



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA
HANGAR DE MANTENIMIENTO DE AIRBUS A320 Y ATR 72-600 AVIATECA**

Luis Pedro Mendizábal Fuentes

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA
HANGAR DE MANTENIMIENTO DE AIRBUS A320 Y ATR 72-600 AVIATECA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

LUIS PEDRO MENDIZÁBAL FUENTES

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo
EXAMINADOR	Ing. Carlos Snell Chicol Morales
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA HANGAR DE MANTENIMIENTO DE AIRBUS A320 Y ATR 72-600 AVIATECA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 31 de agosto de 2020.

Luis Pedro Mendizábal Fuentes

Guatemala, 23 de septiembre de 2020

Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Morales:

Sirva la presente para desearle éxitos y satisfacciones personales y profesionales. Aprovecho la oportunidad para hacer de su conocimiento que en esta fecha concluí la asesoría y revisión del trabajo de graduación “**PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA HANGAR DE MANTENIMIENTO DE AIRBUS A320 Y ATR 72-600 AVIATECA**”, realizado por el estudiante **Luis Pedro Mendizábal Fuentes**, registro académico **201602589** y CUI **3001 90115 0101**, de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de esta casa de estudios superiores.

Agradeceré el seguimiento correspondiente,

atentamente,



Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado 3071



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.135.2020

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA HANGAR DE MANTENIMIENTO DE AIRBUS A320 Y ATR 72-600 AVIATECA** desarrollado por el estudiante **Luis Pedro Mendizábal Fuentes**, con Registro Académico **201602589** y CUI **300190115010**, recomienda su aprobación.

“Id y Enseñad a Todos”



Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, septiembre 2020



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.119.2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA HANGAR DE MANTENIMIENTO DE AIRBUS A320 Y ATR 72-600 AVIATECA** del estudiante de **Luis Pedro Mendizábal Fuentes, CUI 300190115010**, Reg. Académico **201602589** y luego haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, septiembre 2021

/aej

DTG. 406.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA HANGAR DE MANTENIMIENTO DE AIRBUS A320 Y ATR 72-600 AVIATECA**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Pedro Mendizábal Fuentes**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, septiembre de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser una importante influencia en mi vida.
- Mis padres** Rodrigo Mendizábal y Lourdes Fuentes, su amor será siempre mi inspiración y su apoyo ha sido vital para mí, lo apreciaré siempre. Tenerlos como padres es para mí un gran orgullo.
- Mis hermanas** María José y Luisa María Mendizábal Fuentes, por su apoyo y cariño.
- Mis abuelos** Francisco Mendizábal y Rodolfo Fuentes, por ser un ejemplo académico a seguir que me motiva a seguir aprendiendo y ser el mejor.
- Mis abuelas** Primina Burastero y Ana Mendoza, por ser un ejemplo intelectual y de esfuerzo que me motiva a no rendirme en las adversidades y seguir esforzándome.
- Mis tíos** Ricardo Mendizábal, Karen López, Raúl, Graciela Fuentes y Marina de León, por ser un ejemplo intelectual, de superación y de esfuerzo que me motiva a mejorar continuamente.

AGRADECIMIENTOS A:

- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por ser mi *alma máter*, por permitirme el aprender una profesión, por enseñarme a ser autodidacta y darme las herramientas para ser un ingeniero mecánico útil para la sociedad.
- Facultad de Ingeniería** Por darme las bases de la ingeniería mecánica.
- Mis amigos de la Facultad** Fernando López, Saúl Guzmán, Diego Cabrera, Nery Herrera, Alfonso Reyes, Sebastian Sánchez, Manuel López, Luis Juarez, Armando Colón, Danna Zaldivar, Celeste Cuellar, Beverly Guzmán, Mariah Diaz, Rodrigo Vera, José Yac, Helmut Kamper, Mario Lazárrabal, Armando Sánchez, Christian de la Cruz, Carlos Figueroa, Nixon Noriega ,Juan Hernández, Jorge Hernandez, Josué Quiñonez , José Santizo, Annelisse Argueta, Darlene Santizo, Sucely Aguirre y demás amigos por su apoyo y amistad durante mi vida universitaria.

Aviateca y su personal

Por permitirme realizar mi trabajo de investigación en sus instalaciones, por enseñarme acerca del mundo de la aviación y por el buen trato que tuvo conmigo todo el equipo de Aviateca.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Descripción general.....	1
1.2. Datos del compresor actual	2
1.3. Análisis del diseño actual de tubería de aire comprimido	3
1.4. Cálculo de requerimientos actuales de aire comprimido	5
2. FASE DE INVESTIGACIÓN	9
2.1. Compresores	9
2.1.1. Compresores reciprocantes.....	9
2.1.2. Compresores de tornillo rotativo	11
2.2. Caudal de aire comprimido.....	12
2.3. Presión de trabajo de herramientas neumáticas	13
2.4. Tubería	13
2.4.1. Clases de tubería.....	14
2.4.1.1. Tubería rígida	14
2.4.1.2. Tubería semi-rígida.....	15
2.4.1.3. Tubería flexible	15
2.4.2. Longitud de tubería.....	15

2.4.3.	Diámetro de tubería.....	17
2.5.	Factores a considerar en la instalación de la tubería	21
2.6.	Uniones de tubería.....	23
2.6.1.	Unión por brida.....	23
2.6.2.	Unión roscada	24
2.7.	Tabla de propiedades de tubo comercial de acero	26
2.8.	Accesorios.....	27
2.8.1.	Tipos de accesorios	27
2.8.1.1.	Codos.....	28
2.8.1.2.	Tees	28
2.8.1.3.	Reducciones.....	29
2.8.1.4.	Niples	30
2.8.1.5.	Acoples rápidos.....	30
2.8.1.6.	Filtros.....	31
2.8.1.7.	Lubricador de aire comprimido	32
2.8.1.8.	Unidad de mantenimiento de aire comprimido.....	33
2.8.1.9.	Manómetros	34
2.8.2.	Pérdidas ocasionadas por accesorios.....	35
2.8.3.	Instalación de accesorios	37
2.9.	Cálculo de presión teórica.....	38
2.10.	Cálculo de caudal teórico	39
3.	FASE TÉCNICO-PROFESIONAL.....	41
3.1.	Selección del circuito de aire a utilizar	41
3.1.1.	Circuito cerrado	41
3.1.2.	Circuito abierto	43
3.1.3.	Circuito mixto.....	44
3.1.4.	Definición del circuito de aire comprimido	44

3.2.	Realización de planos del sistema de aire comprimido	44
3.3.	Selección de tubería a utilizar.....	51
3.4.	Selección de accesorios a utilizar.....	52
3.5.	Determinación del soporte de la tubería	53
3.6.	Cálculo del requerimiento de presión	57
3.7.	Cálculo del requerimiento de caudal	58
3.8.	Cálculo de la longitud de la tubería	62
3.9.	Cálculo de pérdidas.....	64
3.10.	Dimensionamiento de tubería y accesorios.....	65
3.11.	Selección del compresor a utilizar	72
3.12.	Selección del tanque de aire a utilizar	74
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
4.1.	Encuesta para determinar la opinión del personal de Aviateca acerca del sistema de aire comprimido actual	79
4.2.	Análisis de la información obtenida con la encuesta acerca del sistema de aire comprimido actual	81
4.3.	Encuesta para determinar la opinión del personal de Aviateca acerca de la propuesta del sistema de aire comprimido.....	84
4.4.	Análisis de la información obtenida con la encuesta acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido	86
4.5.	Comparar si la propuesta, en opinión del personal de Aviateca, cumplirá con sus requerimientos y corregirá las fallas del sistema actual.....	89
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES.....	93
	BIBLIOGRAFÍA.....	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Compresor del hangar Aviateca.....	3
2.	Distribución de aire comprimido actual.....	4
3.	Formas de trabajar el pistón en compresores recíprocos.....	10
4.	Diagrama funcional de compresor de tornillo	12
5.	Línea de aire comprimido con dispositivos de purga	22
6.	Unión de tubería por brida.....	24
7.	Uniones roscadas de tubería	25
8.	Codo.....	28
9.	Te	29
10.	Reducción	29
11.	Niple	30
12.	Acople rápido	31
13.	Filtro de aire comprimido.....	32
14.	Lubricador de aire comprimido.....	33
15.	Unidad de mantenimiento	34
16.	Manómetro tipo Bourdon.....	35
17.	Circuito cerrado.....	42
18.	Circuito abierto	43
19.	Esquema de la propuesta de red de aire comprimido	47
20.	Planos de la red de aire comprimido del área de pintura. Cota en metros	48
21.	Planos de la red de aire comprimido del área de hangar. Cota en metros	48

22.	Planos de la red de aire comprimido del área de hangar hacia áreas de rampa y talleres. Cota en metros	49
23.	Diseño de los manifold de extremos de línea	50
24.	Diseño de los manifold intermedios del hangar	50
25.	Abrazadera de lazo.....	54
26.	Abrazadera de horquilla.....	55
27.	Ménsula sencilla	56
28.	Abrazadera para tubo tipo omega.....	56
29.	Compresor recíprocante pequeño.....	75
30.	Gráfica circular pregunta 1 acerca del sistema actual	81
31.	Gráfica circular pregunta 2 acerca del sistema actual	82
32.	Gráfica circular pregunta 3 acerca del sistema actual	82
33.	Gráfica circular pregunta 4 acerca del sistema actual	83
34.	Gráfica circular pregunta 5 acerca del sistema actual	83
35.	Gráfica circular pregunta 1 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido	86
36.	Gráfica circular pregunta 2 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido	87
37.	Gráfica circular pregunta 3 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido	87
38.	Gráfica circular pregunta 4 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido	88
39.	Gráfica circular pregunta 5 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido	88

TABLAS

I.	Requerimientos de flujo aire comprimido de herramientas neumáticas.....	6
II.	Presiones de trabajo de herramientas neumáticas	7
III.	Equivalencia de accesorios con codos a 90°	16
IV.	Factores (F) de pérdidas de presión por fricción en tuberías para cualquier presión inicial	19
V.	Pérdidas de presión de aire en accesorios de tubería tabulado como longitud equivalente de tubo recto en pies	20
VI.	Tabla de propiedades de tubería de acero.....	26
VII.	Accesorios de tubería principal	53
VIII.	Accesorios tuberías secundarias	53
IX.	Distancias de soporte de tubería.....	54
X.	Presiones de trabajo de herramientas neumáticas	57
XI.	Requerimiento de caudal en lijado	60
XII.	Requerimiento de caudal en pintura.....	61
XIII.	Longitud en tubo recto de accesorios línea principal	63
XIV.	Longitud en tubo recto de accesorios líneas secundarias.....	63
XV.	Longitud en tubo recto de accesorios línea principal, segunda iteración.....	68
XVI.	Longitud en tubo recto de accesorios líneas secundarias, segunda iteración.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
PVC	Cloruro de polivinilo
CFM	<i>Cubic feet per minute</i> ; pies cúbicos por minuto
m	Metro
m³/h	Metros cúbicos por hora
m³/s	Metros cúbicos por segundo
psig	<i>pounds per square inch gauge</i>
psi	<i>pounds per square inch</i>
”	Pulgadas
bar	Unidad de presión. Equivalente a 1 millón de barias

GLOSARIO

Caudal	Cantidad de fluido que circula a través de una sección de ducto por unidad de tiempo.
<i>Code for Power Piping</i>	Código para tubería a presión.
Densidad	Magnitud física que describe la cantidad de masa contenida en un volumen dado de una sustancia u objeto sólido.
LibreCAD	Software de código libre de diseño asistido por computadora CAD.
Temperatura	Magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, objeto o del medio ambiente, la cual puede ser medida con un termómetro.
Tubería	Conducto cuya función de transportar líquidos o gases.

RESUMEN

En el presente informe se muestra un análisis del diseño de un sistema de aire comprimido para herramientas neumáticas. El lector encontrará una descripción de las distintas partes que conforman un sistema de aire comprimido, y las diferentes opciones de las mismas que se tienen para montar un sistema de aire comprimido.

En la primera parte se encontrará la teoría referente acerca de sistemas de aire comprimido, siendo base fundamental para el posterior diseño, análisis de pérdidas y dimensionamiento de dichos sistemas.

Posteriormente se realiza la selección del circuito neumático que se adecue a las necesidades del hangar, el cálculo de la demanda de presión y caudal en base a una proyección a la expansión de las labores del hangar, la realización de los planos del diseño del sistema neumático, el dimensionamiento de la tubería, la selección de los accesorios y la selección del compresor.

Al finalizar el documento, se podrá establecer los tipos de compresores que se pueden utilizar, los accesorios que se pueden colocar y la importancia del correcto dimensionamiento del sistema en general. Esto mediante cálculos matemáticos y la utilización de tablas especializadas en diseño de sistemas de aire comprimido, las cuales podrá encontrar en el mismo.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de aire comprimido que satisfaga los requerimientos de flujo de aire del hangar de mantenimiento Aviateca junto a una futura expansión de sus operaciones.

Específicos

1. Determinar los requerimientos de flujo de aire actuales del hangar Aviateca.
2. Obtener una base teórica de los elementos de un sistema de aire comprimido.
3. Diseñar un sistema de aire comprimido que cumpla los requerimientos de flujo de aire del hangar Aviateca junto con la expansión de sus operaciones, con una pérdida de presión menor al 6 % y con los accesorios correctos para facilitar su uso y mantenibilidad.
4. Evaluar mediante una encuesta la opinión de los técnicos como del encargado de las facilidades acerca del sistema de aire comprimido actual y la propuesta.

INTRODUCCIÓN

A continuación, se presenta una propuesta para el taller de mantenimiento aeronáutico Aviateca, con la finalidad de otorgarles la información necesaria para la adquisición de un nuevo compresor y red de aire comprimido en general, si es que desean aumentar su capacidad. Adicional el sistema está pensado para que se puedan llevar operaciones simultáneamente a la operación de pintura.

Para poder llevar a cabo el trabajo se tomaron las medidas de las distancias en los distintos puntos donde se requieren salidas de aire comprimido, se habló con el personal para identificar las necesidades de aire comprimido , se llevó a cabo la investigación acerca de los diferentes elementos que conforman un sistema de aire comprimido y con el método de pérdida de presión se dimensionó la tubería, y accesorios del sistema con la finalidad de alcanzar una pérdida en todo el sistema menor al 6 %.

Posteriormente se compartió algunas encuestas con el personal, para cuantificar que tanto afectan algunas de las fallas del sistema actual, y si son consideradas útiles las mejoras y adiciones que hay en el sistema de aire comprimido propuesto. Pudiendo comparar y conocer la opinión del personal se pudo determinar que la propuesta ofrece diversas mejoras sobre el sistema actual, que van a permitir mejorar las condiciones de trabajo y hacer más eficiente la operación en el taller.

1. ANTECEDENTES

1.1. Descripción general

Aviateca fue la primera aerolínea funcional de Guatemala, ofreciendo a los guatemaltecos vuelos nacionales e internacionales. De 1945 (cuando formalmente era conocida como Aviateca) hasta 1990 estuvo trabajando como aerolínea guatemalteca. Fue en 1990 cuando pasó a ser parte del grupo TACA de El Salvador, una alianza de varias aerolíneas centroamericanas, las cuales se fusionaron en 2010 con la aerolínea Avianca formando la hoy denominada Avianca Holdings. Desde ese momento hasta la actualidad Aviateca ha sido el taller MRO de Avianca Holdings en Guatemala.

Aviateca realiza los servicios de mantenimiento preventivo y correctivo en el hangar ubicado en la orilla de la pista del Aeropuerto Internacional La Aurora, zona 13 de Guatemala. Para realizar dichas labores cuentan con personal técnico capacitado y diversas herramientas mecánicas, eléctricas, hidráulicas y neumáticas.

La empresa Aviateca actualmente posee un compresor Quincy Qt-30 del tipo reciprocante, con una capacidad de 105 CFM y con una presión máxima de 140 psi. La mayor parte de la tubería es de Acero Galvanizado con un diámetro de 1 ½ pulgadas, con derivaciones de ¾ pulgadas de diámetro.

La tubería del hangar tiene muchos años de estar en uso, por lo tanto, es acertado estimar que su interior debe tener corrosión. Colocada de forma aérea en una parte de su recorrido, y con la parte de la tubería que cruza el hangar colocada bajo suelo. Esto último, debido a que para que exista suficiente espacio para movilizar los aviones el colocar tubería aérea haría imposible esta tarea.

Se puede dividir -para explicar mejor el estado actual de la tubería- en tres secciones: área de pintura, área de hangar (donde se realizan los trabajos directamente del avión) y área de rampa (esta se encuentre afuera del hangar, pero ocasionalmente se utiliza para realizar trabajos).

El área de compresores se encuentra cerrada únicamente por rejas, y deja expuesta el área al polvo y otros contaminantes, sin embargo, el paso de aire por el cuarto es muy bueno para refrigerar el área. El piso es de concreto y el compresor está anclado por 4 tornillos al suelo. Después de una inspección visual se observó que no tienen ningún aislamiento de vibración.

1.2. Datos del compresor actual

- Marca: Quincy
- Modelo: Qt-30
- Tipo de compresor: Reciprocante
- Numero de etapas: 2
- Numero de cilindros: 4 cilindros en V
- CFM a 175 psig a RPM minimum: 70
- CFM a 175 psig a RPM máxima: 105,90
- Potencia de motor eléctrico: 20-30 HP
- Cuenta con filtros de aire para partículas
- RPM mínima: 600

- RPM máxima: 960
- Tamaño del tanque: 200 galones, equivalente a 0,757082 m³
- Presión máxima de trabajo: 140 psi

El compresor puede observarse en la figura 1.

Figura 1. **Compresor del hangar Aviateca**



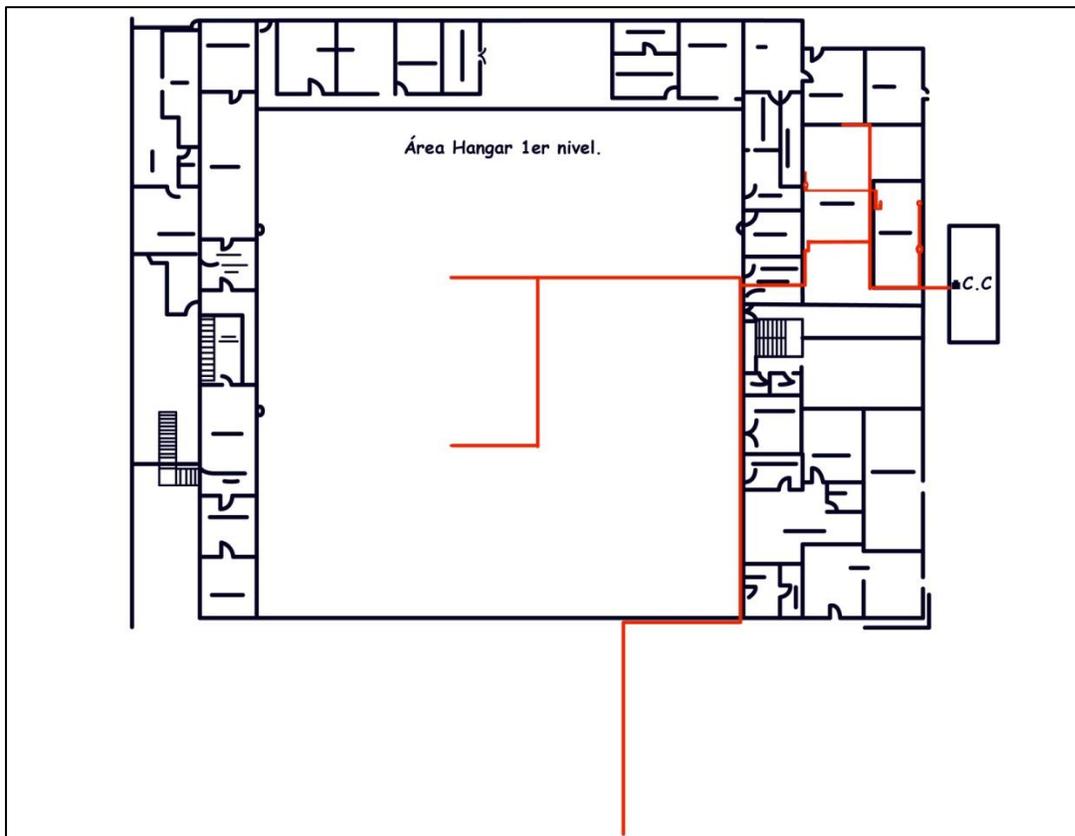
Fuente: elaboración propia, Aeropuerto Internacional la Aurora. *Hangar Aviateca*.

