, el caudal de diseño corresponde a Qd= 53m<sup>3</sup>/h.

### 2.1.7 Bosquejo de la red principal y puntos de conexión

Con los datos obtenidos se realiza un bosquejo de la red principal y sus puntos de conexión o puestos de trabajo, la que está dividida en cuatro tramos, los cuales son:

- Tramo 1: Correspondiente entre el punto 0 y 3.
- Tramo 2: Correspondiente entre el punto 3 y 12.
- Tramo 3: Correspondiente entre el punto 3 y 16.
- Tramo 4: Correspondiente entre el punto 3 y 10.



**Figura 10.** Bosquejo de la red neumática Depósito Las Torres. Elaborado en Autocad.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.8 Cálculos de diámetro de cañerías y velocidades del fluido

Una vez realizado el bosquejo de la red, se procederá a calcular los diámetros de las cañerías y la velocidad del fluido.

La red está dividida en 4 tramos, los cuales se calcularán de forma independiente con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación de caudal } q_i = v_i * A_i \quad \rightarrow \quad q_i = v_i \frac{\pi}{4} d^2$$

$$\text{Ecuación de diámetro } d^2 = \sqrt{\frac{4q_i}{\pi * v_i}}$$

$$\text{Ecuación de velocidad } v_i = \frac{q_i}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

Donde:

$q_i$  = caudal de aire en m<sup>3</sup>/s

$v$  = velocidad del fluido en m/s

$d$  = diámetro interno de la cañería en pulgadas

Los resultados de diámetros y velocidades por tramo obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

	diámetro (m)	Velocidad (m/s)
Tramo 1	0,0762	3,22
Tramo 2	0,0508	2,87
Tramo 3	0,0508	3,42
Tramo 4	0,01905	3,41

**Tabla 3.** Resultados diámetros y velocidades por tramo.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.9 Cálculo número de Reynolds

Es un numero adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el fluido es laminar o turbulento.

Un fluido que recorre por el interior de una tubería circular en número de Reynolds, se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{v * d}{\gamma}$$

Donde:

Re = Número adimensional que indica estado del fluido laminar < 2300, turbulento > 4000

v= Velocidad del fluido en m/s

d= Diámetro de la tubería en m

$\gamma$  = viscosidad cinemática del fluido a 20°C  $\rightarrow \gamma = 15,1 * \frac{10^{-6} m^2}{s}$

Los resultados de Número de Reynolds por tramo obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

	Número de Reynolds
Tramo 1	16249
Tramo 2	9655
Tramo 3	11506
Tramo 4	4392

**Tabla 4.** Resultados Número de Reynolds.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.10 Rugosidad relativa de las cañerías

Corresponde al conjunto de irregularidades que posee la cañería internamente

$$\varepsilon_{galvanizado}=1,5*10^{-4}m$$

$$\varepsilon_{acero\ comercial}=4,6*10^{-5}m$$

$$\frac{\varepsilon}{d}$$

Donde:

$\varepsilon$  = Rugosidad absoluta del material en m

d= Diámetro interno cañería en m

Los resultados de la rugosidad por tramo obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

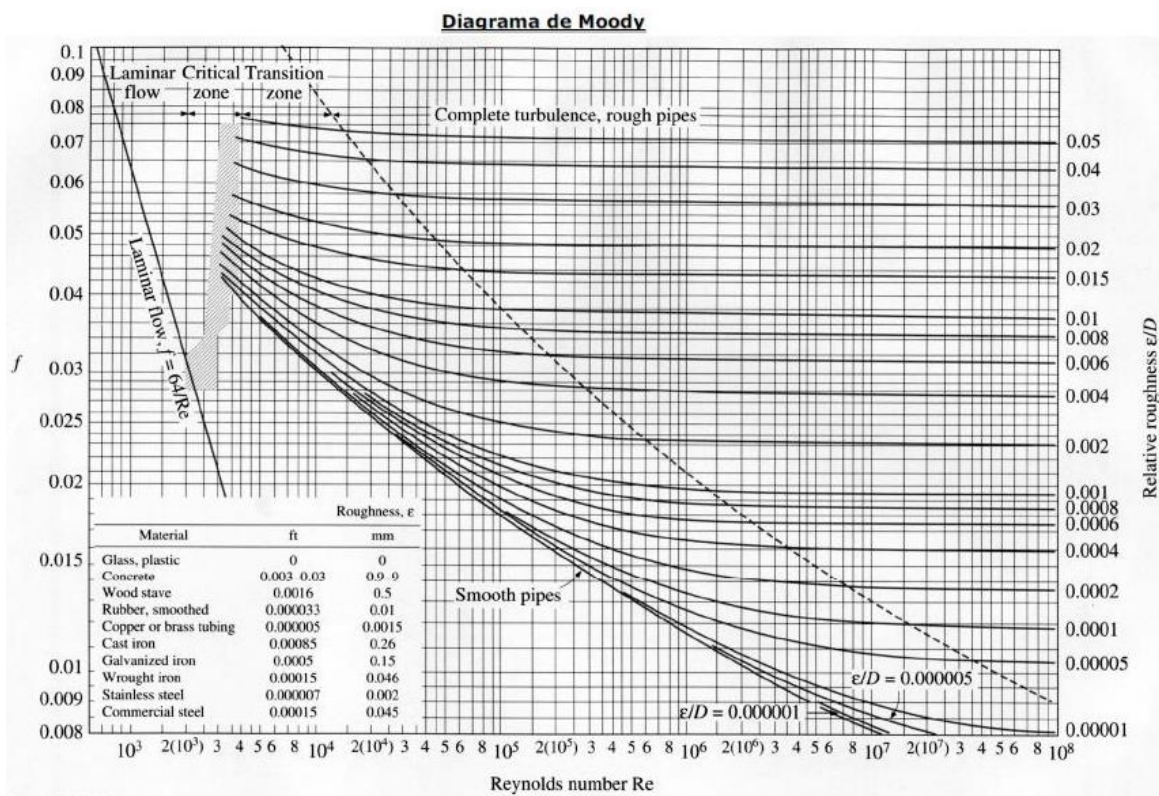
	Rugosidad Galvanizado	Rugosidad Acero comercial
Tramo 1	0,002	0,0006
Tramo 2	0,003	0,0009
Tramo 3	0.003	0,0009
Tramo 4	0,007	0,002

