

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PRINCIPAL DE AIRE COMPRIMIDO EN EL LABORATORIO DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL DE LA ESFOT - EPN**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA**

**CARRERA FAICÁN DARÍO RICARDO**

dario.carrera@epn.edu.ec

**COQUE AVEIGA CHRISTIAN PAUL**

christian.coque@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. HUGO ZÚÑIGA MSc.**

hugo.zuniga@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: ING. SANTIAGO VACA, PhD.**

santiago.vaca@epn.edu.ec

**Quito, julio 2022**

# CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por los Sres. Carrera Faicán Darío Ricardo y Coque Aveiga Christian Paul como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA bajo nuestra supervisión:



Firmado electrónicamente por:  
**HUGO FRANCISCO  
ZUNIGA PUEBLA**

---

**Ing. Hugo Zúñiga MSc.**

DIRECTOR DEL PROYECTO



Firmado electrónicamente por:  
**SANTIAGO  
DAVID VACA  
JIMENEZ**

---

**Ing. Santiago Vaca PhD.**

CODIRECTOR DEL PROYECTO

## DECLARACIÓN

Nosotros Darío Ricardo Carrera Faicán con CI: 1721161246 y Christian Paul Coque Aveiga con CI: 1727382754 declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



---

**Christian Paul Coque Aveiga**

CI: 1727382754

Teléfono: 0996690096

Correo: christian.coque@epn.edu.ec



---

**Darío Ricardo Carrera Faicán**

CI: 1721161246

Teléfono: 0995221423

Correo: dario.carrera@epn.edu.ec

## **DEDICATORIA**

Este proyecto lo dedico, a mis padres por el gran apoyo que me dieron durante esta carrera que junto a su amor y paciencia ayudaron a culminar este gran paso.

**Christian**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a mi familia que, con su arduo trabajo, hicieron posible esta meta que junto con la disciplina se logró.

**Christian**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico a los estudiantes de la Escuela de Formación de Tecnólogos de la Escuela Politécnica Nacional, a quienes espero les sea de ayuda a lo largo de su aprendizaje en las aulas.

*Darío*

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, Ángel y Denisse quienes me han apoyado durante todo este trayecto de aprendizaje, brindándome su amor y cariño en todo momento, enseñándome que con esfuerzo y dedicación las metas se cumplen.

Gracias a mi hermano Alex y mis amigos quienes me brindaron ánimos para seguir adelante en mi vida estudiantil.

A Leonela, mi gran amiga y compañera quien me ha acompañado desde el inicio en las aulas de clase y ha sido un gran soporte en este largo viaje.

También quiero agradecer a mi director de proyecto, el Ingeniero Hugo, quien ha sabido brindarme su motivación dentro y fuera del aula de clases para poder conseguir este tan ansiado logro.

*Darío*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivo general.....	3
1.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Fundamentos .....	4
	Generación de energía neumática. ....	4
	Compresor de pistones.....	4
	Análisis de vibraciones.....	5
	Acelerómetro.....	5
	Métodos de dimensionamiento de tuberías neumáticas.....	6
	Método 1. Flujo interno con ecuación de Colebrook.....	6
	Método 2. Flujo interno con diagrama de Moody.....	7
	Método 3. Fabricante Atlas Copco.....	8
	Método 4. Nomograma de Festo.....	8
	Método 5. Fabricante Parker Hannifin.....	9
	Recomendaciones de instalación de las tuberías.....	9
	Caída de Tensión.....	10
	Cálculo del calibre del conductor eléctrico .....	11
2	Metodología.....	12
2.1	Descripción de la metodología usada.....	12
3	Resultados y Discusión.....	15
3.1	Demanda de aire comprimido.....	15
	Ubicación del compresor y tomas de aire comprimido.....	15
	Dimensiones de la red.....	16
	Diagrama unifilar.....	18
	Cálculo de consumo de aire en puntos de servicio.....	19
3.2	Dimensionamiento de las tuberías y selección de accesorios.....	21