1.3. Análisis del diseño actual de tubería de aire comprimido

El sistema actual de aire comprimido del hangar Aviateca es un sistema con el que han trabajado durante muchos años. Parte del mismo se encuentra bajo tierra puesto que de esta manera no interfiere con el movimiento de aviones dentro del hangar.

La distribución de aire comprimido se puede observar en la figura 2:

Figura 2. **Distribución de aire comprimido actual**



Fuente: elaboración propia, empleando LibreCAD 2016 y Adobe Illustrator CC 2017.

El sistema de aire comprimido presenta algunas fallas y aspectos que no se tomaron bien en cuenta en su diseño:

- Pocas o casi ninguna válvula de cierre, y al momento de realizar mantenimiento en el sistema causa que se tengan que cerrar secciones muy grandes. Esto obstaculiza las operaciones del hangar, y muchas veces se prefiere dejar que el sistema tenga fugas en lugar de solucionar

el problema. El permitir fugas de aire durante mucho tiempo representa una pérdida económica puesto que el compresor trabaja más, por ende, tendrá un consumo mayor en energía eléctrica.

- Vueltas innecesarias, lo cual causa debido a los accesorios una pérdida de presión por fricción.
- La tubería es antigua, por lo tanto, es correcto asumir que tiene en su interior corrosión debido a la presencia de agua condensada.
- El soporte de la tubería no es el idóneo.

Las mangueras (tubería flexible) son de un tamaño bastante considerable, dado que, la mayoría supera los 20 m de longitud. Además, algunas tienen fugas a lo largo de su cuerpo y en los acoples.

1.4. Cálculo de requerimientos actuales de aire comprimido

Después de observar el trabajo que se lleva a cabo en las instalaciones de Aviateca, se pudo observar cuales son las herramientas neumáticas más usadas y con qué frecuencia y simultaneidad se utilizan. Estos datos son muy importantes para calcular el flujo de aire requerido por el taller para sus actividades normales.

Revisando las fichas técnicas de las distintas herramientas se encontraron los datos relevantes para el cálculo de los requerimientos actuales del taller. Sin embargo, en la empresa Aviateca no contaban con las fichas técnicas de todas las herramientas, y para algunas se utilizaron valores encontrados en internet de herramientas de características similares.

Para encontrar los requerimientos de flujo de aire comprimido para las operaciones actuales regulares de la empresa Aviateca se requirió la observación de dichas actividades para identificar las herramientas más usadas, en qué cantidad y con qué simultaneidad. Adicionalmente se investigó el consumo de aire para cada una de esas herramientas de forma individual.

Tabla I. **Requerimientos de flujo aire comprimido de herramientas neumáticas**

Cantidad	Herramienta	Consumo (CFM)	Coefficiente de utilización	Coefficiente de simultaneidad	Total (CFM)
4	Lijadora	17	0,6	0,62	25,30
3	Barreno	14	0,7	0,62	18,23
2	Pistola de pintura	15	0,6	0,62	11,16
2	Remachadora	8,5	0,7	0,62	7,38
2	Sopladora de aire	4,25	0,5	0,62	2,64

Fuente: Starline. *Manuales de herramientas neumáticas*. <http://www.starline.com.mx/site/wp-content/uploads/2012/12/Consumos-de-aire-y-presi%C3%B3n-promedio-en-herramientas-neum%C3%A1ticas.pdf>. Consulta: 11 de abril de 2020.

Al sumar los totales (en CFM), se obtiene el requerimiento de flujo de aire comprimido, este es de 64,71 CFM, este es inferior al flujo de aire capaz de entregar el compresor Quincy Qt-30.

Para encontrar el requerimiento de presión, se deben listar las presiones de trabajo de las distintas herramientas.

Tabla II. **Presiones de trabajo de herramientas neumáticas**

Herramienta	Presión de trabajo (Psi)
Lijadora	90
Equipo de pulverización para pintura	100
Pistola de Pintura	43
Sopladora de aire comprimido	90
Remachadora	110
Barreno	90

Fuente: Starline. *Manuales de herramientas neumáticas*. <http://www.starline.com.mx/site/wp-content/uploads/2012/12/Consumos-de-aire-y-presi%C3%B3n-promedio-en-herramientas-neum%C3%A1ticas.pdf>. Consulta: 11 de abril de 2020.

Al encontrar las presiones de trabajo para las diferentes herramientas neumáticas que se utilizan en la empresa Aviateca, se determina que la presión más alta es de 110 psi, sumándole un 5 % aproximado por pérdidas de presión se obtiene un requerimiento de 115,5 psi.

Por lo tanto, se determina que los requerimientos actuales de aire comprimido en la empresa Aviateca son: Una presión de 115,5 psi y un caudal de 73,03 CFM. Los cuales son suministrados por el compresor Quincy Qt-30, ya que este supera dichos valores.

2. FASE DE INVESTIGACIÓN

2.1. Compresores

Un compresor es una máquina cuya función es la de comprimir aire o algún otro gas compresible. Para el presente caso aspiran el aire a presión atmosférica y lo comprimen mediante energía mecánica hasta alcanzar una presión superior.

El aire al ser comprimido experimenta un aumento en su densidad, así como un aumento en su temperatura. Existen diversas formas de comprimir el aire, y existen diferentes tipos de compresores, algunos ejemplos de ellos son:

- Compresor de émbolo
- Compresor centrífugo
- Compresor rotativo de paletas
- Compresor de tornillo
- Compresor recíprocante

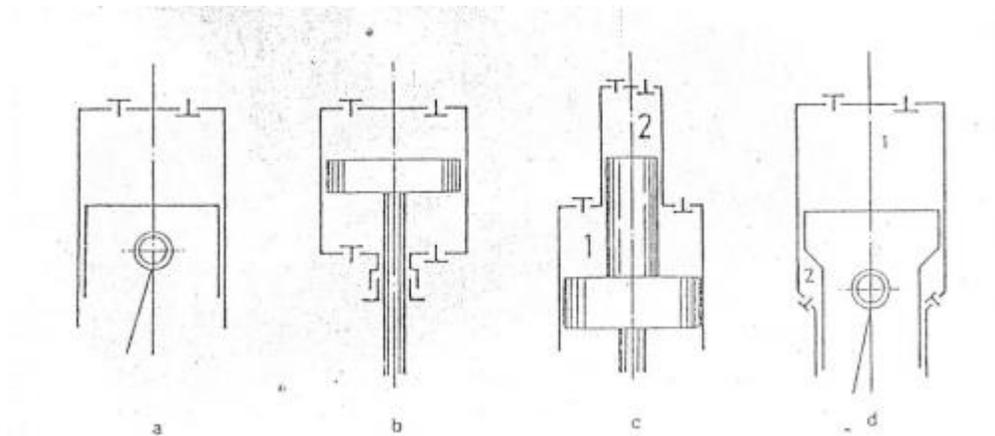
Para motivos de este trabajo se les dará énfasis a las características de los compresores de tipo recíprocante y de tornillo.

2.1.1. Compresores recíprocantes

Como su nombre lo indica comparten ciertas similitudes con los motores de combustión interna recíprocantes. Utilizando un mecanismo biela manivela, el cual permite desplazar hacia delante y hacia atrás un pistón a través de una

cámara cilíndrica. Esta cámara esta provista con válvulas que admiten y descargan el gas.

Figura 3. **Formas de trabajar el pistón en compresores recíprocos**



Fuente: CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones*. p. 58.

Los compresores recíprocos se pueden clasificar por el número de etapas con las que trabajan en:

- **Compresores de una etapa:** Son compresores de potencias pequeñas. Disponen, como lo indica su nombre, de solo una etapa de compresión. Refrigerados por aire, por medio de aletas en su exterior. En este tipo de compresores la temperatura de salida del aire se sitúa en 180° con una posible variación de $\pm 20^{\circ}$.
- **Compresores de doble etapa:** Son compresores cuyo aire es comprimido en dos etapas: la primera (conocida como de baja presión) alcanza de 30 a 44 psi aproximadamente y la segunda (conocida como de alta presión)

alcanza presiones de 120 o más psi, esto dependiendo del compresor. Pueden ser refrigerados por aire o por agua. En este tipo de compresores la temperatura de salida del aire se sitúa en 130 ° con una posible variación de ± 15 °.

Los compresores recíprocos también se pueden clasificar por el modo de trabajar del pistón en:

- Simple efecto: el compresor trabaja sobre la cara del pistón, posee solo una cámara de compresión.
- Doble efecto: el compresor trabaja sobre las dos caras del pistón, teniendo dos cámaras de compresión. Dado que la biela está dentro de una de las cámaras el volumen de aire comprimido no será el mismo en ambas cámaras.

2.1.2. Compresores de tornillo rotativo

Compuestos por dos rotores helicoidales (tornillos rotativos) que comprimen el gas entre las cámaras que se forman entre las caras de los lóbulos helicoidales encajados y la carcasa. Están dispuestos de manera que el rotor macho se encuentra dotado de lóbulos y el rotor hembra con surcos diseñados para encajar con los lóbulos del rotor macho durante la rotación.

El accionamiento de este sistema se produce por el extremo del eje que lleva el rotor macho y este mueve al rotor hembra, ya sea por contacto o por medio de engranajes bien sincronizados. El rotor macho es el que absorbe la mayor parte de la potencia, siendo esta de alrededor del 85 al 90 % del total, dejando para el rotor hembra de 15 a 10 % de potencia.

Figura 4. **Diagrama funcional de compresor de tornillo**



Fuente: CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones*.
p. 73.

Los rotores giran a velocidades lentas (generalmente entre 1300-2400 rpm) sostenidos por rodamientos de bolas y rodillos, con una película de aceite para sellar el espacio de compresión y ayudar con la refrigeración del sistema.

2.2. Caudal de aire comprimido

Caudal se refiere como la cantidad (en este caso aire comprimido) que fluye por un lugar en una cantidad de tiempo. Por lo tanto, se tienen que manejar dos conceptos al hablar de caudal: cantidad y tiempo.

Con respecto a la cantidad se puede medir en términos de la masa de la sustancia o en términos del volumen que esta ocupa. En ese caso se hablaría de un caudal másico y un caudal volumétrico respectivamente. Lo más común de

encontrar en fichas técnicas de equipos, herramientas y compresores es el caudal volumétrico, puesto que no depende de la densidad (como si depende el másico debido a los cambios de temperatura).

Con respecto a la variable tiempo dependerá del sistema de medidas a utilizar si se medirá en segundos, minutos u horas. En Europa lo más común es expresar el caudal en metros cúbicos por hora (m^3/h) o metros cúbicos por segundo (m^3/s). En Estados Unidos lo más común son los pies cúbicos por minuto (CFM).

2.3. Presión de trabajo de herramientas neumáticas

Como su nombre lo indica las herramientas neumáticas utilizan la energía almacenada en el aire comprimido para transformarla en energía mecánica u otro tipo de energía. Algunos ejemplos comunes de herramientas neumáticas son: taladros, martillos neumáticos, esmeriladoras, lijadoras, engrapadoras, aerógrafos, pistolas de soplado, entre otras.

Uno de los parámetros más importantes relacionados al funcionamiento de las herramientas neumáticas es la presión máxima de trabajo. Esta es la requerida por la herramienta para su correcto funcionamiento. La información del requerimiento de presión tiene que venir con la ficha técnica de la herramienta.

2.4. Tubería

Generalmente al usar el término se aplica ampliamente abarcando al tubo, accesorios y demás componentes de un sistema que conduce fluidos. Por tubo se refiere al conducto por el cual se transportan diversos fluidos. Los tubos

pueden ser elaborados de distintos materiales, por ejemplo: acero, hierro, cobre, aluminio, PVC, entre otros.

Los tubos de presión se emplean para el transporte de fluidos a presiones y temperaturas debajo de cero, elevadas o normales. Los diámetros de dichos tubos varían desde 1/8" hasta un diámetro exterior de 36". Se producen en diversos espesores de pared. Se venden comercialmente en diversas longitudes siendo una de las más comunes 6m, con la posibilidad de tener extremos roscados o lisos.

2.4.1. Clases de tubería

A continuación, se describen las clases o tipos de tuberías que hay.

2.4.1.1. Tubería rígida

Son aquellas que no poseen movimientos relativos, usadas cuando son instalaciones permanentes y se manejan altas presiones. Se emplean tubos metálicos, sobre todo.

Las más comunes son las de hierro galvanizado, las cuales poseen un tratamiento con zinc lo que le da cierta resistencia a la corrosión. Dado que estas tuberías se mantienen en uso por varios años el protegerlas de la corrosión es muy importante para cuidar la inversión. Las tuberías de cobre, por ejemplo, son usadas cuando las instalaciones son de reducido diámetro y trabajan en un medio poco corrosivo.

2.4.1.2. Tubería semi-rígida

Estas tuberías poseen cierta capacidad de deformarse, que es útil en su instalación y mantenimiento. Están fabricadas en gran parte de materiales termoplásticos como el PVC y el polietileno. Las tuberías semi-rígidas pueden conducir aire a moderadas presiones, son livianas y de un costo relativamente bajo. Pueden soportar medios corrosivos y ligeros desplazamientos sin sufrir daños.

2.4.1.3. Tubería flexible

Estas tuberías son más conocidas como mangueras, son muy útiles ya que su campo de aplicación es amplio, esto debido a que son capaces de soportar deformaciones, vibraciones, medios corrosivos y una gran gama de presiones, dependiendo del material del cual son fabricadas.

Algunos de los materiales más usados en la fabricación de mangueras son: Nylon, PVC flexible, caucho y lona. El espesor de su pared determinará su resistencia, así como el material del cual están elaboradas.

Las mangueras básicamente están constituidas por un forro interior liso, resistente a la neblina de aceite, una capa intermedia resistente a la presión y de un forro externo flexible que les proporciona resistencia a los solventes y la abrasión.

2.4.2. Longitud de tubería

Dado que el paso de aire por las paredes del tubo causa pérdida de presión debido a la fricción la longitud de la tubería es un factor vital para conocer la

pérdida de presión. Los accesorios también tienen un efecto en la pérdida de presión por presión, para calcular este efecto se convierten los accesorios a una longitud equivalente de tubo recto.

Para determinar la longitud equivalente de tubo recto que representan los accesorios pueden utilizarse dos métodos para el cálculo:

- Relacionar los accesorios directamente con la longitud equivalente de tubo recto. Estos valores dependen del diámetro de la tubería.
- Relacionar los accesorios haciendo una equivalencia entre la pérdida que generarían estos y la pérdida que generaría un codo a 90° del mismo diámetro. Esto se conocen como codos equivalentes; luego mediante la fórmula 1 se pasa ese valor a la longitud equivalente en tubo recto.

$$L_e = (\text{No. de codos equivalentes}) * \frac{(25 * \text{diámetro del tubo})}{12} \quad (\text{f.1})$$

Para relacionar los diferentes accesorios con su cantidad de codos equivalentes puede utilizar la información de la tabla III.

Tabla III. **Equivalencia de accesorios con codos a 90°**

Accesorios	Codos equivalentes	
	Tubo de hierro	Tubo de cobre
Válvula de ángulo radiador	2,0	3,0
Válvula de globo abierta	12,0	17,0
Válvula de compuerta abierta	0,5	0,7
Te con desviación 100 %	1,8	1,2
Te con desviación 50 %	4,0	4,0
Te con desviación 33 %	9,0	11,0
Te con desviación 25 %	16,0	20,0

Continuación de la tabla III.

Codo de 90 grados	1,0	1,0
Codo de 90 grados curva grande	0,5	0,5
Codo de 45 grados	0,7	0,7
Retorno U abierto	1,0	1,0
Unión de reducción	0,7	0,4

Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Diámetro de tubería

El dimensionamiento de la tubería es de suma importancia, esto debido a que las pérdidas de presión debido a la fricción que sufre un fluido son proporcionales al diámetro de la misma.

Por esta razón es muy importante calcular el diámetro óptimo, que cause una pérdida de presión aceptable; generalmente es aceptado una pérdida de presión entre 3 % a 6 %, esto lo definirá el diseñador del sistema.

Para determinar el diámetro óptimo de un sistema de distribución neumático se deben seguir los siguientes pasos:

- Calcular el consumo de aire comprimido total de la instalación, sumando los consumos individuales de todas las herramientas y/o equipos neumáticos.
- Determinar el caudal requerido por la instalación, sumándole al consumo total de los equipos lo siguiente: 5 % por desgaste, 10 % por fugas y de un

20 % a 30 % por futuras ampliaciones. Esto último queda a discreción del diseñador de la instalación.

$$Q_T = Q + Q*(0,05+0,10+0,30) \quad (f.2)$$

- Determinar la presión máxima de la instalación, la cual dependerá de la presión de trabajo del equipo o herramienta neumática.
- Determinar la pérdida de presión admisible; la cuál es la pérdida basada en la variación de presión que puede sufrir la instalación sin repercutir en el correcto funcionamiento del equipo neumático.
- Determinar la longitud equivalente de la siguiente manera.

$$\text{Longitud equivalente} = L. \text{ real tubería} + L. \text{ Equivalente de accesorios} \quad (f.3)$$

Para poder determinar la longitud equivalente de accesorios, se utiliza un diámetro arbitrario; la longitud equivalente tendrá variaciones al cambiar el diámetro.

- Calcular la pérdida de presión en la tubería, de la siguiente manera.

$$P = \frac{(\text{Factor de pérdida (F)} * \text{Longitud equivalente})}{\text{Factor de tubería (R)} * 1000} \left(\frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}, \text{Psi} \right) \quad (f.4)$$

El factor de tubería (R) se determina de la siguiente manera:

$$R = (P. \text{Instalaciones} + P. \text{Manométrica}) / P. \text{Manométrica} \quad (f.5)$$

El factor de pérdida (F) se determina en la tabla IV, con el diámetro de la tubería en pulgadas y el caudal de aire requerido por la instalación en CFM.