**Tabla 5.** Resultado rugosidad.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.11 Factor de fricción

Es un valor adimensional que se utiliza en mecánica de fluidos para calcular la pérdida de carga en una cañería debido a la fricción. Esta depende de dos factores, el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

En este caso se utilizará el diagrama de Moody, que fue desarrollado a partir de la ecuación de Coolebrook-White y constituye una representación gráfica para el coeficiente o factor de fricción.



**Figura 11.** Diagrama de Moody.  
Fuente: González (2011)

Los resultados de los factores de fricción por tramo y tipo de cañería obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

	Factor fricción Galvanizado	Factor fricción Acero comercial
Tramo 1	0,027	0,027
Tramo 2	0,037	0,034
Tramo 3	0,034	0,026
Tramo 4	0,046	0,042

**Tabla 6.** Resultados Factor de fricción.  
Fuente: Elaboración propia

### 2.1.12 Presión de operación

Se requiere para determinar la presión mínima y máxima que requieren las herramientas y servicios. En este punto, se considera la presión en el puesto de trabajo más alejado de la red neumática.

### 2.1.13 Cálculos de pérdida de carga

Para realizar el cálculo se utilizará la ecuación de Darcy-Weibach, expresada a continuación:

$$\Delta P = f * \frac{v^2}{2g} * \frac{L}{d} = \frac{\frac{m^2}{s^2}}{\frac{m}{s^2}} \rightarrow m \rightarrow P = \delta H \rightarrow P = \rho g H$$

$$\Delta P = f \frac{v^2}{2g} * \frac{L}{d} * \rho g \rightarrow \Delta P = f \frac{v^2}{2} * \frac{L}{d} * \rho \rightarrow = \frac{m^2}{s^2} * \frac{Kg}{m^3} = \frac{Kg}{ms^2}$$

Siendo:

$\Delta P$ = Las pérdidas producidas en la tubería en m.

$f$ = Factor de fricción adimensional.

$L$ = largo total de la cañería en m.

$d$ = Diámetro interior de la tubería en m.

$v$ = Velocidad del flujo m/s

g= Aceleración de gravedad. 9,81 m/s<sup>2</sup>

Los resultados de las pérdidas por tramo y tipo de cañería obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

	Galvanizado	Acero comercial
	Perdidas (pa)	Perdidas (pa)
Tramo 1	22,04	22,04
Tramo2	64,79	59,53
Tramo 3	117,4	89,79
Tramo 4	219,01	201,11
Total	423,24	383,36

**Tabla 7.** Resultados Pérdidas por tramo.  
Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados, se toma la determinación de seleccionar la cañería tipo Acero comercial debido que presenta menos pérdidas.

#### 2.1.14 Ecuación de flujo en función de la velocidad

La curva de respuesta del sistema se adquiere a partir de la ecuación de flujo de Darcy-Weibach en función del caudal al cuadrado. Se calculará a través de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = f\rho \frac{v^2}{2} * \frac{L}{d} \rightarrow Q = v * A \rightarrow (Q = v \frac{\pi}{4} d^2)^2 \rightarrow v^2 = \frac{4^2 Q^2}{\pi^2 d^4} \rightarrow$$

$$\Delta P = f\rho \left( \frac{4Q^2}{\pi^2 d^4} \right) * \frac{L}{d} \rightarrow \Delta P = f\rho \left( \frac{Q^2 16}{\pi^2 d^4} \right) * \frac{L}{d} \rightarrow \Delta P = \frac{f * 1,2 * 8 * Q^2 * L}{\pi^2 d^5} \rightarrow$$

$$\Delta P = \frac{0,9727 * f * Q^2 * L}{d^5}$$

Donde:

$\Delta P$ = Las pérdidas producidas en la tubería en m.

f = Factor de fricción adimensional

0,9727 = constante

L= largo de la tubería en m

d= diámetro interno de la tubería en m

Q= caudal de aire en m<sup>3</sup>/h

Los resultados de las ecuaciones por tramo para la gráfica de la curva de respuesta del sistema.