Dimensionamiento del diámetro de las tuberías sin accesorios.....	22
Cálculo del tramo A-B.....	24
Dimensionamiento de tuberías considerando accesorios.....	25
Tuberías seleccionadas en base de catálogos.....	29
3.3 Implementación del sistema.....	31
Conductor eléctrico para instalación de compresor.....	31
Protección eléctrica.....	32
Instalación de tuberías y accesorios de línea de distribución.....	33
3.4 Pruebas del sistema.....	40
Prueba de caudal en la red de aire comprimido.....	40
Prueba de fugas en la red de aire comprimido.....	41
Verificación de la caída de presión.....	43
Prueba de caída de voltaje en la alimentación eléctrica.....	44
3.5 Manual de uso y mantenimiento.....	46
4 Conclusiones y Recomendaciones.....	47
4.1 Conclusiones.....	47
4.2 Recomendaciones.....	48
5 Referencias Bibliográficas.....	50
ANEXOS.....	i

## ÍNDICE DE FIGURA

<b>Figura 1.1</b> Compresor de pistón.....	4
<b>Figura 1.2</b> Acelerómetro piezo eléctrico.....	5
<b>Figura 1.3</b> Diagrama de Moody.....	7
<b>Figura 1.4</b> Nomograma de Festo.....	8
<b>Figura 2.1</b> Esquema de la metodología utilizada.....	1
<b>Figura 3.1</b> Ubicación del compresor en el cuarto de máquinas.....	15
<b>Figura 3.2</b> Distribución de puntos de servicio en LTI.....	16
<b>Figura 3.3</b> Medidas de tuberías de la red en el subsuelo.....	17
<b>Figura 3.4</b> Medidas de tuberías que conectan el tramo subsuelo - LTI.....	17
<b>Figura 3.5</b> Medidas de tuberías de LTI.....	18
<b>Figura 3.6</b> Vista isométrica del diagrama unifilar de la red.....	19
<b>Figura 3.7</b> Consumo de aire en el LTI.....	19
<b>Figura 3.8</b> Líneas de distribución principal y líneas de servicio.....	22
<b>Figura 3.9</b> Línea crítica del sistema de aire comprimido.....	23
<b>Figura 3.10</b> Longitud equivalente de accesorios método Atlas Copco.....	26
<b>Figura 3.11</b> Especificaciones técnicas del compresor.....	31
<b>Figura 3.12</b> Tabla de calibres de cables eléctricos.....	31
<b>Figura 3.13</b> Interruptores termomagnéticos comerciales.....	32
<b>Figura 3.14</b> Proceso de anclaje del compresor.....	33
<b>Figura 3.15</b> Compresor fijado al piso.....	33
<b>Figura 3.16</b> Construcción de línea de distribución desde compresor.....	34
<b>Figura 3.17</b> Medición de longitudes necesarias de tubería.....	34
<b>Figura 3.18</b> Corte de tubería de longitud necesaria.....	35
<b>Figura 3.19</b> Roscado de tubería.....	35
<b>Figura 3.20</b> Colocación de teflón en roscas.....	36
<b>Figura 3.21</b> Sujeción de tuberías al tumbado.....	36
<b>Figura 3.22</b> Tendido de líneas de distribución principal.....	37
<b>Figura 3.23</b> Inclinación de tuberías de distribución principal.....	37
<b>Figura 3.24</b> Instalación de FRL y purgas de condensado.....	38
<b>Figura 3.25</b> Instalación de accesorio para conexión de transductores de presión.....	38
<b>Figura 3.26</b> Proyecto finalizado.....	39
<b>Figura 3.27</b> Código QR, video implementación del sistema.....	39
<b>Figura 3.28</b> Circuito neumático utilizado para las pruebas.....	40
<b>Figura 3.29</b> Presión inicial del tanque de almacenamiento.....	41