Tabla IV. **Factores (F) de pérdidas de presión por fricción en tuberías para cualquier presión inicial**

CFM	½"	¾"	1"	1 ¼"	1 ½"	2	2 ½"	3"	4"
5	12,7	1,2	0,5						
10	50,7	7,8	2,2	0,5					
15	114	17,6	4,9	1,1					
20	202	30,4	8,7	2	0,9				
30	456	70,4	19,6	4,5	2				
40	811	125,3	34,8	8,1	3,6				
50		196	54,4	12,6	5,6	1,5			
60		282	78,3	18,2	8	2,2			
70		385	106,6	24,7	10,9	2,9	1,1		
80		503	139,2	32,3	14,3	3,8	1,5		
90		646	176,2	40,9	18,1	4,8	1,9		
100		785	217,4	50,5	22,3	6	2,3		
150			490	113,6	50,3	13,4	5,2	1,6	
200			870	202	89,4	23,9	9,3	2,9	
300				454	201	53,7	20,9	6,6	
400						94,7	37,1	11,7	2,7
500						150	58	18,3	4,3
600						215	83,5	26,3	6,2
700						294	113,7	35,8	8,5
800						382	148,4	46,7	11,1
900						486	188	59,1	14
1 000						600	232	73	17,3

Fuente: CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones*.

p. 214.

- Se encuentra el valor de la pérdida de presión en porcentaje:

$$\% \text{ pérdida de presión} = (\text{Pérdida de presión} / \text{Presión de la instalación}) * 100 \text{ (f.6)}$$

- Se compara la pérdida de presión de la instalación con el valor de pérdida de presión admisible en la instalación. Si el primero es mayor, se requiere aumentar el diámetro de la tubería y volver a realizar los cálculos.

El valor óptimo del diámetro se encuentra por medio de tanteos, procurando que sea el diámetro más pequeño que genere una pérdida de presión menor o igual a la admisible en la instalación. Esto permitirá tener una instalación que tenga una pérdida de presión admisible y ahorrar costos en materiales al comprar tubería de diámetro óptimo. Puesto que, si se utiliza una tubería de diámetro mayor, los costos de tubería y accesorios incrementarán proporcionalmente

Tabla V. **Pérdidas de presión de aire en accesorios de tubería tabulado como longitud equivalente de tubo recto en pies**

Accesorios	Tamaño nominal de tubería (plg)						
	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"
Codo	1,55	2,06	2,62	3,45	4,02	5,17	6,16
Válvula de compuerta	0,36	0,48	0,61	0,81	0,94	1,21	1,4
Válvula de ángulo	6,65	11,4	14,6	19,1	22,4	28,7	34,3
Válvula de globo	17,3	22,9	29,1	38,3	44,7	57,4	66,5
Tees	0,62	0,82	1,05	1,38	1,61	2,07	2,47
Reducción	0,066	0,132	0,165	0,198	0,231	0,33	0,66
Cuelo de cisne	0,627	0,66	0,825	1,07	1,32	1,65	
Filtro separador	0,66	0,99	1,32	1,65	1,96	2,31	3,3

Fuente: CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones*.

p. 300.

2.5. Factores a considerar en la instalación de la tubería

Una buena instalación de la tubería asegura un sistema eficiente. De igual manera, proporciona un buen, alarga la vida útil de los componentes del sistema y también ayuda a evitar fallas o mal funcionamiento en los equipos neumáticos que alimenta.

Idealmente la línea principal de aire debe ser un circuito cerrado, para que la presión y el caudal sean lo más uniformes posibles en cualquier punto de la tubería.

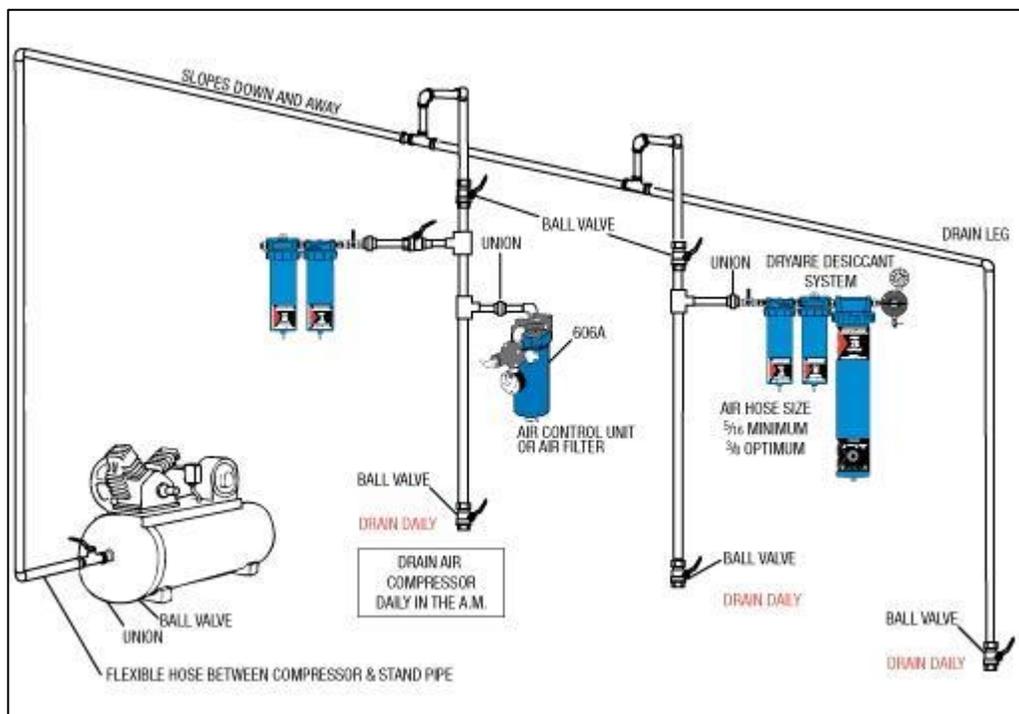
La conducción de aire debe ser lo más corta posible, tener el mínimo de curvas cerradas y no usar curvas innecesarias. Todo esto para minimizar las pérdidas de presión por fricción, ya que todo esto aumenta la longitud equivalente.

Las instalaciones de tubería rígida deben ser instaladas de tal forma que no transmitan las vibraciones producidas por el compresor y los esfuerzos no deseados debido a contracciones y dilataciones de los materiales. Para esto, se recomienda no conectar directamente el compresor a la tubería rígida, sino colocar entre la tubería rígida y el compresor manguera, esta soporta mucho mejor las vibraciones.

Las vibraciones y esfuerzos se deben evitar para evitar la aparición de fugas y otros daños en la tubería.

La instalación debe tener cierta pendiente en sentido del flujo de aire, esta para permitir que la humedad condensada llegue a los purgadores. Ésta pendiente debe de ser del 2 % o de 1 pie por cada 40 pies. Es importante colocar válvulas o dispositivos que realicen la purga de humedad condensada.

Figura 5. **Línea de aire comprimido con dispositivos de purga**



Fuente: CASSANI, Marcelo. *Red abierta*.

<https://marcelocassani.files.wordpress.com/2011/02/red-abierta.jpg>. Consulta: 5 de abril de 2020.

Para disminuir los efectos dañinos que se tienen por los esfuerzos internos de las tuberías con contracciones y dilataciones pueden utilizarse abrazaderas que posean un revestimiento interno de algún elastómero (caucho y neopreno, por ejemplo), o por medio de juntas de dilatación.

Se deben evitar las fugas para que no reduzcan la eficiencia y aumenten los costos de operación. Para evitar fugas puede aplicarse en los puntos de conexión sellantes, uno muy común y útil en este tipo de instalaciones es la cinta de teflón. Otra ventaja es que su costo es económico y es un producto de fácil adquisición.

2.6. Uniones de tubería

La instalación de tubería se realiza por obras, es decir que las secciones son cortadas a medida y se emplean en el lugar de la instalación.

Las uniones pueden ser:

- Por Bridas
- Roscadas

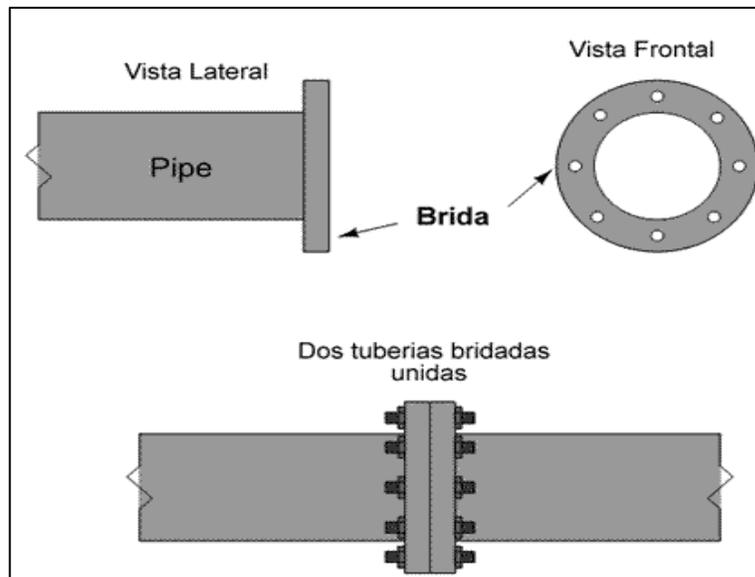
2.6.1. Unión por brida

La forma usual de unir tubería es mediante el atornillado de bridas, ya sean fundidas o forjadas que forman parte del tubo o accesorio, bridas roscadas, bridas sueltas sobre los tubos con los extremos montados y bridas dispuestas para soldarse.

La brida roscada es satisfactoria para instalaciones con presiones medias y bajas de vapor. La unión montada se permite en los mismos tamaños y capacidades nominales de servicio que las juntas con bridas integrales; son muy usadas en los trabajos de alta calidad. Con la junta de anillos se puede mantener una presión mayor con el mismo esfuerzo total en los tornillos que la que se puede tener con el tipo de junta de empaquetadura plástica.

La junta soldada elimina la posibilidad de fugas entre la brida y el tubo; se emplea con éxito en las tuberías sujetas a altas temperaturas y presiones y fuertes deformaciones por dilatación. Los requisitos específicos que cubren la aplicación de todos los tipos de juntas de uso común se detallan en el *Code for Power Piping* (Código para tubería a presión).

Figura 6. **Unión de tubería por brida**



Fuente: VILLAJULCA, José Carlos. *Instrumentación y control*.

<https://instrumentacionycontrol.net/conexiones-a-proceso-de-instrumentacion-uniones-bridadas/>.

Consulta: 6 de abril de 2020.

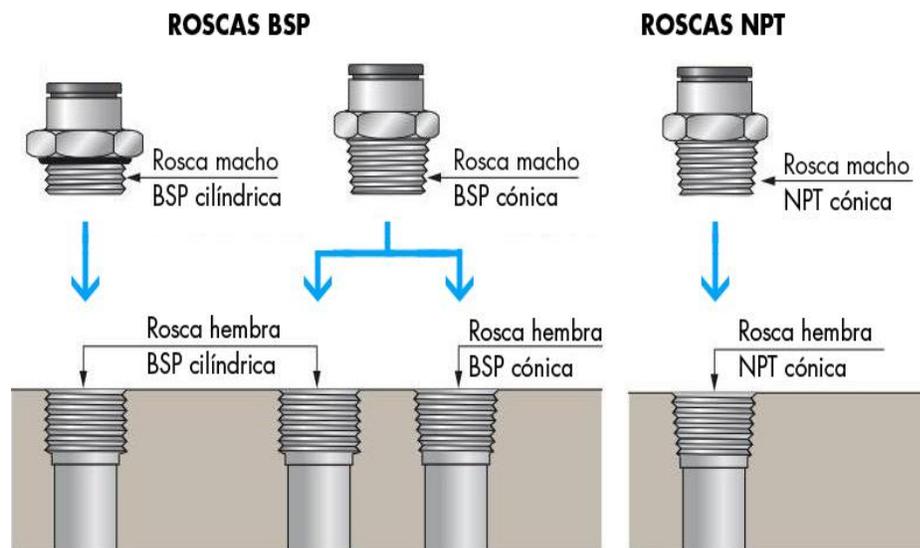
2.6.2. **Unión roscada**

Este tipo de uniones son las más usuales en tubería de diámetro inferior a las 4". Es decir, tubería de diámetro nominal pequeño.

Las rocas en los tubos difieren con las de los tornillos debido a que estas poseen cierta conicidad y les da una mejor hermeticidad al apretarlas. Y este efecto es aún mejor cuando se aplican sellantes, tales como: teflón, epóxico y permatex.

Cuando los tubos se unen mediante juntas roscadas, debe de observarse la eliminación de toda la rebaba interior que usualmente se forma al momento de hacer las roscas, y se recomienda después del roscado realizar en el tubo un rimado.

Figura 7. **Uniones roscadas de tubería**



Fuente: Soluciones Termoplásticas. *Unión de tuberías sin soldadura.*

<https://solucionestermoplasticas.com/union-de-tuberias-sin-soldadura/>. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.7. Tabla de propiedades de tubo comercial de acero

A continuación, se muestra una tabla obtenida de la empresa Grupo Vemacero C, A. Las cuales cumplen los requerimientos de la norma ASTM A53. Los diámetros mostrados son los más pequeños, puesto que, en instalaciones de aire comprimido, por regularidad no se utiliza tubería de diámetro grande

Tabla VI. Tabla de propiedades de tubería de acero



Grupo Vemacero, C.A.
TUBERIA DE ACERO AL CARBONO
API 5L / ASTM A53 / A106

www.vemacero.com

Diámetro Nominal NPS		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		ASTM A53 PRESION DE PRUEBA			
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	Grado A		Grado B	
										psi	Kg/cm2	psi	Kg/cm2
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.77	STD	40	0.85	1.27	700	49	700	49
				0.147	3.73	XS	80	1.09	1.62	850	60	850	60
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.87	STD	40	1.13	1.69	700	49	700	49
				0.154	3.91	XS	80	1.47	2.20	850	60	850	60
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	STD	40	1.68	2.50	700	49	700	49
				0.179	4.55	XS	80	2.17	3.24	850	60	850	60
1-1/4	32	1.660	42.2	0.140	3.56	STD	40	2.27	3.39	1200	84	1300	91
				0.191	4.85	XS	80	3.00	4.47	1800	127	1900	134
1-1/2	40	1.900	48.3	0.145	3.68	STD	40	2.72	4.05	1200	84	1300	91
				0.200	5.08	XS	80	3.63	5.41	1800	127	1900	134
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	STD	40	3.65	5.44	2300	162	2500	176
				0.218	5.54	XS	80	5.02	7.48	2500	176	2500	176
2-1/2	65	2.875	73	0.203	5.16	STD	40	5.79	8.63	2500	176	2500	176
				0.276	7.01	XS	80	7.66	11.41	2500	176	2500	176
				0.375	9.52	-	160	-	-	2500	176	2500	176
				0.552	14.02	XXS	-	-	-	2500	176	2500	176
3	80	3.500	88.9	0.125	3.18	-	-	4.51	6.72	1290	91	1500	105
				0.156	3.96	-	-	5.57	8.29	1600	112	1870	131
				0.188	4.78	-	-	6.65	9.92	1930	136	2260	159
				0.216	5.49	STD	40	7.58	11.29	2220	156	2500	176
				0.250	6.35	-	-	8.68	12.93	2500	176	2500	176
				0.281	7.14	-	-	9.66	14.40	2500	176	2500	176
				0.300	7.62	XS	80	10.25	15.27	2500	176	2500	176

Continuación de la tabla VI.

4	100	4.500	114,3	0.125	3.18	-	-	5.84	8.71	1000	70	1170	82
				0.156	3.96	-	-	7.24	10.78	1250	88	1460	103
				0.188	4.78	-	-	8.66	12.91	1500	105	1750	123
				0.219	5.56	-	-	10.01	14.91	1750	123	2040	143
				0.237	6.02	STD	40	10.79	16.07	1900	134	2210	155
				0.250	6.35	-	-	11.35	16.90	2000	141	2330	164
				0.281	7.14	-	-	12.66	18.87	2250	158	2620	184
				0.312	7.92	-	-	13.98	20.78	2500	176	2800	197
				0.337	8.56	XS	80	14.98	22.32	2700	190	2800	197
				0.438	11.13	-	120	19.00	28.32	2800	197	2800	197
				0.531	13.49	-	160	22.51	33.54	2800	197	2800	197
0.674	17.12	XXS	-	27.54	41.03	2800	197	2800	197				
5	125	5.563	141,3	0.188	4.78	-	-	10.79	16.09	1220	86	1420	100
				0.219	5.56	-	-	12.50	18.61	1420	100	1650	116
				0.258	6.55	STD	40	14.62	21.77	1670	117	1950	137
				0.281	7.14	-	-	15.85	23.62	1820	128	2120	149
				0.312	7.92	-	-	17.50	26.05	2020	142	2360	166
				0.344	8.74	-	-	19.17	28.57	2230	157	2600	183
				0.375	9.52	XS	80	20.78	30.94	2430	171	2800	197
6	150	6.625	168,3	0.188	4.78	-	-	12.92	19.27	1020	72	1190	84
				0.219	5.56	-	-	14.98	22.31	1190	84	1390	98
				0.250	6.35	-	-	17.02	25.36	1360	96	1580	111
				0.280	7.11	STD	40	18.97	28.26	1520	107	1780	125
				0.312	7.92	-	-	21.04	31.32	1700	120	1980	139
				0.344	8.74	-	-	23.08	34.39	1870	131	2180	153
				0.375	9.52	-	-	25.02	37.28	2040	143	2380	167
				0.432	10.97	XS	80	28.57	42.56	2350	165	2740	193
				0.562	14.27	-	120	36.39	54.20	2800	197	2800	197
				0.719	18.26	-	160	45.35	67.56	2800	197	2800	197
				0.864	21.95	XXS	-	53.16	79.22	2800	197	2800	197

Fuente: Grupo Vermacero C.A. *Tubería de acero al carbono.*

<https://www.vemacero.com/Tablas/A53MP.pdf>. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.8. Accesorios

En las instalaciones de tubería es requerida la utilización de diversos tipos de accesorios, que permitirán adecuar la instalación a la infraestructura del edificio. Además, para poder cumplir las necesidades de los equipos neumáticos.

2.8.1. Tipos de accesorios

A continuación, se describen los tipos de accesorios que hay.

2.8.1.1. Codos

Son acoplamientos rígidos cuya función es cambiar la dirección del fluido. Son utilizados cuando se ameriten giros o mover la dirección de la tubería. Existen con diversos ángulos: a 30°, 45°, 60° o 90°. Los codos pueden tener extremos de igual diámetro o con diámetros desiguales.

Figura 8. Codo



Fuente: GF Piping Systems. *Codo*.

https://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/10000X/ES/es/109760/109835/109844/P121908/product.html. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.8.1.2. Tees

Este elemento de conducción permite unificar tres tuberías; el diámetro de dichas tuberías puede ser igual o desigual según las características de la te.

Figura 9. **Te**



Fuente: GF Piping Systems. *Tees*.

https://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/10000W/MX/es/109697/109707/109723/109729/P121851/product.html. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.8.1.3. **Reducciones**

Son elementos que acoplan tuberías de diferentes diámetros, estos sirven para aumentar o disminuir el diámetro según sea la dirección del flujo.

Figura 10. **Reducción**



Fuente: Tuberías Soler. *Reducción*.

<http://www.tuberiassoler.cat/es/productos/presion/accesorios-encolados-presion/reduccion-conica/>. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.8.1.4. Niples

Son accesorios cuya función es ser el enlace entre dos tubos del mismo diámetro. La unión posee una rosca hembra mientras que el niple posee doble rosca macho.