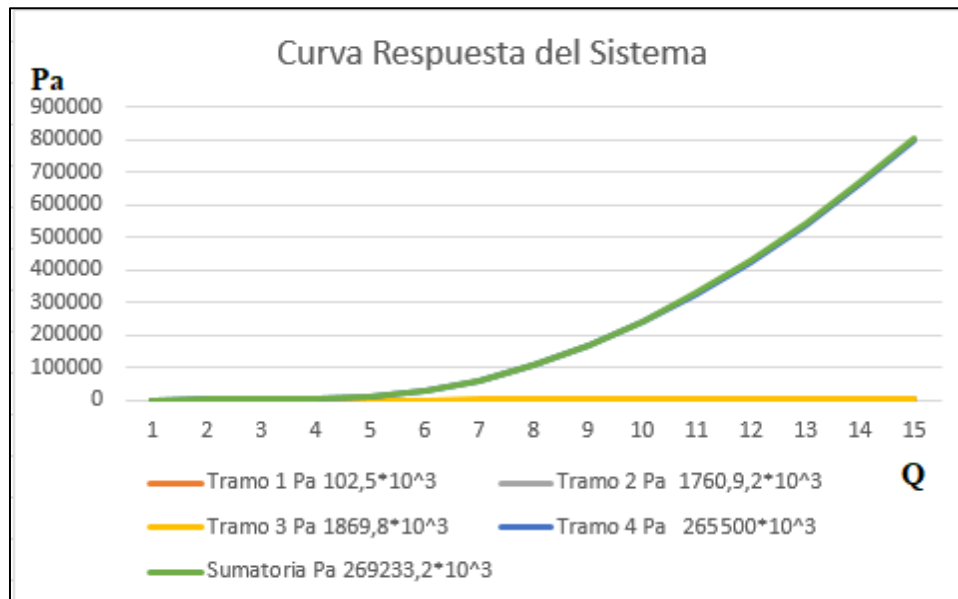
	Ecuacion del flujo en(f) del caudal ^2
Tramo 1	$102,5 \cdot 10^3 \cdot Q^2$
Tramo 2	$1760,9 \cdot 10^3 \cdot Q^2$
Tramo 3	$1869,8 \cdot 10^3 \cdot Q^2$
Tramo4	$265500 \cdot 10^3 \cdot Q^2$
Sumatoria	$269233 \cdot 10^3 \cdot Q^2$

**Tabla 8.** Resultado de la ecuación de flujo.  
Fuente: Elaboración propia.

Mediante los resultados se determina el valor por tramo de los valores correspondientes a la ecuación del flujo en función del caudal al cuadrado, lo que permitirá realizar la gráfica.

*10 <sup>-3</sup>		Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Sumatoria
m <sup>3</sup> /s	(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup>	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
Q	Q <sup>2</sup>	102,5*10 <sup>3</sup>	1760,9,2*10 <sup>3</sup>	1869,8*10 <sup>3</sup>	265500*10 <sup>3</sup>	269233,2*10 <sup>3</sup>
1	1*10 <sup>-6</sup>	0,1	1,76	1,86	265,5	269,2
2	4*10 <sup>-6</sup>	0,41	7,04	7,47	1062	1076,9
3	9*10 <sup>-6</sup>	0,92	15,84	16,82	2389,5	2423,09
4	1,6*10 <sup>-5</sup>	1,63	28,17	29,91	4248	4307,7
5	2,5*10 <sup>-5</sup>	2,55	44,02	46,74	6637,5	6730,8
10	1*10 <sup>-4</sup>	10,25	176,69	186,98	26550	26923,3
15	2,255*10 <sup>-4</sup>	23,06	396,2	420,7	59737,5	60577,4
20	4*10 <sup>-4</sup>	41	704,36	747,92	106200	107693,2
25	6,25*10 <sup>-4</sup>	64,06	1100,56	1168,62	165937,5	168270,6
30	9*10 <sup>-4</sup>	92,25	1584,81	1682,82	238950	242369,7
35	1,225*10 <sup>-3</sup>	125,56	2157,1	2290,5	325237,5	329810,4
40	1,6*10 <sup>-3</sup>	164	2817,44	2991,68	424800	430772,8
45	2,025*10 <sup>-3</sup>	207,56	3565,82	3786,34	536625	545196,8
50	2,5*10 <sup>-3</sup>	256,25	4402,25	4674,5	663750	673082,5
55	3*10 <sup>-3</sup>	307,5	5282,7	5609,4	796500	807699
60	3,6*10 <sup>-3</sup>	369	6731,28	67931,28	955800	969238,8