<b>Figura 3.30</b>	Presión del tanque de almacenamiento después de 30 minutos. ....	42
<b>Figura 3.31</b>	Lectura inicial una vez presurizado el sistema.....	42
<b>Figura 3.32</b>	Lectura después de 30 minutos de presurizar el sistema.....	43
<b>Figura 3.33</b>	Manómetro en el compresor. ....	44
<b>Figura 3.34</b>	Manómetro en la parte crítica de la red.....	44
<b>Figura 3.35</b>	Voltaje medido en el tablero de distribución.....	45
<b>Figura 3.36</b>	Voltaje medido en el compresor. ....	45
<b>Figura 3.37</b>	Código, video pruebas del sistema y funcionamiento.....	46
<b>Figura 3.38</b>	Código QR, video de manual de uso y mantenimiento.....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Factor de simultaneidad. ....	20
<b>Tabla 3.2</b> Caída de presión máxima recomendada .....	24
<b>Tabla 3.3</b> Diámetro de tuberías sin accesorios .....	25
<b>Tabla 3.4</b> Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (A-B) .....	26
<b>Tabla 3.5</b> Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (B-C). ....	28
<b>Tabla 3.6</b> Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (B-E). ....	28
<b>Tabla 3.7</b> Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (B-F).....	28
<b>Tabla 3.8</b> Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (C-D). ....	29
<b>Tabla 3.9</b> Diámetros de tuberías incluidas las pérdidas por accesorios. ....	29
<b>Tabla 3.10</b> Diámetros de tuberías estandarizados. ....	30

## RESUMEN

Antes del desarrollo del presente proyecto de titulación, las prácticas dentro del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI) de la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) tenían serias limitaciones. Esto debido a que se disponía únicamente de un compresor de baja capacidad y presión, el cual limitaba el trabajo simultáneo de varios módulos.

Con el objetivo de suplir esta necesidad, en este proyecto se dimensionaron e implementaron las tuberías de distribución principal del sistema de aire comprimido para entregar una presión y caudal adecuado para las prácticas de este laboratorio. Por esta razón, se calculó el diámetro interno de la tubería utilizando el método de dimensionamiento de la red de aire comprimido de Atlas Copco®. Luego, en AutoCAD se realizó el diagrama unifilar de la red prevista de acuerdo con la distribución de las estaciones de trabajo dentro del LTI. De la ficha técnica del compresor, se extrajeron los valores de presión y caudal que este suministra al sistema. Se recalcularon los diámetros de las tuberías de distribución y servicio añadiendo la longitud equivalente de los accesorios. Esta tubería se seleccionó del catálogo Presión PVC Roscable Plastigama. De igual forma se consideró la inclinación de 5° que deben tener las tuberías tendidas para poder extraer el condensado a través de las purgas instaladas. Posteriormente, se realizó el modelado 3D en SolidWorks® en el cual se presentan con detalle los elementos que integran el sistema de aire comprimido.

Guiándose en los cálculos, se implementó el sistema de aire comprimido con los materiales adquiridos como tuberías, válvulas, y demás accesorios. Asimismo, se fijó el compresor dentro del cuarto de máquinas, y se realizó la conexión eléctrica del mismo siguiendo las recomendaciones de la NEC.

Finalmente, se realizaron las pruebas de caída de presión, caudal, fugas y caída de tensión. Estas verificaron el correcto funcionamiento del sistema.

**PALABRAS CLAVE:** compresor, tubería, neumática, presión, aire, cfm.

## ABSTRACT

Previously, the Industrial Technology Laboratory (LTI) of the Technologist Training School (ESFOT) of the National Polytechnic School (EPN) had a compressor of low capacity. Thus, the teaching possibilities inside the laboratory were limited, as the pressure and air flow were insufficient to allow students to work simultaneously in the available modules.

According to that necessity, in this thesis we sized and implemented the compressed air network using a compressor with a larger capacity. By doing this, it was possible to supply the demand of compressed air in all the modules, and so, improve the learning experience of the students.

For the sizing, first we calculated the internal diameter of the piping using the Atlas Copco® compressed air network sizing method. Then, the single-line diagram of the planned network was made in AutoCAD according to the distribution of the workstations inside the LTI. From the compressor data sheet, the pressure and flow values were extracted. The diameters of the distribution and service pipes were recalculated by adding the equivalent length of the fittings. This piping was selected from the Plastigama Threadable PVC Pressure catalog. Likewise, the 5° inclination that the pipelines should have to facilitate the condensate extraction through the drains was also calculated. Subsequently, a 3D modeling was made using SolidWorks®, to provide enough detail of the system and its components.