Figura 11. **Niple**



Fuente: GRAINGER México. *Niple de acero galvanizado.*

<https://www.grainger.com.mx/producto/GRAINGER-APPROVED-Surtido-Niples-Tubo%2C3-8-pulg-%2CAcero-Galv/p/4PRV4?analytics=searchResults>. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.8.1.5. Acoples rápidos

Son dispositivos que son útiles cuando se requiere el acoplamiento y desacoplamiento de diferentes equipos o herramientas a un mismo punto. Permiten unir de forma rápida equipos o herramientas a la red neumática. Los acoples rápidos tienen un dispositivo que cierra automáticamente el paso de aire cuando se desconecta el equipo, esto evita que se escape el aire.

Figura 12. **Acople rápido**



Fuente: HIDROCA Soluciones Industriales. *Acoples*.

http://hidrocapanama.com/index.php?route=product/product&product_id=248. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.8.1.6. Filtros

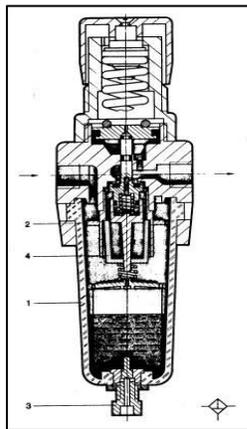
El filtro es un accesorio cuya función es la separación y extracción de partículas no deseadas y agua condensada del aire comprimido.

Para entrar al recipiente el aire comprimido debe atravesar la chapa deflectora provista de ranuras directrices. Debido a esto se somete a un movimiento rotacional. Por el efecto de la fuerza centrífuga las partículas de suciedad y los líquidos se desprenden acumulándose en la parte inferior del recipiente.

En el filtro sintetizado continua la depuración del aire comprimido. Este filtro separa otras partículas de suciedad. Este debe ser limpiado o sustituido periódicamente.

El agua no debe pasar el nivel marcado que traen los filtros, porque podría llegar al punto de la zona turbulenta y el aire se llevaría de nuevo el agua. Se deberá vaciar por el tornillo de purga o si tiene un sistema de purga automática.

Figura 13. **Filtro de aire comprimido**



Fuente: Sapiensman. *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*.

<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica6.htm>. Consulta: 6 de abril de 2020.

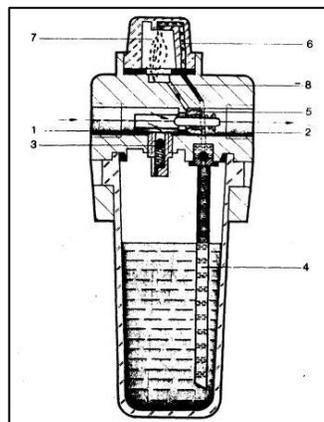
2.8.1.7. Lubricador de aire comprimido

El lubricador tiene la misión de lubricar los elementos neumáticos de manera suficiente. La lubricación previene el desgaste prematuro de los elementos disminuyendo el rozamiento y previene la corrosión.

Los lubricadores generalmente trabajan mediante el principio de “Venturi”, en el cuál la diferencia de presión entre un punto antes de la tobera y la presión en el lugar más estrecho de la tobera genera una presión negativa que sirve para aspirar el lubricante del depósito y mezclarlo con el aire.

Debido al principio de funcionamiento bajo el que se rige si el flujo de aire no es suficientemente grande el lubricador no trabajará. Para evitar esto al escoger el lubricador a usarse se debe prestar atención a los valores de flujo de aire con los que trabaja.

Figura 14. **Lubricador de aire comprimido**



Fuente: Sapiensman. *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*.

<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica6.htm>. Consulta: 6 de abril de 2020.

2.8.1.8. Unidad de mantenimiento de aire comprimido

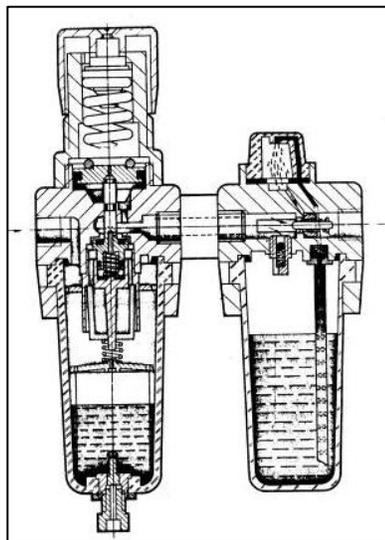
La unidad de mantenimiento de aire comprimido se compone por diferentes elementos:

- Filtro de aire comprimido
- Regulador de presión
- Lubricador de aire comprimido

Es muy importante al momento de escoger la unidad de mantenimiento tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El caudal de aire, que si es demasiado grande se producirá una caída de presión alta. Para ello se deben respetar los valores indicados por el fabricante
- La presión de trabajo no debe sobrepasar a la que soporta la unidad.

Figura 15. **Unidad de mantenimiento**



Fuente: Sapiensman. *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*.

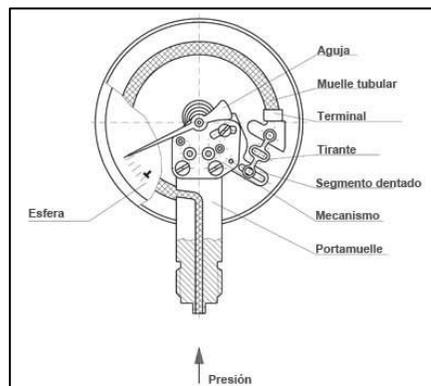
<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica6.htm>. Consulta: 6 de abril de 2020.

2.8.1.9. Manómetros

La función de los manómetros es la de medir la presión que se encuentra en la línea y mostrarlo de una forma visual. El manómetro está conformado por: cuerpo, tubo de Bourdon o muelle tubular, palanca, aguja y escala. Su

funcionamiento está basado en el esfuerzo al que es sometido el tubo de Bourdon debido a la presión, la cual busca enderezarlo. Esta deformación que sufre el tubo de Bourdon, depende de la presión y abre ligeramente el tubo de Bourdon. El recorrido producido por la deformación del tubo Bourdon se transmite a través de una palanca, el segmento de cremallera y el piñón. Dado que el piñón y la aguja se encuentran unidos rígidamente, esta se desvía, marcando así la lectura de la presión.

Figura 16. **Manómetro tipo Bourdon**



Fuente: Cultura Científica Goya. *Manómetro de Bourdon*.

<https://culturacientificagoyablog.wordpress.com/manometro-de-bourdon/>. Consulta: 7 de abril de 2020.

2.8.2. Pérdidas ocasionadas por accesorios

Como se sabe toda tubería a causa del tipo de material con la que ha sido fabricada, esta ocasionará una cierta pérdida de energía.

Tabla VI. Pérdidas ocasionadas por accesorios comunes

Diámetro		Válvula de Globo		Tubería Y 60°		Válvula de ángulo		Válvula de compuerta		Válvula de columpio	
Pulg	mm	Pie	m	Pie	M	Pie	m	Pie	m	Pie	m
3/8"	10	17	5,0	8	2,4	6	1,8	6	1,8	0,6	0,2
1/2"	12	18	5,5	9	2,7	7	2,1	7	2,1	0,7	0,2
3/4"	20	22	6,7	11	3,4	9	2,7	9	2,7	0,9	0,3
1	25	29	8,8	15	4,6	12	3,7	12	3,7	1	0,3
1 1/4"	32	38	11,6	20	6,1	15	4,6	15	4,6	1,5	0,5
1 1/2"	40	43	13,1	24	7,3	18	5,5	18	5,5	1,8	0,5
2	50	55	16,8	30	9,1	24	7,3	24	7,3	2,3	0,7
2 1/2"	60	69	21	35	10,7	29	8,8	39	8,8	2,8	0,9
3	80	84	25,6	43	13,1	35	10,7	35	10,7	3,2	1,0
3 1/2"	90	100	30,5	50	15,2	41	12,5	41	12,5	4,0	1,2
4	100	120	36,6	58	17,7	47	14,3	47	14,3	4,5	1,4
5	130	140	42,7	71	21,6	58	17,7	58	17,7	6	1,8
6	150	170	51,6	88	26,8	70	21,3	70	21,3	7	,21
8	200	220	67,1	115	35,1	85	25,9	85	25,9	9	2,7
10	250	280	85,3	145	44,2	105	32	105	32	12	3,7
12	300	320	97,5	165	50,3	130	39,6	130	39,6	13	4,0
14	350	360	109,7	185	56,4	155	47,2	155	47,2	15	4,6
16	400	410	125	210	64	180	54,9	180	54,9	17	5,0
18	450	460	140,2	240	73,2	200	61	200	61	19	5,8
20	500	520	158,5	275	83,8	235	71,6	235	71,6	22	6,7
24	600	610	185,9	320	97,5	265	80,8	265	80,8	25	7,6

Fuente: AVALLONE, Eugene. y THEODOR, Baumeister III. *Manual del ingeniero mecánico*.

p. 12-117.

Tabla VII. Pérdidas ocasionadas por codos

Diámetro	Codo 90° estándar		Codo 90° radio largo		Codo 90° de servicio		Codo 45° estándar		Codo 45° de servicio		Codo 180° estándar	
	Pie	m	Pie	m	Pie	m	Pie	m	Pie	m	Pie	m
3/8"	1,4	0,4	0,9	0,32	2,3	0,7	0,7	0,2	1,1	0,3	2,3	0,7
1/2"	1,6	0,5	1,0	0,3	2,5	0,8	0,8	0,2	1,3	0,4	2,5	0,8
3/4"	2,0	0,6	1,4	0,4	3,2	1,0	0,9	0,3	1,6	0,5	3,2	1,0
1	2,6	0,8	1,7	0,5	4,1	1,2	1,3	0,4	2,1	0,6	4,1	1,2
1 1/4"	3,3	1,0	2,3	0,7	5,6	1,7	1,7	0,5	3,0	0,9	5,6	1,7
1 1/2"	4,0	1,2	2,6	0,8	6,3	1,9	2,1	0,6	3,4	1,0	6,3	1,9
2	5,0	1,5	3,3	1,0	8,2	2,5	2,6	0,8	4,5	1,4	8,2	2,5
2 1/2"	6,0	1,8	4,1	1,2	10	3,0	3,2	1,0	5,2	1,6	10	3,0
3	7,5	2,3	5,0	1,5	12	3,7	4,0	1,2	6,4	2,0	12	3,7
3 1/2"	9,0	2,7	5,9	1,8	15	4,6	4,7	1,4	7,3	2,2	15	4,6
4	10	3,0	6,7	2,0	17	5,2	5,2	1,6	6,5	2,6	17	5,2
5	13	4,0	8,2	2,5	21	6,4	6,5	2,0	11	3,4	21	6,4
6	16	4,9	10	3,0	25	7,6	7,9	2,4	13	4,0	25	7,6
8	20	6,1	13	4,0			10	3,0			33	10,1
10	25	7,6	16	4,9			13	4,0			42	12,8
12	30	9,1	19	5,8			16	4,9			50	15,2
14	34	10,4	23	7,0			18	5,5			55	16,8
16	38	11,6	26	7,9			20	6,1			62	18,9
18	42	12,8	29	8,8			23	7,0			70	21,3
20	50	15,2	33	10,1			26	7,9			81	24,7
24	60	18,3	40	12,2			30	9,1			94	28,7

Fuente: AVALLONE, Eugene; THEODOR, Baumeister III. *Manual del ingeniero mecánico*.

p. 12-117.

2.8.3. Instalación de accesorios

Los accesorios purgadores deben colocarse en los puntos más bajos de las pendientes y no deben de exceder una distancia de 100 pies entre ellos. También pueden colocarse en puntos cercanos a dónde se realizan cambios bruscos de dirección, cerca de codos a 90° por ejemplo. El colocar estos accesorios en

puntos clave es vital para evitar que la humedad condensada llegue a herramientas o equipos y pueda dañarlos o facilitar la corrosión. Además de que puede dañar la tubería.

Los reguladores de presión deben de estar ubicados en los ramales de distribución o cerca del punto de uso para evitar pérdidas innecesarias de presión que puedan afectar el rendimiento de herramientas y equipos.

Las líneas de servicio deberían de partir de la parte superior de la conducción principal (esto para evitar conducir humedad condensada) y cambiar su sentido con un accesorio a 180° preferiblemente de radio largo. Cada línea de servicio debe tener su columna de condensado y su respectivo purgador.

En el cuarto de compresores deberán colocarse el compresor con sus respectivos filtros, el tanque de almacenamiento y el secador. Algunos fabricantes recomiendan tener algún desagüe para los condensados que se generan.

2.9. Cálculo de presión teórica

La presión de servicio es la suministrada por el compresor y existe en la tubería que alimenta a los equipos consumidores.

La presión de trabajo es la necesario en el puesto de trabajo a considerar. Por eso, los datos de servicio de los elementos se refieren a esta presión.

Para calcular la demanda de presión se debe sumar la presión del equipo o herramienta que requiere la presión más alta de trabajo con las pérdidas de

presión que tendrá la línea y accesorios de aire comprimido. Generalmente la pérdida de presión admisible se considera de un 3 % a 6 %.

$$P_T = P_h + P_p$$

Donde:

P_T = Presión demandada.

P_h = Presión de trabajo del equipo con mayor requerimiento.

P_p = Pérdida de presión admisible.

2.10. Cálculo de caudal teórico

Por caudal se entiende a la cantidad de aire que suministra el compresor. Existen dos conceptos: caudal teórico y caudal efectivo o real.

En el compresor de émbolo oscilante el caudal teórico es igual a la cilindrada por la velocidad de rotación. El caudal efectivo depende de la construcción del compresor y de la presión. En este caso el rendimiento volumétrico es muy importante.

Es muy interesante e importante el conocer el caudal efectivo del compresor. El caudal generalmente se expresa en m^3/min o CFM. No obstante, son muchos los fabricantes que solo indican el caudal teórico.

Para calcular el caudal que se requiere en la instalación se deben sumar los caudales requeridos por cada equipo o herramienta una vez han sido multiplicados por los coeficientes de utilización y de simultaneidad.

El coeficiente de utilización es un factor en porcentaje de la operación intermitente del equipo o herramienta. Esto depende de qué tanto se utiliza dicho equipo en la instalación.

El coeficiente de simultaneidad es un factor en porcentaje que evalúa si los equipos se utilizan de forma simultánea. Este se puede obtener como un promedio de los coeficientes de utilización.

3. FASE TÉCNICO-PROFESIONAL

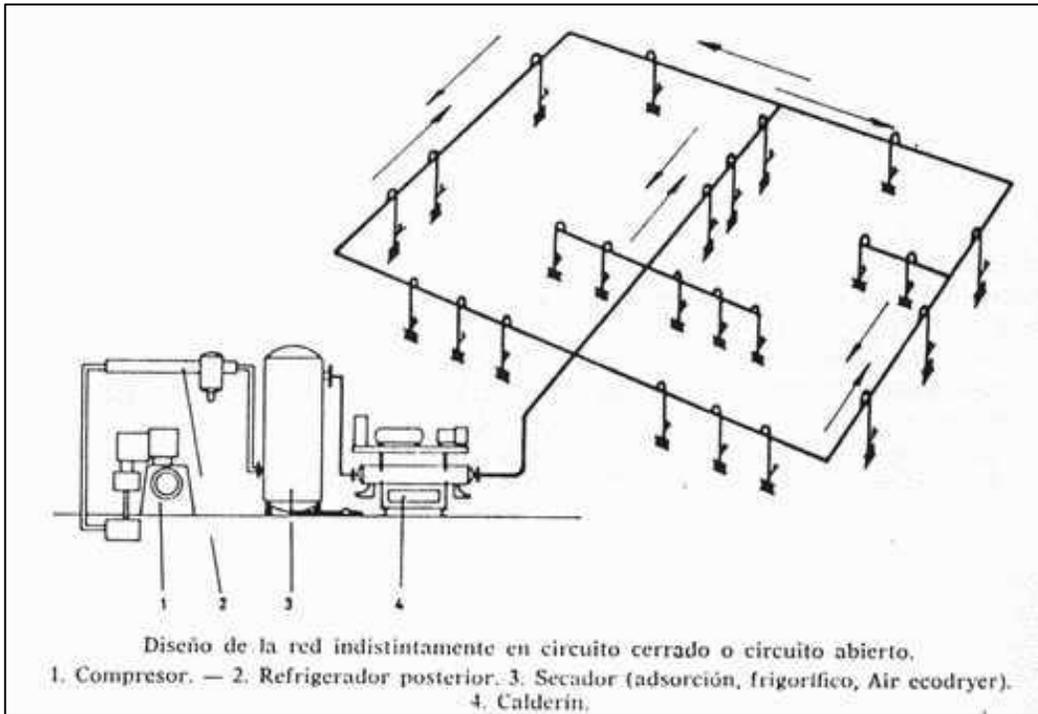
3.1. Selección del circuito de aire a utilizar

Existen varias configuraciones para una red de aire comprimido. Un factor muy importante en la en la red de aire es la forma de la distribución del agua condensada ya que los datos de pérdidas de presión, caudal requerido y presión requerida, pueden ser calculados matemáticamente de forma sencilla. Sin embargo, las zonas de acumulación de agua condensada deben ser detectadas por la pericia del ingeniero. A continuación, se mostrarán los diversos tipos de configuraciones de redes de aire comprimido y se seleccionará la más adecuada para la infraestructura y las operaciones del hangar.

3.1.1. Circuito cerrado

Esta configuración consiste en que la línea principal de distribución forme un anillo. La principal ventaja de esta red es la facilidad de las labores del mantenimiento, porque se pueden aislar partes de la red sin afectar la producción. Su principal desventaja es la falta de dirección constante del flujo. La dirección del flujo en un punto de la red dependerá de las demandas puntuales y debido a esto la dirección del aire cambiará de dirección dependiendo del consumo. El problema de estos cambios radica en que la mayoría de accesorios de una red son diseñados con una entrada y una salida. Por lo tanto, el cambio en el sentido del flujo los inutilizaría.

Figura 17. **Circuito cerrado**



Fuente: CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones.*

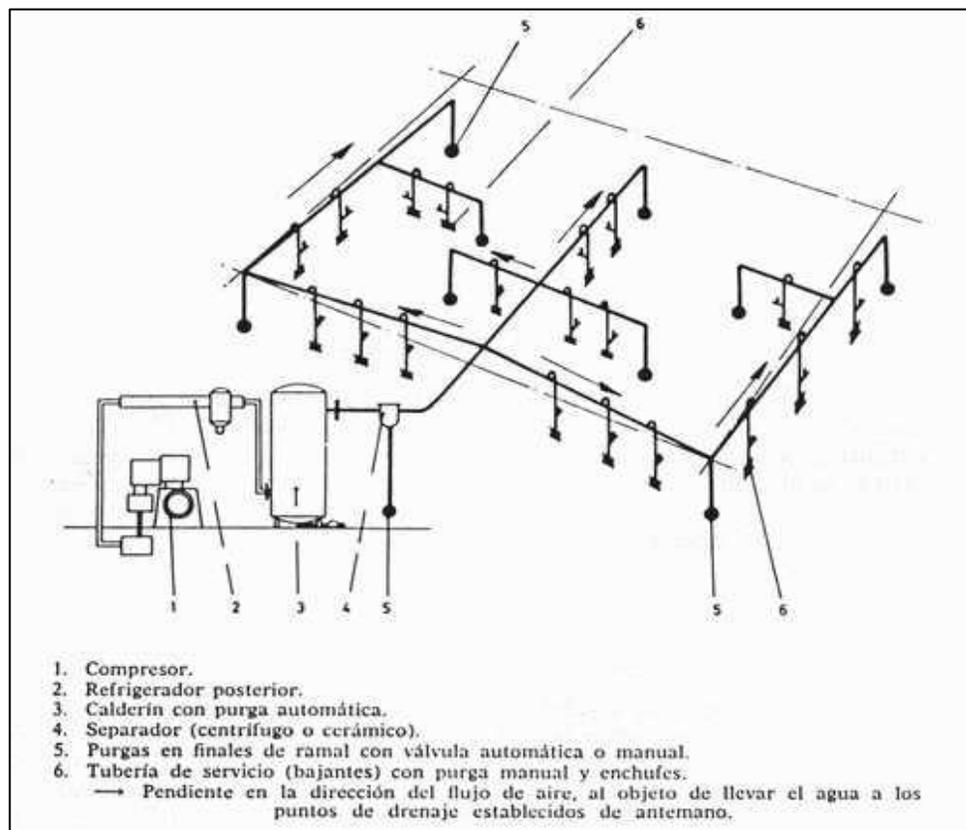
p. 224.