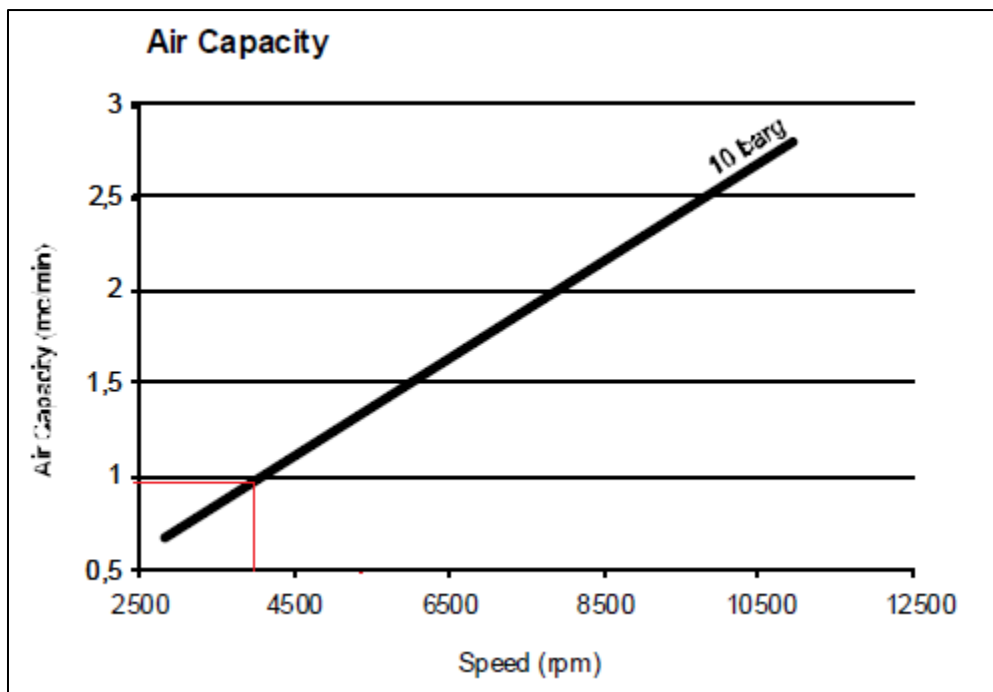
**Tabla 9.** Resultados de las ecuaciones en función del caudal al cuadrado.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 12.** Curva de Respuesta del Sistema.  
Fuente: Elaboración propia.

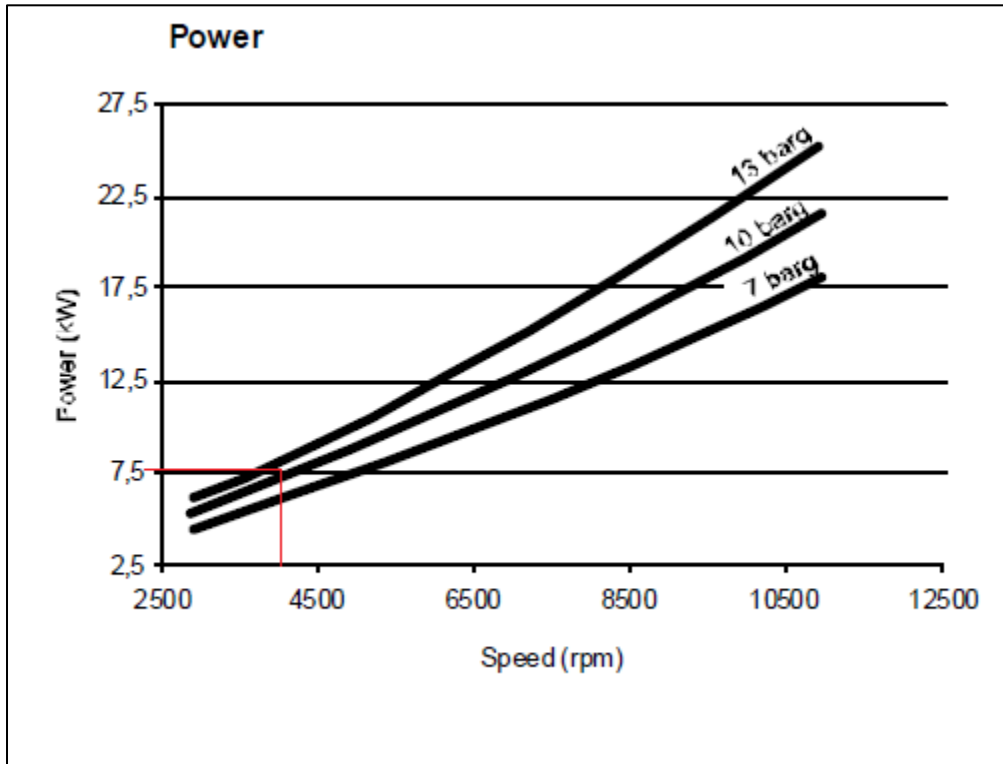
### 2.2.1 Selección del compresor

La selección del compresor y de su capacidad son parámetros críticos en el diseño de una instalación, una acertada selección supone un gran ahorro energético durante su funcionamiento. Esta se determinará de acuerdo a la recta de desplazamiento positivo.



**Figura 13.** Recta de desplazamiento positivo.  
Fuente: Termomeccanica Compressori

De acuerdo a la figura 13, se puede estimar que el caudal obtenido a partir de las ecuaciones previamente desarrolladas es de 53 m³/h, valor transformado a 0,88 m³/min, teniendo un punto de encuentro con la recta de presión, obteniendo como resultado una velocidad angular de 4000 rpm aproximadamente.



**Figura 14.** Curva de funcionamiento.  
Fuente: T.M.C S.p.A

De acuerdo a la figura 14, a partir de la Velocidad angular obtenida anteriormente, se puede estimar la potencia del motor, tomando como inicio los 4000 rpm aprox. Hasta llegar a la curva de los 10 barg, obteniendo una potencia de 7,5 Kw.