Guided by the calculations, the compressed air system was implemented with the acquired materials such as pipes, valves, and other accessories. Also, the compressor was fixed inside the machine room, and its electrical connections were made following the National Construction Standard (NEC in Spanish).

Finally, pressure drop, flow, leakage and voltage drop tests were performed. These verified the correct operation of the system.

**KEY WORDS:** compressor, piping, pneumatic, pressure, air, cfm

# 1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de aire comprimido desempeñan un papel importante dentro de la industria ya que, gracias a sus características constructivas, proporcionan un movimiento controlado a las herramientas neumáticas. Las herramientas neumáticas se componen por cilindros, motores, válvulas de control y posicionadores [1]. Además, los sistemas de aire comprimido se destacan por su bajo coste en componentes, su fácil diseño e implementación y por el factor de seguridad que estos proporcionan a las personas, ya que poseen un riesgo nulo de explosión, así como fuerzas de escasa magnitud desarrolladas a las bajas presiones con las que trabaja el sistema (generalmente 6 bar abs) [1].

Para complementar el conocimiento adquirido durante una clase teórica, es necesario agregar un aprendizaje práctico que involucre procesos reales. Por esta razón, es de suma importancia contar con un laboratorio en óptimas condiciones, que tenga los equipos necesarios, para poder realizar prácticas que se asemejen a las actividades desarrolladas en el campo laboral [2].

Dentro del plan de estudios que ofrece la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT), se encuentran las materias de: Neumática y Oleohidráulica, Fluidos para Transmisión de Potencia y Control Electromecánico, en las cuales se desarrollan prácticas de laboratorio con la ayuda de distintos módulos neumáticos que incluyen varios cilindros, acondicionamiento de tomas de presión y plantas didácticas que utilizan aire comprimido.

Para el desarrollo de cada práctica es necesario el uso de aire comprimido, que es suministrado por un solo compresor pequeño, con el que cuenta actualmente el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI). El compresor es de 1HP de potencia y provee máximo 125 PSI de presión. Sin embargo, su capacidad de caudal no abastece el trabajo simultáneo de varios módulos que se utilizan en las diferentes prácticas.

Para resolver esta necesidad, este proyecto propone implementar la línea de distribución de aire comprimido que utilizará el compresor de 5 HP obtenido en el proceso de adquisición de equipos para el LTI.

Con este proyecto, se espera mejorar el desarrollo de las prácticas que se realizan en el LTI, dentro de las distintas asignaturas de las carreras de la ESFOT, en las cuales se

requiere el uso de aire comprimido. Esta mejora se logró mediante el dimensionamiento e implementación de un sistema de distribución de aire comprimido.

A través de este proyecto, se logró abastecer de energía neumática a cada punto donde se requiera desarrollar una práctica. Se instaló mediante el proceso de adquisición de equipos de la ESFOT, un compresor centralizado de mayor capacidad basado en estimaciones del requerimiento de energía neumática que se utiliza durante las prácticas desarrolladas en las materias antes mencionadas [3]. Además, se implementó la línea principal del sistema de distribución de aire comprimido; a la cual se conectó el anillo de distribución y servicio de los diferentes puntos de requerimiento, ubicados alrededor del LTI, considerando posibles ampliaciones en el futuro. Con esto, el laboratorio cuenta con alimentación de aire comprimido en los diferentes módulos didácticos empleados para el desarrollo de prácticas [4].

Se debe destacar que el presente proyecto es complementario al proyecto de titulación denominado "Implementación de un sistema de líneas de servicio de aire comprimido en el Laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT-EPN". En el presente proyecto se instalarán tanto el compresor, como las líneas principales que alimentan al sistema, mientras que el proyecto complementario se encargará de la instalación de las líneas de servicio y los puntos de consumo [5].