Otro defecto de la red cerrada es la dificultad de eliminar el agua condensada debido a la ausencia de inclinaciones. Por lo tanto, es necesario tener un sistema más estricto de secado. Al contrario de lo que se piensa, Carnicer expone que en los circuitos cerrados las caídas de presión no disminuyen. Por ende, la razón para escogerlo es meramente la facilidad que ofrece para realizar labores de mantenimiento. El circuito cerrado requiere de una mayor inversión inicial que el circuito abierto.

3.1.2. Circuito abierto

Es constituido por una línea principal de la cual se desprenden las secundarias y las de servicio. Este circuito es el que requiere la menor inversión inicial. Además, en este circuito se pueden realizar inclinaciones que faciliten la evacuación de condensados. La principal desventaja de este circuito es su mantenimiento. Puesto que, si se debe de cerrar el paso de aire en una parte, el sector que dependía de esa parte quedaría inoperativo.

Figura 18. Circuito abierto



Fuente: CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones.*

p. 225.

3.1.3. Circuito mixto

Es una combinación de los dos sistemas anteriores, en donde se utiliza un circuito cerrado en la línea principal y las secundarias utilizan un circuito abierto. Presente algunas ventajas del sistema cerrado como su facilidad del mantenimiento mientras se está en operación y del sistema abierto en que en los ramales secundarios se podría dar la inclinación que permitiera una mejor evacuación de los condensados, por ejemplo.

3.1.4. Definición del circuito de aire comprimido

Luego de analizar las distintas formas de realizar el circuito de aire se optará por el circuito abierto. Esto debido a que su inversión inicial es menor y que permite una mejor evacuación de los condensados al poderle dar inclinación. Además de que se buscará separar los ramales de distribución de tal forma que las labores de mantenimiento afecten lo menos posible las operaciones del hangar.

3.2. Realización de planos del sistema de aire comprimido

De parte de la empresa se obtuvo un plano del primer nivel del hangar, el cuál será usado como base para dibujar en dónde se ubicará la tubería. En general el diseño será un tanto similar al que poseen actualmente, pero eliminando las vueltas innecesarias.

De esta manera el personal de Aviateca podrá identificar mejor dónde instalar la tubería si deciden ejecutar la propuesta.

Se deben colocar en los planos el punto en donde se ubicará el compresor o compresores según sea el caso, los puntos de servicio y en general, la ubicación de la tubería. En base a esto se debe observar en donde irán accesorios como válvulas, *tees*, codos.

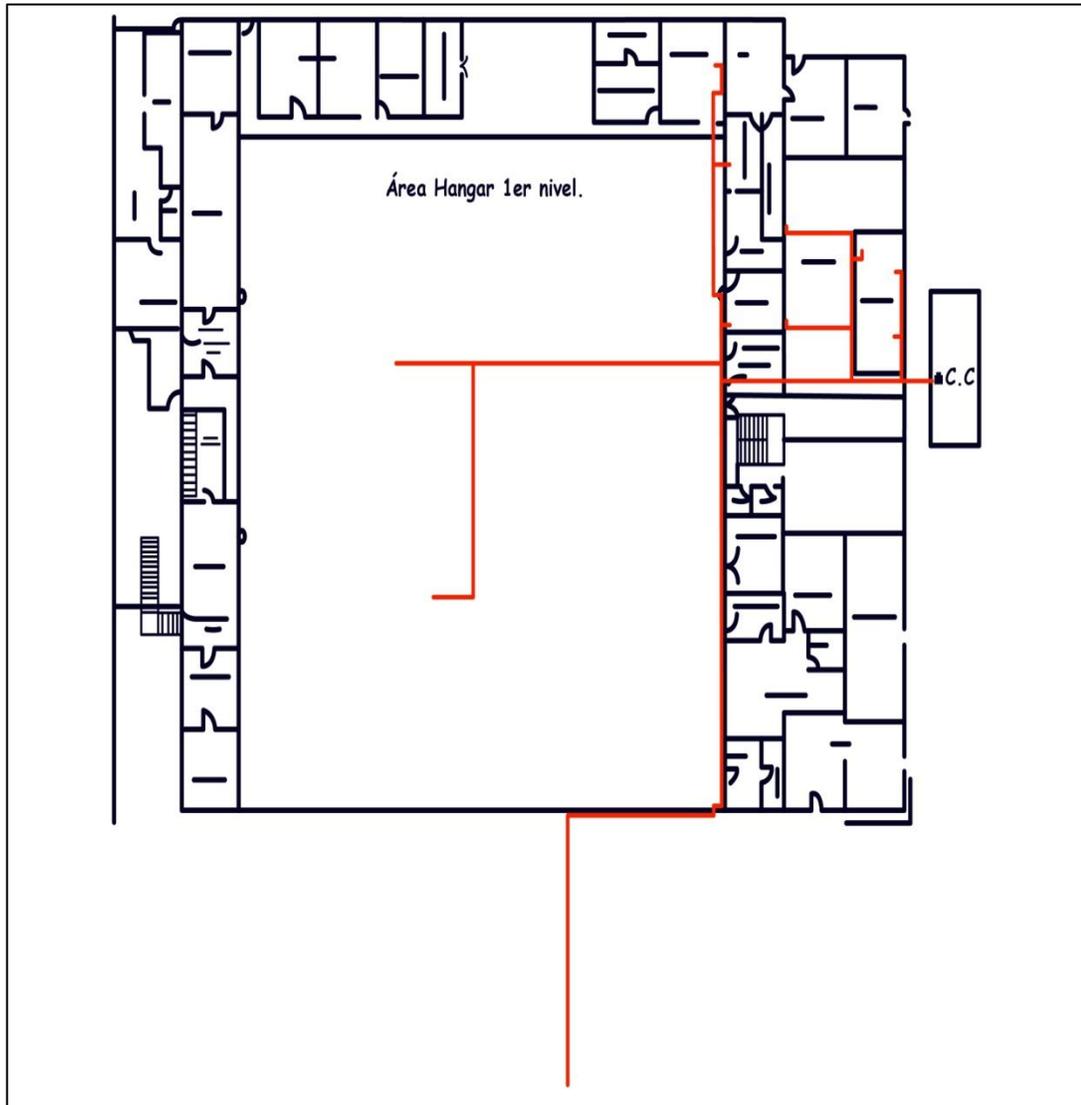
Para el diseño deben de tomarse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Diseñar la red en base a la arquitectura del edificio y los puntos donde se requiere aire.
- Procurar que el diseño de la tubería sea lo más recto posible, evitando el uso de codos, reductores y demás accesorios que aumenten la pérdida de presión.
- La tubería debe ir instalada aéreamente. Exceptuando el área del hangar porque esto no permitiría las operaciones, y hace imposible el movimiento de los aviones. En ese caso a pesar de que no es lo recomendable se instalará subterráneamente.
- La tubería no debe de estar en contacto con los cables eléctricos para evitar accidentes.
- En la instalación se tiene que tomar en cuenta cierta libertad para la tubería para que se pueda contraer y expandir con las variaciones de temperatura.
- Antes de implementarse extensiones o una nueva demanda en la red de aire debe comprobarse si los diámetros de tubería soportan el nuevo caudal.

- Para las labores de mantenimiento deben colocarse distintas llaves de paso en la red de forma frecuente. Con esto se evita detener todo el suministro del aire cuando se hagan reparaciones en la red.
- Todo cambio brusco de dirección o de inclinación es un punto de acumulación de humedad condensada. Allí se deben colocar accesorios para su evacuación.
- Las conexiones de tuberías de servicio deben hacerse desde la parte superior de la tubería para poder evitar descenso de agua por gravedad hacia los equipos neumáticos.

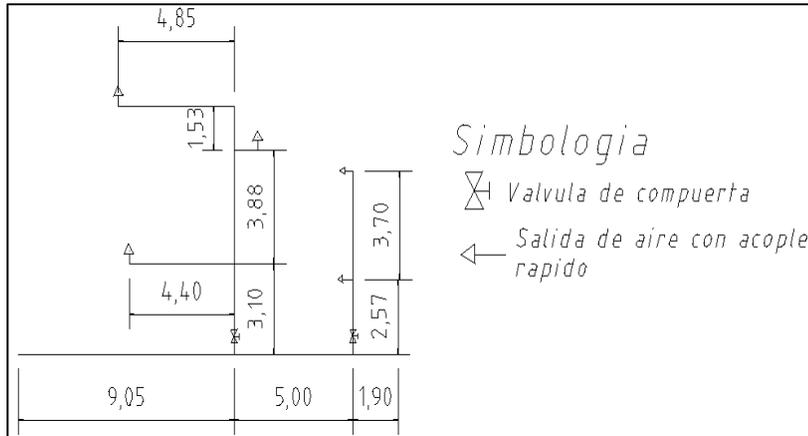
La línea de aire comprimido estará distribuida de manera similar al diseño actual, sin embargo, se le añaden ramificaciones que permitirán que llegue aire a los talleres de compuestos, metales y asientos. En la figura 21 se puede observar el esquema de la red de aire sobre el plano del primer nivel del hangar, la línea de aire comprimido se encuentra de color naranja.

Figura 19. Esquema de la propuesta de red de aire comprimido



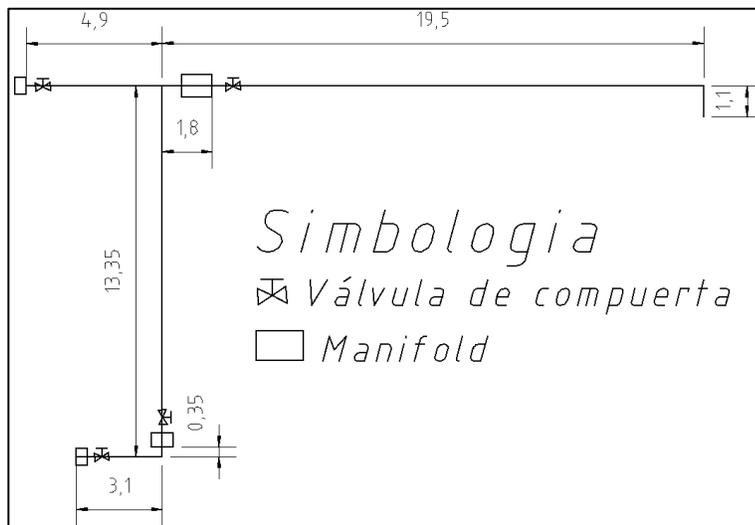
Fuente: elaboración propia, empleando LibreCAD 2016 y Adobe Illustrator CC 2017.

Figura 20. **Planos de la red de aire comprimido del área de pintura. Cota en metros**



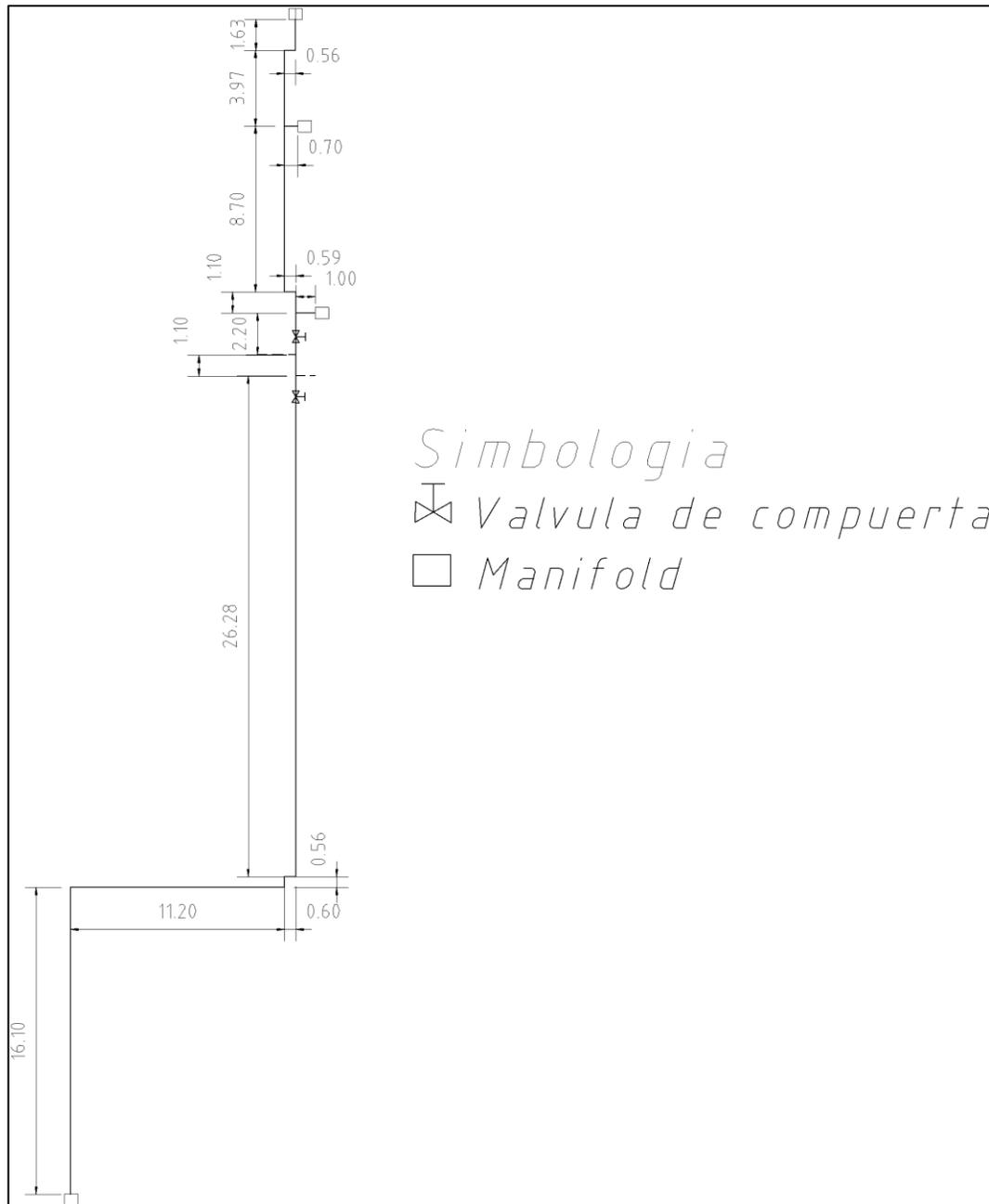
Fuente: elaboración propia, empleando LibreCAD 2016.

Figura 21. **Planos de la red de aire comprimido del área de hangar. Cota en metros**



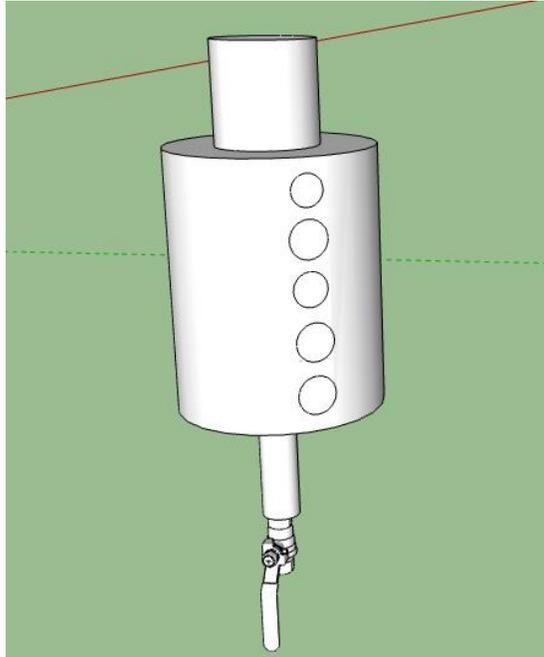
Fuente: elaboración propia, empleando LibreCAD 2016.

Figura 22. Planos de la red de aire comprimido del área de hangar hacia áreas de rampa y talleres. Cota en metros



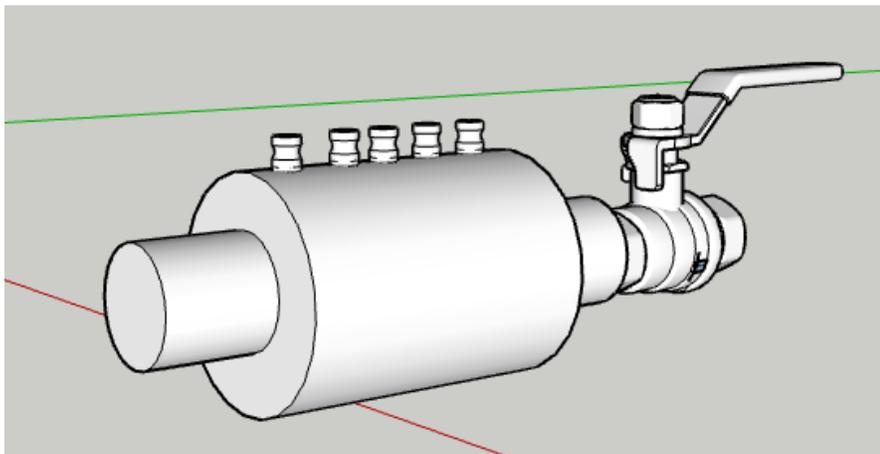
Fuente: elaboración propia, empleando LibreCAD 2016.

Figura 23. **Diseño de los manifold de extremos de línea**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp 2020.

Figura 24. **Diseño de los manifold intermedios del hangar**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp 2020.

Los *manifolds* en los extremos son los que se encuentran en los finales de la línea de aire, cuentan con una válvula de compuerta que permite cerrarlos en caso se le deba realizar mantenimiento (lo más común sería el reemplazo de los acoples rápidos que podrían fallar) y en el otro extremo una pequeña porción de tubo con una válvula de compuerta cuya finalidad es la de poder purgar el agua condensada.

Los *manifolds* que se encuentran en el hangar y el *manifold* de rampa, tendrán 5 acoples rápidos para conectar herramienta, mientras que los *manifolds* de los talleres de metales, compuestos y asientos tendrán solo 2 acoples rápidos, porque no se necesitan demasiados en dichos talleres.

3.3. Selección de tubería a utilizar

Para escoger que tipo de tubería y material será utilizado, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- Tipo de tubería (principal, secundaria o de servicio)
- Presión de la tubería
- Disponibilidad en el mercado

Para escoger una tubería se tienen distintos materiales, como, por ejemplo: acero negro, cobre, latón, acero galvanizado, PVC, entre otras.