### 2.2.2 Selección del tanque acumulador de aire

El tanque acumulador de aire, también llamado depósito de aire, cumple la función de almacenar aire en su interior para regular el funcionamiento del compresor y estabilizar la red de aire comprimido. La selección del tanque idóneo se realizará mediante la siguiente ecuación

$$v = \frac{T * (C - S) * P_a}{P_1 - p_2}$$

Donde:

v = Volumen del tanque de almacenamiento en pies<sup>3</sup>/minutos.

T = Lapso de tiempo para que ocurra la caída de presión en minutos.

C = Caudal de aire requerido en m<sup>3</sup>/min.

S = Caudal de aire excedente del compresor.

P<sub>a</sub> = Presión atmosférica en psi.

P<sub>1</sub> = Presión de corte en psi.

P<sub>2</sub> = Presión de carga en psi.

En base al cálculo realizado, el tanque acumulador corresponde a V= 1000 litros.

**Capítulo 3: EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DEL DISEÑO PRESENTADO**

### 3.1 Inversión (CAPEX)

Posterior a los cálculos realizados, se estimará los costos del diseño planteado de acuerdo a los valores actuales de mercado.

#### 3.1.1 Red neumática

Cañería 3 pulgadas: 10 m	= \$ 75.868
Cañería 2 pulgadas: 43 m	= \$ 146.224
Cañería ¾ pulgadas: 58 m	= \$ 65.000
Singularidades	= \$50.000
FLR 15 unidades	= \$ 450.000

#### 3.1.2 Equipos

Primera alternativa

Compresor Atlas Copco 7,5 Kw incluye tanque de aire = \$5.000.000



**Figura 15.** Compresor tornillo modelo G7 Atlas Copco.  
Fuente: Atlascopco.

Segunda alternativa

Compresor Somar 7,5 Kw

= \$ 3.300.000



**Figura 16.** Compresor de tornillo Somar modelo SCT1010  
Fuente: Servicomp

Tanque acumulador

= \$ 850.000



**Figura 17.** Tanque acumulador de 1000 litros Schulz  
Fuente: Servicomp

### 3.1.2 Instalación

Mecánico	= \$ 20.000 hora
Eléctrico	= \$ 20.000 hora
Montajista	= \$ 20.000 hora

Se estima que los técnicos tardarán aproximadamente 15 días en realizar la instalación de la red neumática. El total de la mano de obra corresponde a \$ 7.200.000

### 3.1.3 Valor estimado de la inversión

Considerando el conjunto de materiales de la red neumática, los equipos y la instalación de éstos, se calcula un valor estimado de la inversión de \$ 12.987.092

## **3.2 Gastos operativos (OPEX)**

### 3.2.1 Repuestos

Aceite compresor tornillo	= \$4.000 litro
Filtro de aceite	= \$ 30.000 unidad
Filtro de aire	= \$ 20.000 unidad
Filtro separador – Aire/aceite	= \$ 130.000 unidad
Válvula de admisión	= \$ 150.000 unidad
Válvula presión mínima	= \$ 90.000 unidad
Válvula termostática	= \$ 90.000 unidad

### 3.2.2 Mantenimiento

El mantenimiento de los equipos se realizará a través de una empresa externa con una frecuencia de 2.000 horas de funcionamiento.

Técnico	= \$ 34.000 hora
2000 horas x 3 hh	: \$232.000 + iva → \$ 276.080
4000 horas x 4 hh	: \$396.000 + iva → \$ 471.240
6000 horas x 3 hh	: \$232.000 + iva → \$ 276.080
8000 horas x 5 hh	: \$760.000 + iva → \$ 904.400
Emergencias	: \$ 45.000 hora

### 3.2.3 Repuestos requeridos por mantención:

Mantención de 2000 horas: -20 Litros de aceite  
- 1 Filtro de aceite  
- 1 Filtro de aire

Mantención de 4000 horas: -20 Litros de aceite  
- 1 Filtro de aceite  
- 1 Filtro de aire  
- 1 Filtro separador aire/aceite

Mantención de 6000 horas: -20 Litros de aceite  
- 1 Filtro de aceite  
- 1 Filtro de aire

Mantención de 8000 horas: -20 Litros de aceite  
- 1 Filtro de aceite  
- 1 Filtro de aire  
- 1 Filtro separador aire/aceite  
- Válvula de admisión

- Válvula presión mínima
- Válvula termostática

#### 3.2.4 Energía

El compresor tiene un funcionamiento estimado de 20 minutos por hora.

0,3*7,5*101	= \$227
Día	= \$5.454
Mes	= \$ 163.620
Año	= \$ 1.963.440

Donde:

7,5 = Kw del compresor

101= Precio estimado energía trifásica

0,3 = 20 minutos expresado en horas

#### 3.2.5 Valor estimado de costos operacionales

Considerando repuestos, mantenciones y energía se estima un costo anual de \$ 3.891.240.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En la presente memoria se estimó una re ingeniería de la red neumática del Depósito Régimen Las Torres Zona D, ya que se realizó una ampliación del taller sin determinar los nuevos requerimientos, afectando el uso simultáneo de los puestos de trabajos necesarios para dar respuesta a la demanda de servicios, entre ellos, Desabolladura, Pintura, Vulcanización, Mecánicas, entre otras. No existen antecedentes de ingeniería, por tanto las ampliaciones se realizaron sin considerar elementos esenciales para un correcto funcionamiento. Además, al no existir estos antecedentes, no es posible establecer comparación con la nueva propuesta.