Para la tubería principal y secundaria no requieren movimiento y deben permanecer fijas, se recomienda la tubería de acero galvanizado. Esto, debido al hecho que tiene una buena resistencia a la corrosión (al ser galvanizadas), es un material que soporta hasta 290 psi de presión de trabajo por lo que soportará la

presión del taller, es económico y existen diversos negocios que la comercializan en Guatemala.

Las uniones roscadas en la tubería de acero galvanizado no son siempre totalmente herméticas. Por lo tanto, se puede utilizar uniones soldadas para la tubería aérea y uniones roscadas para la tubería subterránea (esto para evitar que el proceso de soldado acelere la corrosión del material).

Para la tubería de servicio se requiere que la tubería sea flexible y pueda soportar los constantes esfuerzos mecánicos que implica el movimiento al utilizar las distintas herramientas para las que se utilizarán. Para esto se recomienda la tubería de goma, con acoples rápidos para poder conectarse a al sistema de aire comprimido. En Guatemala existen negocios que venden este tipo de tubería.

3.4. Selección de accesorios a utilizar

A raíz del análisis de los planos del sistema de distribución de aire comprimido y con los conocimientos de las necesidades de la instalación se realizará el listado de los accesorios que serán requeridos. Sin embargo, el diámetro de los mismos se conocerá hasta el momento de realizar el dimensionamiento de la tubería.

Tabla VII. **Accesorios de tubería principal**

Accesorio	Cantidad
Tee	5
Codo a 90°	6
Válvula de compuerta	5
Acoples rápidos	20
Reductores	4

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Accesorios tuberías secundarias**

Accesorio	Cantidad
Tee	5
Codo a 90°	33
Válvula de compuerta	4
Acoples rápidos	11
Filtros separadores	6
Reductores	4

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente se requerirán 6 válvulas de compuerta para colocar en los *manifolds*, con el objetivo de purgar condensados.

3.5. Determinación del soporte de la tubería

Los soportes no deben de ser colocados sobre las válvulas, ya que estas no deben de cargar con el peso de la tubería. Es recomendable colocarlos cerca de los cambios de dirección. Para la selección de la distancia entre soportes de forma horizontal y vertical se utilizará la información de la siguiente tabla:

Tabla IX. **Distancias de soporte de tubería**

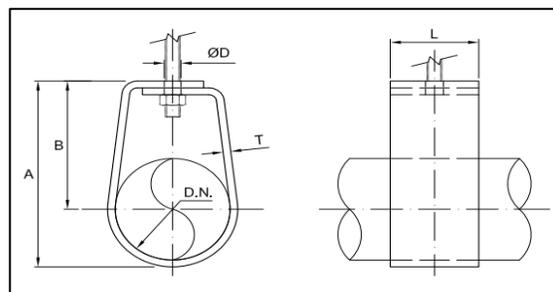
Diámetro de tubería	Distancia horizontal (m)	Distancia vertical (m)
1/4"	1,25	1
1/2"	1,75	1,25
3/4"	2,7	1,75
1 1/4"	3	2,5
1 1/2"	3	2,5
2"	3,5	2,75
3"	3,5	3
4"	3,5	3
6"	4,25	3,5
10"	5,18	4,25
12"	5,48	4,87

Fuente: ROSALES, Robert. *Manual de mantenimiento industrial*. p. 97.

Existen diversos tipos de soporte para tubería, para adecuarse a la infraestructura del taller se proponen utilizar los siguientes tipos:

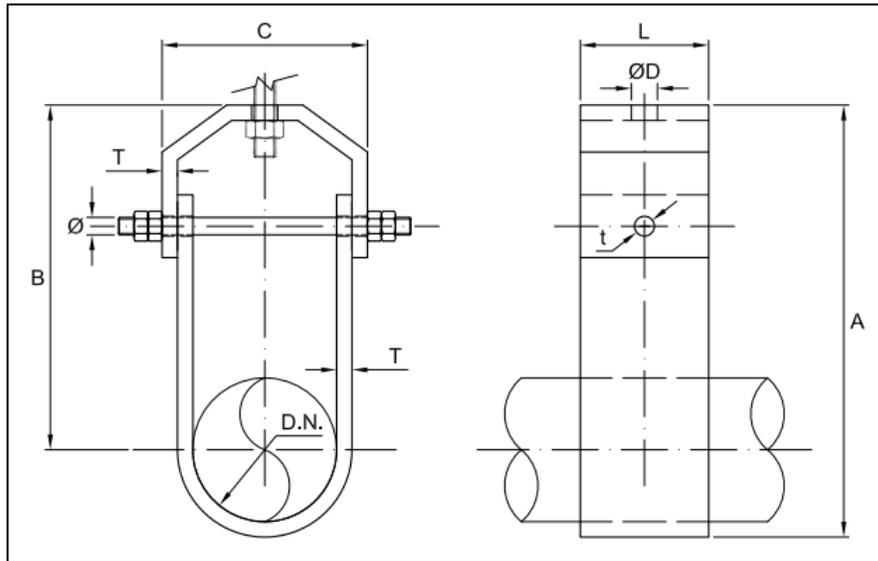
Para sostener a la tubería desde el techo se propone un soporte tipo abrazadera de horquilla o abrazadera de lazo. Siendo quizá por el costo del tornillo, más económica la opción de la abrazadera de lazo.

Figura 25. **Abrazadera de lazo**



Fuente: Pihasa. *Catálogo de soportes 147E*. p. 14.

Figura 26. **Abrazadera de horquilla**



Fuente: Pihasa. *Catálogo de soportes 147E*. p. 16.

Para sostener la tubería a través de las paredes y columnas metálicas se pueden usar abrazaderas de tipo omega o ménsulas atornilladas. El hecho de que sean atornilladas y no soldadas a la estructura, permiten su remoción en caso fuera necesario con más facilidad. Además, que la fabricación de las ménsulas es relativamente sencilla y puede ser menos costoso que otro tipo de soportes.

Figura 27. **Ménsula sencilla**



Fuente: Mercado Libre Argentina. *Ménsula 40 x30 cm*. https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-605885773-mensula-40-x-30-cm-_JM?quantity=1. Consulta: 23 de abril de 2020.

Figura 28. **Abrazadera para tubo tipo omega**



Fuente: Ferrekasa. *Abrazadera para tubo tipo omega*.
<https://ferrekasa.com.mx/products/abrazadera-para-tubo-tipo-omega-4>. Consulta: 23 de abril de 2020.

3.6. Cálculo del requerimiento de presión

El cálculo de la presión de sistema es un proceso sencillo, siendo el primer paso determinar cuál es el equipo o en este caso la herramienta que requiere la presión de trabajo más alta. Cabe recalcar que como parte de la propuesta se incluirán herramientas que actualmente no posee el hangar, pero que valdría la pena la adquisición en un futuro de las mismas, porque harían el trabajo más eficiente. Sin embargo, en su mayoría son herramientas que ya poseen.

Tabla X. **Presiones de trabajo de herramientas neumáticas**

Herramienta	Presión de trabajo (Psi)
Pistola engrasadora	40-100
Lijadora orbital 3M	90
Pistola de pintura	43
Equipo de pulverización Graco Pro Xp	100
Remachadora Cherry Aerospace	110
Barreno neumático	90
Pistola para pintar Trupper	50

Fuente: Starline. *Manuales de herramientas neumáticas*. <http://www.starline.com.mx/site/wp-content/uploads/2012/12/Consumos-de-aire-y-presi%C3%B3n-promedio-en-herramientas-neum%C3%A1ticas.pdf>. Consulta: 11 de abril de 2020.

La herramienta que se sugiere adquirir es la pistola engrasadora neumática, en general están en un rango con un máximo de 100 psi de presión de trabajo. Esta herramienta ayudaría mucho a hacer más fáciles las labores de engrase, las cuales pueden tomar mucho tiempo y son agotadoras para los técnicos que las realizan.

Se puede observar que la herramienta neumática que requiere la mayor presión de trabajo es la remachadora marca Cherry Aerospace, lo cual tiene sentido al tener que aplicar mucha fuerza, para lograr realizar el remachado de piezas metálicas.

Para continuar con el cálculo se le debe sumar a la presión más alta un porcentaje de pérdida de presión, generalmente se utiliza entre 3 % a 6 %, para este cálculo se utilizará el 6 %. Por lo tanto:

$$P_T = P_h + P_p$$

Donde:

P_T = Presión demandada.

P_h = Presión de trabajo del equipo con mayor requerimiento.

P_p = Pérdida de presión admisible.

$$P_T = 110 + (110 * 0,06)$$

$$P_T = 116,6 \text{ Psi}$$

3.7. Cálculo del requerimiento de caudal

Para determinar el flujo de aire que se requiere en la instalación, se debe de elaborar un listado con los consumos específicos de aire de cada herramienta, multiplicarlos por un coeficiente de utilización y un coeficiente de simultaneidad y sumarlos. Adicionalmente sumar un porcentaje por fugas, desgaste y futuras ampliaciones. A continuación, se explicará el por qué se utilizan dichos factores.

El coeficiente de utilización es un valor porcentual que indica que tan simultáneamente se utilizan los equipos. Este valor se tomó en base a la observación de las labores diarias del taller.

El coeficiente de simultaneidad es un valor promedio de los coeficientes de utilización de los equipos.

Se le suma un porcentaje razonable por fugas y desgastes, esto debido a que con el tiempo se darán en la instalación, y si no son tomados en cuenta desde el diseño no permitiría una operación eficiente en el taller. El porcentaje depende del diseñador del sistema. En este caso, dado que he observado que la mayoría de mangueras tienen fuga (y sería sumamente costoso reemplazarlas todas al mismo tiempo) se utilizará un porcentaje del 10 %.

Se le suma un porcentaje por expansión, la razón de esto es que si se decide aumentar las operaciones se tenga una especie de colchón extra que permita expandirlas. De no tenerlo, se debería de realizar de nuevo la inversión en compresor y quizá en tubería y accesorios, lo cual sería muy costoso. Por lo tanto, aprovechando que se hará la inversión es importante que sea una inversión duradera. En este caso, ya que de por si la propuesta va en base a el tiempo de mayor consumo de aire, el porcentaje de expansión será de 10 %.

Para realizar el cálculo de la cantidad de equipos y sus respectivos coeficientes de utilización debo aclarar que tomo en cuenta un trabajo de pintura de un avión grande. Por lo tanto, esto no es un día de operación normal del taller. El objetivo de la propuesta es que se tenga un sistema que soporte los trabajos más pesados del taller y permita que se puedan seguir realizando otras labores importantes además del trabajo de pintura. Suponiendo que la empresa pueda incrementar su operación en el país para contratar más gente y que se pueden

realizar varias tareas de forma simultánea. El objetivo de plantear esto es que mientras se realice el trabajo de pintura, se pueda trabajar simultáneamente otras piezas u otro avión más pequeño.

Los cálculos se realizan multiplicando la cantidad de herramientas por su consumo unitario de flujo de aire, este es indicado por el fabricante. Posteriormente el producto anterior se multiplica por un coeficiente de utilización. Luego se suman los totales de las herramientas y se multiplican por un coeficiente de simultaneidad.

Primero se calculará el requerimiento de caudal durante el proceso de lijado y luego durante el proceso de pintura, con el fin de comparar cual es el proceso que requiere de un caudal mayor de aire comprimido. Se asumirán

Para determinar el consumo se utilizarán los siguientes datos:

Tabla XI. **Requerimiento de caudal en lijado**

Cantidad	Herramienta	Consumo Unitario(CFM)	Coeficiente de utilización	Total (CFM)
18	Lijadora 3M	17	0,9	275,4
2	Barreno	80	0,7	112
2	Remachadora	8,25	0,2	16,5
2	Pistolas de pintura	15	0,4	12

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de simultaneidad es de 0,550. El total en CFM es de 415,9. Multiplicando dicho total por el coeficiente de simultaneidad se obtiene el requerimiento de caudal en lijado:

$$R_{c1} = 0.550 * 415.9$$

$$R_{c1} = 228,75 \text{ CFM}$$

El requerimiento de caudal para el proceso de pintura es el siguiente:

Tabla XII. **Requerimiento de caudal en pintura**

Cantidad	Herramienta	Consumo unitario (CFM)	Coefficiente de utilización	Total (CFM)
4	Equipo de pulverización	25	1	100
2	Barreno	80	0,7	112
2	Remachadora	8,25	0,2	16,5
2	Pistolas de pintura	15	0,4	12

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de simultaneidad es de 0,575. El total en CFM es de 240,5. Multiplicando dicho total por el coeficiente de simultaneidad se obtiene el requerimiento de caudal en lijado:

$$R_{c2} = 0,550 * 240,5$$

$$R_{c2} = 132,28 \text{ CFM}$$

Dado que queda en evidencia que el proceso que requiere de un caudal mayor para su realización es el lijado, con un caudal de 228.75 CFM. Por lo tanto, ese es el que será usado para el resto del cálculo.

Al caudal previamente calculado se le debe sumar un 10 % de fuga y un 10 % para futuras expansiones, de la siguiente manera:

$$R_{cf} = 228,75 \cdot (1 + 0,10 + 0,10)$$

$$R_{cf} = 274,5 \text{ CFM}$$

3.8. Cálculo de la longitud de la tubería

Para realizar el cálculo de la longitud de tubería se requiere 2 acciones: Medir la distancia real de la tubería y calcular el equivalente en distancia en tubo de los distintos accesorios que serán utilizados.

El primer punto es bastante obvio y comprensible de realizar, por lo que se dará énfasis en explicar la segunda acción. Como se detalla en el capítulo 2.4.2 de este trabajo los accesorios pueden convertirse en distancias de tubo recto o en codos equivalentes para posteriormente convertirse en distancias de tubo recto.

El valor de la distancia equivalente en los accesorios se le suma a la real. Este valor de distancia es el utilizado en los cálculos de pérdida de presión. La distancia equivalente de los accesorios depende del diámetro de los mismos en la mayoría de los casos, y este valor irá cambiando en las respectivas iteraciones que sean necesarias hasta encontrar el diámetro óptimo de los mismos.

A continuación, se realizará el cálculo de la distancia con los diámetros de 2 ½" para la tubería principal y de 1 ¼" para las tuberías secundarias. Cercano al acople rápido donde se colocará la tubería flexible, se instalará una pequeña tubería de ¾" en la que se colocará el filtro separador de condensados. Este tramo tendrá una distancia aproximada de 0,40-0,50 m y será solo en algunos puntos, en los cuales no se colocará manifold.

Tabla XIII. **Longitud en tubo recto de accesorios línea principal**

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente unitaria (pies)	Longitud equivalente total (pies)	Longitud equivalente total (m)
Tee	5	2,47	12,35	3,76
Codo a 90°	6	6,16	36,96	11,27
Válvula de compuerta	5	1,4	7	2,13
Filtro	1	16,5	16,5	5,03
Reductor	4	0,66	2,64	0,81

Fuente: elaboración propia.

La longitud total de los accesorios de la línea principal es de 75,45 pies o 23 m. La longitud real de tubería recta de la línea principal es de 63,58 m o 208,6 pies. Por lo tanto, la longitud equivalente en tubo recto de la línea principal es 284,05 pies o 86,58 m.

Tabla XIV. **Longitud en tubo recto de accesorios líneas secundarias**

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente unitaria (pies)	Longitud equivalente total (pies)	Longitud equivalente total (m)
Te	5	1,38	6,9	2,1
Codo a 90°	33	3,45	113,85	34,70
Válvula de compuerta	4	0,81	3,24	0,99
Filtros separadores	1	16,5	16,5	5,03
Reductores	8	0,198	1,584	0,48

Fuente: elaboración propia.

La longitud total de los accesorios de las líneas secundarias es de 142,07 pies o 43,3 m. La longitud real de tubería recta de las líneas secundarias es de 109,03 m o 357,71 pies. Por lo tanto, la longitud equivalente en tubo recto de las líneas secundarias es de 499,78 pies o 152,33 m.

Por último, se debe sumar la longitud de los tramos cortos con filtro, de diámetro $\frac{3}{4}$ ", siendo 2 m o 6.56 pies de tubería recta y 82,5 pies o 25,15 m de equivalente de accesorios. Por lo tanto, se tiene una longitud equivalente de 27,15 m o 89.06 pies.

3.9. Cálculo de pérdidas

Al pasar el aire comprimido por la tubería se genera una pérdida de la presión por la fricción de este con la tubería. Esta pérdida es inevitable, por lo general el rango aceptable de pérdida de presión por fricción es de 3 % a 6 %. Depende del diseñador del sistema de aire comprimido. Para calcular las pérdidas de presión por fricción se requiere:

- La información de factores de pérdida de presión, los cuales se encuentran en la tabla IV.
- La longitud equivalente de la tubería, es decir la suma de la longitud real de tubo recto con la longitud equivalente de los accesorios.
- Un diámetro arbitrario para la tubería. Este servirá para el cálculo de la longitud equivalente de los accesorios y para utilizar un factor de pérdida de presión.
- Las ecuaciones 4 y 5.

Posteriormente al calcular las pérdidas de presión en las tuberías. Estas deben sumarse para obtener la pérdida de presión en todo el sistema, la misma

que es dividida entre la presión que suministra el compresor, para obtener el porcentaje.

Este procedimiento es el que se utiliza para dimensionar correctamente las tuberías y accesorios. Es un proceso iterativo, se debe de realizar las veces que sean necesarias hasta obtener un valor de pérdida de presión con el que se esté conforme, variando en cada iteración los diámetros de las tuberías.

Una vez que se encuentre los diámetros que produzcan pérdidas aceptables de presión, se puede determinar que ese es el diámetro óptimo. Es muy importante buscar los diámetros más pequeños posibles, debido a que si se escogen diámetros muy grandes el costo del proyecto subiría mucho.

3.10. Dimensionamiento de tubería y accesorios

Para la primera iteración se utilizará como diámetros arbitrarios 2 ½" para la tubería principal y 1 ¼" para las secundarias, adicionalmente los tramos de ¾". Obteniendo (como fue calculado anteriormente) los siguientes valores de longitudes equivalentes:

- Para diámetro 2 ½" 284,05 pies
- Para diámetro 1 ¼" 499,78 pies
- Para diámetro ¾" 89,06 pies

El caudal que pasará por la tubería principal es de 274,5 CFM y en las secundarias de 68,63 CFM aproximadamente. Obteniendo al interpolar los valores de la tabla IV los siguientes coeficientes F:

- Para diámetro 2 ½" 17,94

- Para diámetro 1 ¼" 23,81
- Para diámetro ¾" 370,89

Dado que es poco probable encontrar un compresor que otorgue precisamente los 116,6 psi que son propuestos, se asumirá una presión más común: 120 psi. Este dato será el utilizado para el cálculo del factor R:

$$R = \frac{120 + 14,7}{14,7}$$

Por lo tanto, el factor R es de 9.16.

Posteriormente, ya con el factor R, las longitudes equivalentes y los factores F calculados se procede al cálculo de la pérdida de presión. El cálculo de la pérdida de presión se calcula con la ecuación 4, para la línea principal es el siguiente:

$$\Delta P = \frac{17,84 \times 284,05}{9,16 \times 1\ 000}$$

$$\Delta P = 0,553\ psi$$

El cálculo para las líneas secundarias es el siguiente:

$$\Delta P = \frac{23,81 \times 499,78}{9,16 \times 1\ 000}$$

$$\Delta P = 1,299\ psi$$

El cálculo para los tramos de ¾" es el siguiente:

$$\Delta P = \frac{370,89 \times 89,06}{9,16 \times 1\,000}$$

$$\Delta P = 3,61 \text{ psi}$$

Por lo tanto, con los diámetros propuestos la caída de presión total es de:

$$\Delta P_T = \frac{0,553 + 1,299 + 3,61}{120} \times 100$$

$$\Delta P_T = 4,55 \%$$

Esto indica que los diámetros propuestos son una buena opción, sin embargo, al notar que aún hay un margen de pérdida se calculará con diámetros diferentes. Esto, con el objetivo de comprobar si reduciendo los diámetros se puede conseguir una pérdida de presión aceptable y al ser un diámetro menor reducir los costos de la instalación.