A partir de diversas ecuaciones, se crea una memoria de cálculo para estimar el adecuado funcionamiento de la red neumática, planteando alternativas para determinar la más conveniente. Para ello se realizaron bosquejos con la finalidad de visualizar la red tentativa y los diversos puntos de trabajo.

Se consideró que la alternativa más viable, en cuanto a material de la red neumática, será en acero comercial, ya que presenta menores pérdidas a lo largo del sistema, con la ventaja de un menor costo en comparación a la cañería galvanizada.

Se determinó que los equipos adecuados para correcto funcionamiento de la red neumática corresponden a compresores de 7,5 Kw y un tanque acumulador de 1000 litros

Se considera relevante conservar los antecedentes de sus instalaciones, tanto como memoria de cálculos, costo energético de equipos, valores de mantención, valores de repuestos, archivar antecedentes de fallas y daño a la red neumática, entre otras, para plantear mejoras frente a posibles reestructuraciones y/o para enfrentar de forma más eficiente una posible emergencia, lo que conlleva a un menor tiempo de reparación, y por tanto, menos detenciones imprevistas que afecten el correcto funcionamiento del servicio. Al contar con estos antecedentes, se podrá realizar comparaciones futuras para evaluar mejoras en el sistema. Por el contrario, si no se cuenta con estos antecedentes, tal como sucedió con el Depósito en

estudio, se tendrá que realizar una re ingeniería básica, lo que implica mayores costos asociados.

## BIBLIOGRAFÍA

ATLAS COPCO. Atlascopco.com/es-cl [en línea] <<https://www.atlascopco.com/es-cl/compressors/products/air-compressor/oil-injected-rotary-screw-air-compressor/g-gx>> [Consulta: 28 de diciembre 2019]

GONZÁLEZ, Mónica. La guía [en línea] <<https://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/diagrama-de-moody>> [Consulta: 09 de noviembre 2019]

HESSE FESTO. En: CREUS Solé, Antonio. Neumática e hidráulica 2ª Edición [en línea] <<https://www.bajalibros.com/CL/Neumatica-e-Hidraulica---2-ed-Antonio-Creus-eBook-568070?frstPGI3R=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8=>>> [Consulta: 12 de diciembre 2019]

MUNDO COMPRESOR. Mundo compresor.com [en línea] <<https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/como-funciona-compresor-tornillo-lubricado>> [Consulta: 07 de septiembre 2019]

PAREDES López, José Javier. Diseño de las redes de aire comprimido y transporte neumático en un astillero. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena, 2016. [en línea] <<http://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/5707/tfe-par-dis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Consulta: 03 de octubre 2019]

RED. Red Metropolitana de Movilidad [en línea] <<http://www.red.cl/imagenes/uploads/20190705204349-mapageneral-express-julio2019.pdf>> [Consulta: 03 de septiembre de 2019]

SERVICOMP. Servicomp.cl [en línea] <[http://www.servicomp.cl/producto\\_detalle.php?id=310](http://www.servicomp.cl/producto_detalle.php?id=310)> [Consulta: 28 de diciembre 2019]

SERVICOMP. Servicomp.cl [en línea]  
<[http://www.servicomp.cl/producto\\_detalle.php?id=343](http://www.servicomp.cl/producto_detalle.php?id=343)> [Consulta: 28 de diciembre 2019]

TM.C. S.p.A. Termomeccanica Compressori SCA. Archivo, p. 5.

## **ANEXOS**

Caudal Diseño

$$Q_d = [base + base * 0,3 + (base + base * 0,3) * 0,05]$$

$$Q_d = [191 + 191 * 0,3 + (191 + 191 * 0,3) * 0,05]$$

$$Q_d = 191 + 57 + 12$$

$$Q_d = 260 \text{ cfm}$$

$$\frac{1m^3}{h} = 0,588578 \text{ cfm}$$

$$Q_d \approx 442m^3/h$$

Relación de compresión

$$r = \frac{P_d}{P_i} \rightarrow r = \frac{(10+1,013)}{1,013} \rightarrow r = 10,9$$

Proceso Politrópico

$$Pv^n = cte$$

$$n = |1 - \ln(\frac{T_2}{T_1}) / \ln(r)|^{-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{110^\circ c + 273}{20^\circ c + 273} = \frac{383k}{293k} = 1,3$$

$$n = | \frac{1 - \ln(1,3)}{\ln(1,12)} |^{-1}$$

$$n = |0,981|^{-1}$$

$$n \approx 1,12$$

Temperatura compresión

$$T_2 = T_1(r)^{\frac{n-1}{n}} \rightarrow T_2 = 293 * (10,9)^{\frac{1,12-1}{1,12}} \rightarrow$$

$$T_2 = 293 * (11,2)^{0,107} \rightarrow T_2 \approx 372k \rightarrow T_2 = 99^\circ c$$

Caudal de diseño

$$\dot{m}_N = \dot{m}_d$$

$$\rho_N * A_N * v_N = \rho_d * A_d * v_d$$

$$\rho_N * Q_N = \rho_d * Q_d$$

$$Q_d = Q_N \frac{\rho_N}{\rho_d} \rightarrow Q_d = \frac{Q_N}{r^{\frac{1}{n}}} \rightarrow Q_d = \frac{442 m^{\frac{3}{h}}}{10,9^{1,12}} \rightarrow Q_d = 52 m^{\frac{3}{h}}$$

Diámetros de cañerías y velocidades del fluido

Tramo 1

Datos estimados:

Velocidad: 3 m/s

Qi= 53 m3/h

$$q_i = v_i * A_i \rightarrow v_i = \frac{\pi}{4} d^2 \rightarrow v_i = \frac{q_i}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4q_i}{\pi * v_i}}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4 * (\frac{53}{3600})}{\pi * 3}} \rightarrow d = 0,0790m \rightarrow d = \frac{0,090 * 1000}{25,4} \rightarrow d = 3,1 pulg \approx 3 pulg$$

$$v_i = \frac{53/3600}{\frac{\pi}{4}(0,0762)^2} \rightarrow v_i = 3,22 m/s$$

Tramo 2

Datos estimados:

Velocidad: 3 m/s

$Q_i = 53 \text{ m}^3/\text{h} / 15 * 6 \rightarrow 21 \text{ m}^3/\text{h}$

$$q_i = v_i * A_i \rightarrow v_i = \frac{\pi}{4} d^2 \rightarrow v_i = \frac{q_i}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4q_i}{\pi * v_i}}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4 * (\frac{21}{3600})}{\pi * 3}} \rightarrow d = 0,0497 \text{ m} \rightarrow d = \frac{0,0497 * 1000}{25,4} \rightarrow d = 1,95 \text{ pulg} \approx 2 \text{ pulg}$$

$$v_i = \frac{21/3600}{\frac{\pi}{4} (0,0508)^2} \rightarrow v_i = 2,87 \text{ m/s}$$

Tramo 3

Datos estimados:

Velocidad: 3 m/s

$Q_i = 53 \text{ m}^3/\text{h} / 15 * 7 \rightarrow 25 \text{ m}^3/\text{h}$

$$q_i = v_i * A_i \rightarrow v_i = \frac{\pi}{4} d^2 \rightarrow v_i = \frac{q_i}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4q_i}{\pi * v_i}}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4 * (\frac{25}{3600})}{\pi * 3}} \rightarrow d = 0,0542 \text{ m} \rightarrow d = \frac{0,0542 * 1000}{25,4} \rightarrow d = 2,1 \text{ pulg} \approx 2 \text{ pulg}$$

$$v_i = \frac{25/3600}{\frac{\pi}{4}(0,0508)^2} \rightarrow v_i = 3,42 \text{ m/s}$$

Tramo 4

Datos estimados:

Velocidad: 3 m/s

Qi = 53 m<sup>3</sup>/h / 15 → 3,5 m<sup>3</sup>/h

$$q_i = v_i * A_i \rightarrow v_i = \frac{\pi}{4} d^2 \rightarrow v_i = \frac{q_i}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4q_i}{\pi * v_i}}$$

$$d^2 = \sqrt{\frac{4 * (\frac{3,5}{3600})}{\pi * 3}} \rightarrow d = 0,0203 \text{ m} \rightarrow d = \frac{0,0203 * 1000}{25,4} \rightarrow$$

$$d = 0,79 \text{ pulg} \approx \frac{3}{4} \text{ pulg}$$

$$v_i = \frac{3,5/3600}{\frac{\pi}{4}(0,0508)^2} \rightarrow v_i = 3,41 \text{ m/s}$$

Numero de Reynolds

$$20^\circ \text{C} \rightarrow \gamma = 15,1 * \frac{10^{-6} \text{ m}^2}{\text{s}}$$

$$20^\circ \text{C} \rightarrow \rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Re_1 = \frac{v * d}{\gamma} \rightarrow Re_1 = 3,16 * \frac{(3,22 * 0,0762)}{15,1 * 10^{-6}} \rightarrow Re_1 = 16249$$

$$Re_2 = \frac{v * d}{\gamma} \rightarrow Re_2 = 2,87 * \frac{(2,87 * 0,0508)}{15,1 * 10^{-6}} \rightarrow Re_2 = 9655$$

$$Re_3 = \frac{v * d}{\gamma} \rightarrow Re_3 = 3,28 * \frac{(3,42 * 0,0508)}{15,1 * 10^{-6}} \rightarrow Re_3 = 11506$$

$$Re_4 = \frac{v*d}{\gamma} \rightarrow Re_4 = 1,91 * \frac{(3,41*0,01905)}{15,1*10^{-6}} \rightarrow Re_4 = 4312$$