Los diámetros que se proponen para la siguiente iteración son:

- Para la tubería principal 2"
- Para las tuberías secundarias 1"
- Los tramos de 3/4" mantendrán su diámetro

Con los datos anteriores se procede a calcular las longitudes equivalentes de los accesorios para las distintas líneas de tubería.

Tabla XV. **Longitud en tubo recto de accesorios línea principal, segunda iteración**

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente unitaria (pies)	Longitud equivalente total (pies)	Longitud equivalente total (m)
Tee	5	2,07	10,35	3,16
Codo a 90°	6	5,17	31,02	9,46
Válvula de compuerta	5	1,21	6,05	1,84
Filtro	1	16,5	16,5	5,03
Reductor	4	0,33	1,32	0,40

Fuente: elaboración propia.

La longitud total de los accesorios de la línea principal es de 65,24 pies o 19,89 m. La longitud real de tubería recta de la línea principal es de 63,58 m o 208,6 pies. Por lo tanto, la longitud equivalente en tubo recto de la línea principal es 273,84 pies o 83,47 m.

Tabla XVI. **Longitud en tubo recto de accesorios líneas secundarias, segunda iteración**

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente unitaria (pies)	Longitud equivalente total (pies)	Longitud equivalente total (m)
Te	5	1,05	5,25	1,60
Codo a 90°	33	2,62	86,46	26,35
Válvula de compuerta	4	0,61	2,44	0,74
Filtros separadores	1	16,5	16,5	5,03
Reductores	8	0,165	1,32	0,40

Fuente: elaboración propia.

La longitud total de los accesorios de las líneas secundarias es de 111,97 pies o 34,12 m. La longitud real de tubería recta de las líneas secundarias es de 109,03 m o 357,71 pies. Por lo tanto, la longitud equivalente en tubo recto de las líneas secundarias es de 469,68 pies o 143,15 m.

Luego del cálculo de las nuevas longitudes equivalentes, se calcula los nuevos factores F de pérdida de presión los cuales son:

- Para la tubería diámetro 2": 46,1
- Para las tuberías diámetro 1": 102,72
- Los tramos de 3/4": 370,89

Con estos datos, se procede a calcular las pérdidas de presión en las distintas líneas de tuberías. Para la línea principal es el siguiente:

$$\Delta P = \frac{46,1 \times 273,84}{9,16 \times 1\,000}$$

$$\Delta P = 1,378 \text{ psi}$$

El cálculo para las líneas secundarias es el siguiente:

$$\Delta P = \frac{102,72 \times 469,68}{9,16 \times 1\,000}$$

$$\Delta P = 5,267 \text{ psi}$$

El cálculo para los tramos de ¾" es el siguiente:

$$\Delta P = \frac{370,89 \times 89,06}{9,16 \times 1\,000}$$

$$\Delta P = 3,61 \text{ psi}$$

Por lo tanto, con los diámetros propuestos la caída de presión total es de:

$$\Delta P_T = \frac{1,378 + 5,267 + 3,61}{120} \times 100$$

$$\Delta P_T = 8,55 \%$$

Estos diámetros producen una pérdida de presión mayor a la que se busca tener. Por lo tanto, buscando reducir la pérdida de presión y reducir el tamaño se los diámetros con el fin de ahorrar costos en tubería y accesorios, se realizará una tercera iteración con los siguientes diámetros: 2", 1 ¼" y ¾".

Dado que las pérdidas de presión ya están calculadas previamente para cada uno de los diámetros anteriores, simplemente se realizará el cálculo de la pérdida de presión total en el sistema. Dicho cálculo es el siguiente:

$$\Delta P_T = \frac{1,378 + 1,299 + 3,61}{120} \times 100$$

$$\Delta P_T = 5,24 \%$$

Este último resultado se encuentra dentro del rango aceptable de pérdida de presión. Por lo tanto, es un dimensionamiento adecuado, y el sistema quedará dimensionado de la siguiente manera:

- Diámetro de 2" para la tubería principal
- Diámetro de 1 ¼" para las tuberías secundarias
- Tramos de 3/4" en las conexiones a las herramientas

Con estos datos, se procede a calcular el diámetro de los distintos *manifolds* de conexiones múltiples. Estos se encontrarán ubicados en el hangar, en área de "rampa" y en los talleres de compuestos, metales y de asientos.

Para poder calcular el diámetro de los *manifolds* donde se colocarán conectores rápidos para las distintas herramientas se utilizará la siguiente ecuación:

$$D_m = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_n^2} \quad (6)$$

Dentro de la raíz cuadrada se deben de colocar los distintos diámetros de tubería que se colocarán en el *manifold*. El cálculo del diámetro de los *manifolds* ubicados en el hangar es el siguiente:

Para los dos *manifolds* que no se encuentran en los extremos de la línea:

$$D_{m1} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2}$$

$$D_{m1} = 3,28"$$

Como no existe una tubería precisa con el tamaño de 3,28" se sube al diámetro inmediato superior que sería 4".

Para los dos *manifolds* que se encuentran en los extremos de la línea:

$$D_{m2} = \sqrt{2^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2}$$

$$D_{m2} = 2,72''$$

Como no existe una tubería de diámetro 2,72", se sube el diámetro al siguiente diámetro comercial que sería 3".

Para los *manifolds* de las tuberías secundarias que terminan las líneas, el cálculo es el siguiente:

$$D_{m3} = \sqrt{1\ 1/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2 + 3/4^2}$$

$$D_{m3} = 1,80''$$

Ya que no existe una tubería de diámetro 1,80", se sube el diámetro al siguiente diámetro comercial que sería 2".

3.11. Selección del compresor a utilizar

Al momento de escoger el compresor a utilizar se deben tomar en cuenta muchos aspectos, tales como:

- Caudal de aire: es el flujo de aire que se requiere que el compresor o compresores sean capaces de suministrar. Este lo debe proporcionar la

empresa que vende el compresor y es un dato que no puede faltar en la ficha técnica. Cabe recalcar que algunos fabricantes dan el valor estándar, el cual no cumple generalmente con los datos reales del sitio donde se pondrá a trabajar al compresor. Por lo tanto, puede brindarle los datos de humedad relativa, presión atmosférica, altura sobre el nivel del mar y temperatura promedio a la empresa con la que cotiza para que le puedan dar los valores reales del compresor. Para el presente caso se requiere uno cuyo valor este cercano o supere por poco los 274,5 CFM. Puede ser un poco menos (claro que en ese caso la expansión ya no sería tan viable) o un poco más.

- Presión de aire: esta es la que requieren las herramientas para funcionar bien. Este es otro factor muy importante a tomar en cuenta al momento de escoger compresor y es otorgado por el fabricante en su ficha técnica. Para este caso se requiere al menos de 116,6 Psi, aunque probablemente se encuentren compresores con presiones ligeramente mayores a esa.
- Accionamiento: dado que el compresor o compresores se mantendrán en un lugar fijo, lo mejor será que sean accionados por un motor eléctrico. Dependiendo del tipo de compresor y fabricante la transmisión de la potencia será por acoplamiento o por fajas.
- Emplazamiento: en este caso será montado en el exterior del taller.
- Nivel de ruido: en este caso, debido a que estará en un lugar fuera del taller, donde no pasa demasiada gente, el nivel de ruido que pueda producir no es relevante para la selección. Aun así, hay que tomarlo en cuenta cuando se realicen inspecciones, para portar equipo de protección auditiva si fuera necesario.

- Refrigeración: al estar los compresores en un área bien ventilada no deberían de sufrir de problemas de calentamiento, pero hay que seguir las recomendaciones del fabricante en este aspecto, muchos compresores vienen en cajas, en estos casos el fabricante ya incluye algún tipo de sistema de refrigeración.
- Instalaciones auxiliares: por ejemplo, la instalación eléctrica que se requiere para darle energía el compresor. O un drenaje para los condensados.
- Soporte post-venta: es muy importante tomar en cuenta que la empresa o marca con la que se adquiera el compresor tenga la infraestructura para apoyar al taller ante cualquier eventualidad de la forma más rápida, eficiente y confiable posible. Que puedan proveer de repuestos, mantenimiento, entre otros.

3.12. Selección del tanque de aire a utilizar

La selección del volumen del tanque de aire a utilizar depende de diversos factores y hay varias ecuaciones para encontrar el volumen del tanque. En el caso de compresores reciprocantes generalmente ya tienen incorporado un tanque, como se puede apreciar en la siguiente imagen:

Figura 29. **Compresor recíprocante pequeño**



Fuente: Magytec. *Compresores*. <http://www.magytec.com.co/productos/compresores/>. Consulta: 17 de abril de 2020.

Ahora, en caso de adquirirlos de forma independiente al compresor, se deben de tomar en cuenta diversos aspectos de su operación. Una buena elección de las dimensiones del tanque de almacenamiento minimiza las activaciones de los compresores, esto ayuda a cuidar la vida útil del equipo.

A continuación, se muestra la fórmula que utiliza la empresa KAESER para su gama de compresores de tornillo.

$$V_R = \frac{V_1 * (DF - DF^2)}{(Z - DP)}$$

Donde:

VR= Volumen real del tanque (m^3)

V1= Flujo de aire del compresor (m^3/h)

V2= Demanda de aire de la planta (m^3/h)

Z= Número de ciclos carga-descarga permitidos por hora del compresor

Dp= Diferencial de presión del compresor (bar)

DF= $V2/V1$ = factor de carga

Para el caso donde se desconoce la demanda de aire de la planta (V2), el valor de factor de carga (DF) de 0.5 representa el caso crítico, lo que representa que la demanda de la planta es del 50 % de la capacidad del compresor. En base a la experiencia y como un valor empírico, el valor de factor de carga (DF), se puede considerar de 0.5 para equipos de 3 – 25 hp, 0,79 para equipos de 30 – 100 hp, y 0,885 para equipos de 125 – 450 hp.

Por otro lado, el control del compresor no es capaz de ajustar por si solo los ciclos de carga-descarga, por lo que para llevar a cabo esto es necesario considerar un ajuste de presión al control del compresor, cuyo valor para este análisis será basado en una presión diferencial de 10 psig (0,689 bar).

Para estimar cuantos ciclos de carga-descarga son los recomendados, KAESER recomienda lo siguiente:

- Ciclos carga-descarga en compresores de hasta 25 HP de potencia nominal: 72 ciclos / hora.
- Ciclos carga-descarga en compresores de hasta 100 HP de potencia nominal: 36 ciclos / hora.
- Ciclos carga-descarga en compresores de hasta 450 HP de potencia nominal: 18 ciclos / hora.

Definiendo las variables relacionadas, se puede calcular la capacidad mínima de los tanques, para todo el rango de capacidad de compresores de tornillo KAESER.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Encuesta para determinar la opinión del personal de Aviateca acerca del sistema de aire comprimido actual

La encuesta fue elaborada con el objetivo de conocer que opina el personal de Aviateca del sistema de aire comprimido actual, con el énfasis en cómo las fallas de este sistema afectan sus labores. La misma fue elaborada y compartida mediante la plataforma Google Forms, con respuesta de opción múltiple. Las preguntas fueron sencillas y directas, puesto que es una apreciación cualitativa del sistema de aire comprimido actual, siendo estas las siguientes:

- ¿Ha experimentado problemas para operar sus herramientas neumáticas en alguna ocasión?
 - Si
 - No

- ¿Ha escuchado ruidos que indiquen fugas de aire comprimido? De ser así en que frecuencia.
 - Frecuentemente
 - Algunas veces
 - No he escuchado fugas de aire comprimido

- Cuando se debe reparar alguna fuga de aire comprimido o un acople rápido para herramientas en la red de aire, ¿debe de detener sus operaciones de trabajo?
 - Si, dependo de las herramientas neumáticas para realizar mi trabajo.
 - Parcialmente, porque avanzó con otras actividades que no requieren herramientas neumáticas.
 - No, prácticamente no utilizo herramientas neumáticas.

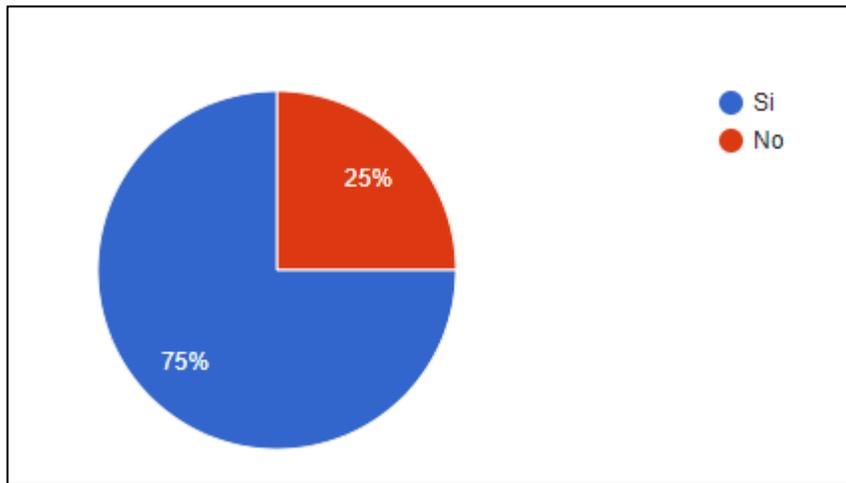
- ¿Qué tan frecuentemente su trabajo se ve afectado por fallas en la red de aire comprimido?
 - Frecuentemente
 - En algunas ocasiones
 - Casi nunca
 - Nunca

- ¿Qué tan importante es para usted y sus labores el contar con aire comprimido para sus herramientas?
 - Mucho, la mayoría de las herramientas que utilizo son neumáticas.
 - Intermedio, aunque no tuviera herramientas neumáticas puedo hacer mi trabajo con otro tipo de herramientas.
 - Poco, casi no utilizo herramientas neumáticas.

4.2. Análisis de la información obtenida con la encuesta acerca del sistema de aire comprimido actual

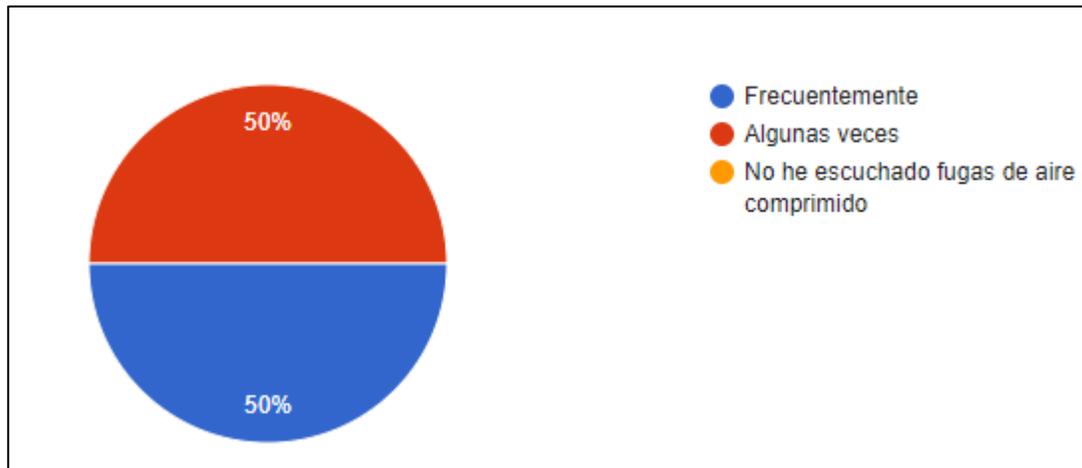
La herramienta de Google Forms permite obtener gráficas en base a las respuestas. En este caso son muy útiles debido a que permite obtener por medio de gráficas circulares las respuestas, lo que permite una buena visión y comprensión de la opinión del personal.

Figura 30. Gráfica circular pregunta 1 acerca del sistema actual



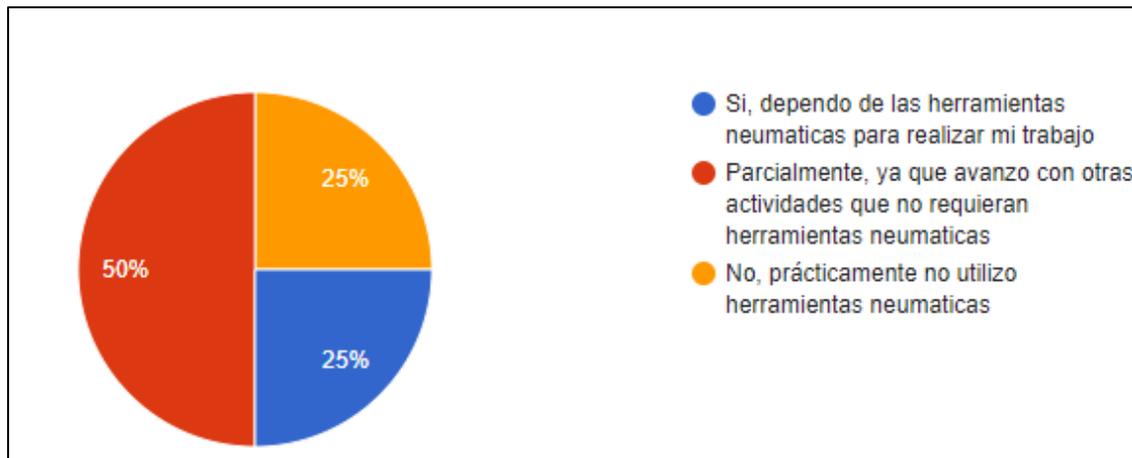
Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 31. **Gráfica circular pregunta 2 acerca del sistema actual**



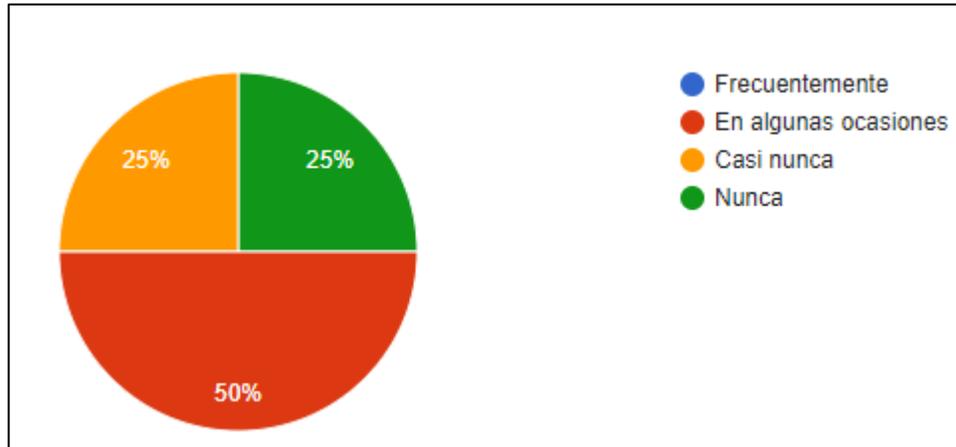
Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 32. **Gráfica circular pregunta 3 acerca del sistema actual**



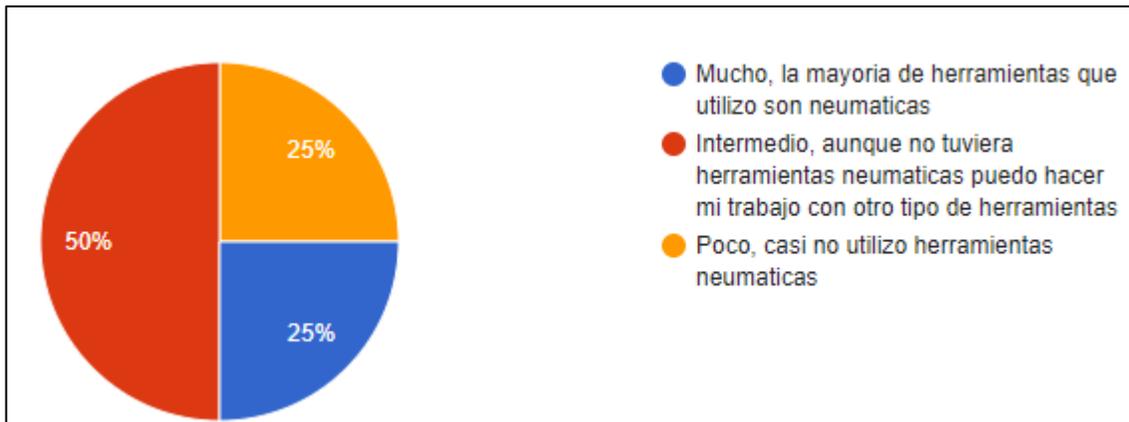
Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 33. **Gráfica circular pregunta 4 acerca del sistema actual**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 34. **Gráfica circular pregunta 5 acerca del sistema actual**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Al observar detenidamente las respuestas del personal de Aviateca se pueden determinar ciertas cosas sobre el estado del sistema de aire comprimido

actual y como es percibido por el personal, además del hecho de cómo su mantenimiento puede afectar sus labores.