Rugosidad relativa

$$\varepsilon_{galvanizado}=1,5*10^{-4}m$$

$$\frac{\varepsilon}{d_1} = 1,5 * \frac{10^{-4}}{0,0762} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_1} = 0,002$$

$$\frac{\varepsilon}{d_{12}} = 1,5 * \frac{10^{-4}}{0,0508} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_2} = 0,003$$

$$\frac{\varepsilon}{d_3} = 1,5 * \frac{10^{-4}}{0,0508} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_3} = 0,003$$

$$\frac{\varepsilon}{d_4} = 1,5 * \frac{10^{-4}}{0,01905} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_4} = 0,007$$

$$\varepsilon_{acero comercial}=4,6*10^{-5}m$$

$$\frac{\varepsilon}{d_1} = 4,6 * \frac{10^{-4}}{0,0762} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_1} = 0,0006$$

$$\frac{\varepsilon}{d_{12}} = 4,6 * \frac{10^{-4}}{0,0508} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_2} = 0,0009$$

$$\frac{\varepsilon}{d_3} = 4,6 * \frac{10^{-4}}{0,0508} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_3} = 0,0009$$

$$\frac{\varepsilon}{d_4} = 4,6 * \frac{10^{-4}}{0,0254} \rightarrow \frac{\varepsilon}{d_4} = 0,002$$

Factor de fricción Diagrama de Moody

Galvanizado

$$F_1 = 0,027$$

$$F_2 = 0,037$$

$$F_3 = 0,034$$

$$F_4 = 0,046$$

Acero comercial

$$F_1 = 0,027$$

$$F_2 = 0,034$$

$$F_3 = 0,026$$

$$F_4 = 0,042$$

Perdidas ecuación Darcy Weisbach

$$P = f * \frac{v^2}{2g} * \frac{L}{d} = \frac{\frac{m^2}{s^2}}{\frac{m}{s^2}} \rightarrow m \rightarrow P = \delta H \rightarrow P = g\rho H$$

$$\Delta P = f \frac{v^2}{2g} * \frac{L}{d} * \rho g \rightarrow \Delta P = f \frac{v^2}{2} * \frac{L}{d} * \rho \rightarrow = \frac{m^2}{s^2} * \frac{Kg}{m^3} = \frac{Kg}{ms^2}$$

Galvanizado

Tramo 1

$$\Delta P = 0,027 * \left(\frac{3,22^2}{2}\right) * \left(\frac{10}{0,0762}\right) * 1,2 = 22,04 \text{ pa}$$

Tramo 2

$$\Delta P = 0,037 * \left(\frac{2,87^2}{2}\right) * \left(\frac{18}{0,0508}\right) * 1,2 = 64,79 \text{ pa}$$

Tramo 3

$$\Delta P = 0,034 * \left(\frac{3,42^2}{2}\right) * \left(\frac{25}{0,0508}\right) * 1,2 = 117,4 \text{ pa}$$

Tramo 4

$$\Delta P = 0,046 * \left(\frac{3,41^2}{2}\right) * \left(\frac{13}{0,01905}\right) * 1,2 = 219,01 \text{ pa}$$

Acero comercial

Tramo 1

$$\Delta P = 0,027 * \left(\frac{3,22^2}{2}\right) * \left(\frac{10}{0,0762}\right) * 1,2 = 22,04 \text{ pa}$$

Tramo 2

$$\Delta P = 0,034 * \left(\frac{2,87^2}{2}\right) * \left(\frac{18}{0,0508}\right) * 1,2 = 59,53 \text{ pa}$$

Tramo 3

$$\Delta P = 0,026 * \left(\frac{3,42^2}{2}\right) * \left(\frac{25}{0,0508}\right) * 1,2 = 89,79 \text{ pa}$$

Tramo 4

$$\Delta P = 0,042 * \left(\frac{3,41^2}{2}\right) * \left(\frac{13}{0,01905}\right) * 1,2 = 201,11 \text{ pa}$$

Sumatoria pérdidas

Galvanizado = 423,24 pa

Acero comercial = 383,36 pa

Pérdidas en función del caudal al cuadrado

$$\Delta P = f\rho \frac{v^2}{2} * \frac{L}{d} \rightarrow Q = v * A \rightarrow Q = v \frac{\pi}{4} d^2$$

$$v^2 = \frac{4Q^2}{\pi d^4}$$

$$v^2 = \frac{1,6211Q^2}{\pi d^4}$$

$$\Delta P = f\rho * \frac{1,621 * Q^2}{2d^4} * \left(\frac{L}{d}\right)$$

$$\Delta P = f * 0,9727 * \left(\frac{L}{d^5}\right) * Q^2$$

$$\Delta P_1 = 0,027 * 0,9727 * \left(\frac{10}{0,0762^5}\right) * Q^2 \rightarrow 102,578 * 10^3 Q^2$$

$$\Delta P_2 = 0,034 * 0,9727 * \left(\frac{18}{d0,0508^5}\right) * Q^2 \rightarrow 1760,946 * 10^3 Q^2$$

$$\Delta P_3 = 0,026 * 0,9727 * \left(\frac{25}{d0,0508^5}\right) * Q^2 \rightarrow 1869,822 * 10^3 Q^2$$

$$\Delta P_4 = 0,042 * 0,9727 * \left(\frac{13}{d0,0254^5}\right) * Q^2 \rightarrow 265500 * 10^3 Q^2$$

Calculo tanque de aire

$$v = \frac{T*(C-S)*P_a}{P_1 - p_2}$$

$$v = \frac{2*(0,883-0,283)*14,696}{145-130} = 1,17\text{m}^3 \approx 1000 \text{ litros}$$