Todo el personal ha escuchado fugas de aire comprimido en algún momento, y la mitad las ha escuchado de forma frecuente. Por lo que es un fenómeno común en el taller.

Otro aspecto importante es notar que si bien el que se realice mantenimiento a la red de aire comprimido afecta a un buen porcentaje del personal, la mayoría puede continuar con otras labores en el tiempo en el que se realizan las labores de mantenimiento.

4.3. Encuesta para determinar la opinión del personal de Aviateca acerca de la propuesta del sistema de aire comprimido

La encuesta fue elaborada con el objetivo de conocer que opina el personal de Aviateca de la propuesta de sistema de aire comprimido, especialmente en los aspectos que corregirían algunas fallas del sistema actual. La misma fue elaborada y compartida mediante la plataforma Google Forms, con respuesta de opción múltiple. Las preguntas fueron sencillas y directas, puesto que es una apreciación cualitativa de la propuesta sistema de aire comprimido, siendo estas las siguientes:

- ¿Considera útil que existan salidas de aire para conectar herramientas en los talleres de asientos, compuestos y metales?
 - Sí, sería bueno contar con salidas de aire.
 - No, no lo considero útil

- ¿Cree que es útil tener la capacidad de realizar trabajos en el área de rampa y metales mientras se realiza un proyecto de pintura general de un avión?
 - Si
 - No

- ¿Tendría algún inconveniente en purgar el aire comprimido cada vez que se iniciara su turno?
 - Sí, es algo que se me podría olvidar.
 - No, no tendría inconveniente

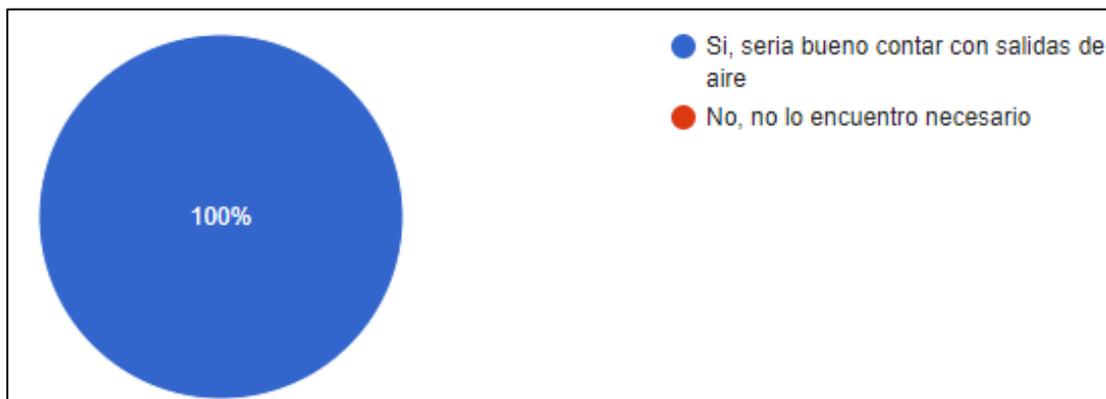
- ¿Cree que en un futuro las operaciones de Aviateca se pueden incrementar, necesitando más gente?
 - Si, lo veo posible a mediano plazo
 - Si, lo veo posible a largo plazo
 - No, no lo veo posible

- ¿Considera útil el poder seguir usando la red de aire comprimido mientras se arregla alguna fuga en el área de hangar?
 - Sí, eso evitaría que me atrasara.
 - No

4.4. Análisis de la información obtenida con la encuesta acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido

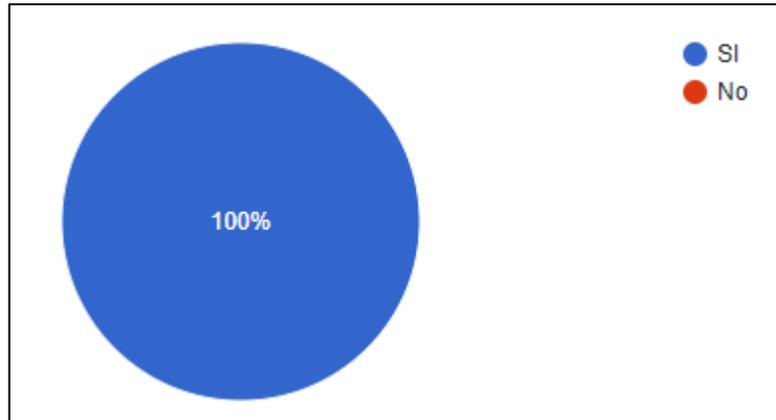
De igual manera en cómo fueron analizadas las respuestas en el subcapítulo 4.2. serán analizadas en el presente. La utilización de gráficas circulares para el análisis de las respuestas permite observar de mejor manera la opinión del personal.

Figura 35. Gráfica circular pregunta 1 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido



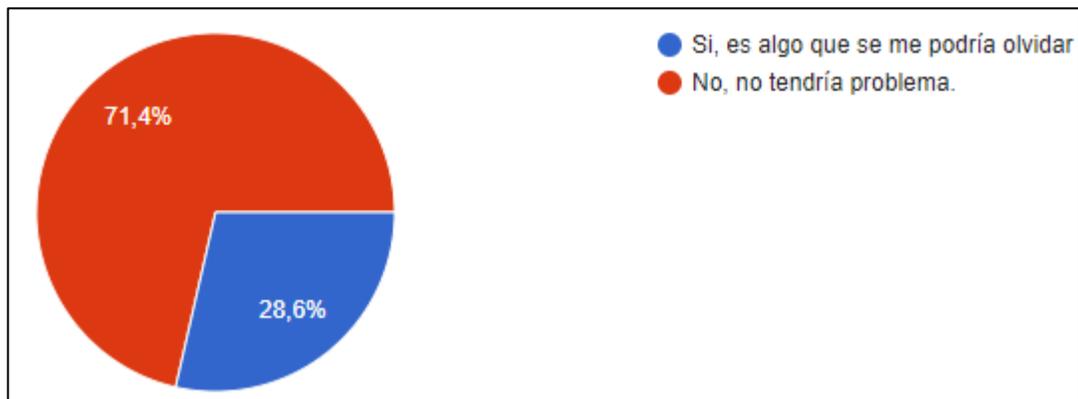
Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 36. **Gráfica circular pregunta 2 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido**



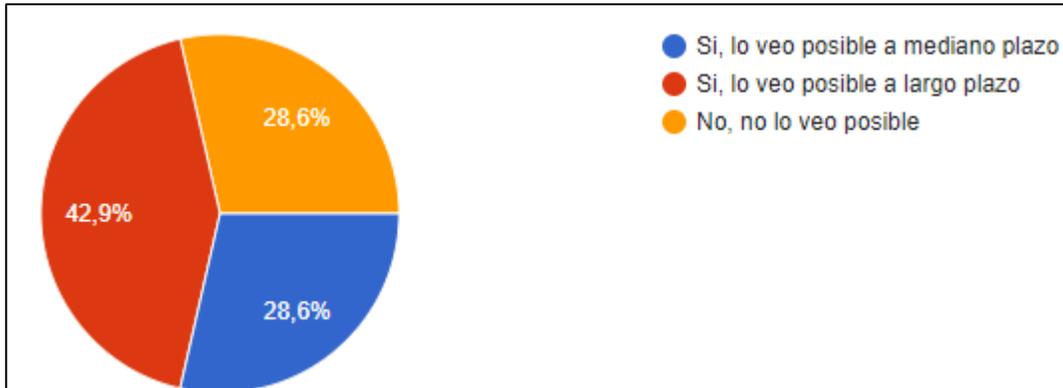
Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 37. **Gráfica circular pregunta 3 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido**



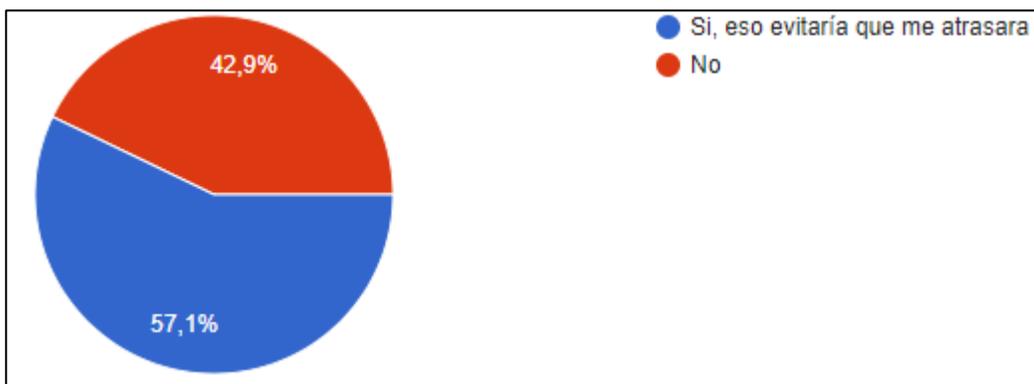
Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 38. **Gráfica circular pregunta 4 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Figura 39. **Gráfica circular pregunta 5 acerca de la propuesta de sistema de aire comprimido**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Forms.

Luego de observar detenidamente las respuestas del personal de Aviateca por medio de las gráficas circulares se puede inferir que a modo general la propuesta es bien aceptada. El personal considera muy útil el poder realizar trabajos en metales y en rampa mientras se realizan trabajos de pintura y también consideran muy útil el tener salidas de aire en los talleres de compuestos, metales y asientos, salidas que no tienen en el sistema actual.

4.5. Comparar si la propuesta, en opinión del personal de Aviateca, cumplirá con sus requerimientos y corregirá las fallas del sistema actual

Al analizar las respuestas desde un punto de vista cualitativo del personal de Aviateca tanto del sistema de aire comprimido actual como de ciertos aspectos relevantes de la propuesta de sistema de aire comprimido se puede analizar lo siguiente:

- Una buena parte del personal es afectado en sus labores debido a trabajos de mantenimiento. Si bien no los afecta deteniendo sus operaciones si atrasa algunas de sus labores. La mayoría de los trabajadores considera que la propuesta al permitir seguir trabajando mientras se realizan las labores de mantenimiento es algo útil. Por lo que, la propuesta ayuda a mejorar esta situación, permitiendo una operación más eficiente.
- La mayoría del personal encuentra viable la expansión de las operaciones de la empresa, por lo que el sistema propuesto sería útil a mediano y corto plazo para soportar un incremento en la operación.

- La propuesta tiene contemplada la instalación de salidas de aire en los talleres de compuestos, metales y asientos, las cuales carece la instalación actual. Esto beneficiaría mucho el trabajo que se realiza en dichos talleres, al tener tomas de aire cerca del lugar de trabajo. Se puede ver en la opinión del personal que todos lo consideran útil.
- Otro aspecto importante es que el personal considera que puede apoyar con la purga de los *manifolds* de forma manual.

Por lo tanto, de forma general, se puede concluir que la propuesta es bien aceptada y en opinión del personal puede solucionar varios de los problemas o situaciones poco favorables del sistema actual. Además del hecho que soluciona problemas que son visibles para el personal tales como muchas curvas innecesarias, las cuales aumentan la pérdida presión.

Por lo que dado que el personal considera que la propuesta es de utilidad para sus operaciones y además soluciona otros problemas no perceptibles por los mismos, es correcto inferir que es una propuesta viable y aceptable.

CONCLUSIONES

1. El taller actualmente tiene un consumo de alrededor de 64,61 CFM y 110 psi, siendo bien suministrados por el compresor actual. Sin embargo, la red posee ciertas fallas en su diseño, como vueltas innecesarias lo que causa pérdidas y reduce la eficiencia del sistema.
2. Para diseñar un sistema de aire comprimido se debe tener una base teórica sólida que incluya los tipos de compresores, accesorios de la red, materiales de tubería y los cálculos para el dimensionamiento del sistema.
3. Con el fin de suministrar suficiente aire en los proyectos de pintura y soportar una expansión de las operaciones del taller se deben tener compresores que provean como mínimo un caudal de 297,28 CFM y 116,6 psi.
4. En la opinión del personal de Aviateca, la propuesta si es de utilidad para mejorar las actividades del taller al corregir las fallas del sistema actual.

RECOMENDACIONES

1. Purgar periódicamente en los sitios donde se requiera para evitar que partículas y condensados se mantengan en la tubería. De esta manera se tendrá aire de mejor calidad llegando a las herramientas. También ayuda a evitar la corrosión en la tubería y en las herramientas.
2. Mantener el área de compresores libre de polvo y de suciedad. Realizando limpieza de forma periódica. Esto con el fin de que los compresores no aspiren polvo, lo cual reduce los tiempos de limpieza y cambio de filtros de partículas.
3. Solicitar el apoyo de los técnicos para reportar fugas en la tubería rígida y mangueras. Para gestionar los recursos necesarios y realizar las reparaciones en el menor tiempo posible.
4. Utilizar lubricantes sintéticos para los compresores, debido a las propiedades del lubricante este puede ofrecer un ahorro en el consumo de energía eléctrica. También puede apoyar a que se eviten formaciones de carbón en el compresor, alargando la vida útil del mismo. Deben ser asesorados para colocar el aceite indicado en el compresor.
5. Tener un buen mantenimiento preventivo del compresor y de la red de aire comprimido en general.
6. Actualmente se posee un compresor recíprocante, sería útil la adquisición de un compresor que complemente el flujo del mismo, en

lugar de adquirir un compresor más grande para sustituirlo. La razón de esta es la posibilidad de contar con un equipo redundante, si por alguna razón un compresor fallara se podría poner en operación el otro, evitando paros por fallas que podrían afectar al taller. Adicional el hecho de que no siempre se realizan trabajos tan grandes como el de pintura, así que con un compresor trabajando debería ser suficiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. AVALLONE, Eugene; THEODOR, Baumeister III. *Manual del Ingeniero Mecánico*. 1985. México: McGraw-Hill. 2 596 p.
2. CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones*. España: Editorial Paraninfo S.A, 1994. 296 p. ISBN: 84-283-1813-1.
3. CASSANI, Marcelo. *Red abierta*. [en línea]. <<https://marcelocassani.files.wordpress.com/2011/02/redabierta.jpg>>. [Consulta: 5 de abril de 2020].
4. Cultura Científica Goya. *Manómetro de Bourdon*. [en línea]. <<https://culturacientificagoyablog.wordpress.com/manometro-de-bourdon/>>. [Consulta: 7 de abril de 2020].
5. Ferrekasa. *Abrazadera para tubo tipo omega*. [en línea]. <<https://ferrekasa.com.mx/products/abrazadera-para-tubo-tipo-omega-4>>. [Consulta: 23 de abril de 2020].
6. GF Piping Systems. *Codo*. [en línea]. <https://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/10000X/ES/es/109760/109835/109844/P121908/product.html>. [Consulta: 7 de abril de 2020].

7. GRAINGER México. *Niple de acero galvanizado*. [en línea]. <<https://www.grainger.com.mx/producto/GRAINGER-APPROVED-Surtido-Niples-Tubo%2C3-8-pulg-%2CAcero-Galv/p/4PRV4?analytics=searchResults>>. [Consulta: 7 de abril de 2020].
8. Grupo Vermacero C.A. *Tubería de acero al carbono*. [en línea]. <<https://www.vermacero.com/Tablas/A53MP.pdf>>. [Consulta: 7 de abril de 2020].
9. HIDROCA Soluciones Industriales. *Acoples*. [en línea]. <http://hidrocapanama.com/index.php?route=product/product&product_id=248>. [Consulta: 7 de abril de 2020].
10. Magytec. *Compresores*. [en línea]. <<http://www.maqytec.com.co/productos/compresores/>>. [Consulta: 17 de abril de 2020].
11. Mercado Libre Argentina. *Ménsula 40 x 30 cm*. [en línea]. <https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-605885773-mensula-40-x-30-cm-_JM?quantity=1>. [Consulta: 23 de abril de 2020].
12. Pihasa. *Catálogo de soportes 147E*. Madrid, España: Pihasa, 2017. 171 p.

13. RODRÍGUEZ GUTIERREZ, Ervin Joel. *Diseño de la línea de aire comprimido para herramienta neumática en la empresa Turboservicios de CA., S.A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 105 p.
14. ROSALES, Robert. *Manual de mantenimiento industrial*. México: McGraw-Hill. 1994. 1 538 p.
15. Sapiensman. *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. [en línea]. <<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica6.htm>>. [Consulta: 6 de abril de 2020].
16. Starline. *Manuales de herramientas neumáticas*. [en línea]. <<http://www.starline.com.mx/site/wpcontent/uploads/2012/12/Consumos-de-aire-y-presi%C3%B3n-promedio-en-herramientas-neum%C3%A1ticas.pdf>>. [Consulta: 11 de abril de 2020].
17. Termoplásticas. *Unión de tuberías sin soldadura*. [en línea]. <<https://solucionestermoplasticas.com/union-de-tuberias-sin-soldadura/>>. [Consulta: 7 de abril de 2020].
18. Tuberías Soler. *Reducción*. [en línea]. <<http://www.tuberiassoler.cat/es/productos/presion/accesorios-encolados-presion/reduccion-conica/>>. [Consulta: 7 de abril de 2020].

19. VILLAJULCA, Jose Carlos. *Instrumentación y control*. [en línea]. <<https://instrumentacionycontrol.net/conexiones-a-proceso-de-instrumentacion-uniones-bridadas/>>. [Consulta: 6 de abril de 2020].