## **1.1 Objetivo general**

- Implementar el sistema de distribución principal de aire comprimido en el Laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT – EPN.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Determinar la demanda de aire comprimido para el sistema de distribución.
- Dimensionar las tuberías y accesorios del sistema.
- Implementar los diferentes componentes del sistema de distribución de aire comprimido.
- Realizar pruebas en el sistema de distribución de aire comprimido.
- Elaborar un manual de uso y mantenimiento preventivo del sistema.

## 1.3 Fundamentos

### Generación de energía neumática.

El aire comprimido es una herramienta importante para el desarrollo de la industria, este permite transportar energía a largas distancias y transformarlo en trabajo aprovechable en sus puntos de consumo. Para producir aire comprimido hay que transferirle energía utilizando compresores para elevar su presión. Existen compresores de diferentes tipos, como por ejemplo de pistones, helicoidales, de membrana, rotativos, de espiral, de turbo compresión, entre otros.

El compresor constituye la primera estación en el proceso de generación de aire comprimido, ya que un sistema completo cuenta con la preparación y distribución de este a través de tuberías [6].

### Compresor de pistones.

Este compresor es el más conocido en la industria, donde el aire comprimido se produce a través del movimiento alternativo de un pistón. Funciona en dos etapas: la primera, en la etapa de admisión, el aire entra en la cámara del pistón a través de una válvula automática; luego en la etapa de compresión se transfiere energía produciendo aire a una presión determinada que sale a través de una válvula de descarga hacia el depósito de almacenamiento [6]. El movimiento mecánico del pistón se logra a través de un motor eléctrico, este tipo de compresor se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1** Compresor de pistón.  
Fuente: [7]

## Análisis de vibraciones.

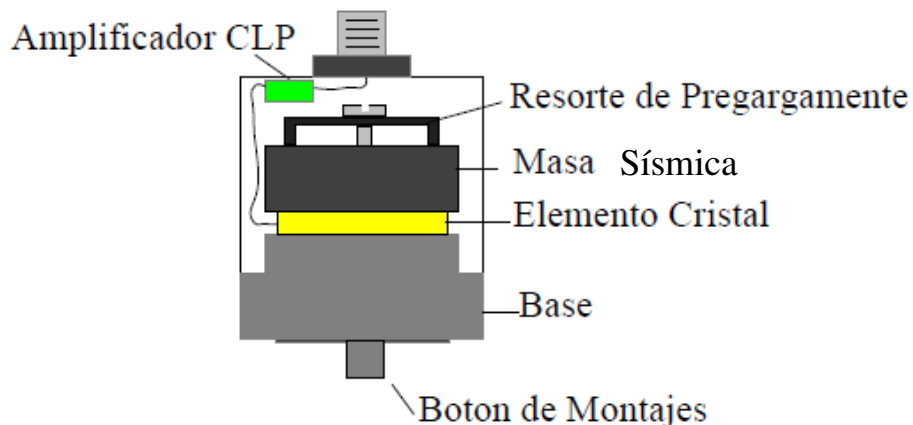
El estudio de vibraciones en máquinas rotativas es importante para determinar si el motor y compresor se encuentran instalados correctamente, ya que este análisis permitirá diagnosticar de manera temprana problemas inminentes en la maquinaria, como desalineación, desequilibrio, piezas deformadas, desgaste de rodamientos, entre otras [8].

Se considera una vibración al movimiento oscilatorio o repetitivo de un objeto en comparación a su posición de equilibrio [9]. Esta posición de equilibrio se logra cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. La vibración que se presenta en máquinas es conocido como vibración de cuerpo entero, ya que todas sus partes se mueven conjuntamente en la misma dirección en todo instante [9].

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación, esta fuerza puede ser aplicada al objeto externamente o a su vez tener origen adentro de este. La proporción y magnitud de la vibración de un objeto son determinadas por completo por la fuerza de excitación, su dirección y frecuencia. Es por este motivo que un análisis de vibraciones determina la fuerza de excitación que actúa sobre una máquina.

## Acelerómetro.

Es un transductor de vibraciones, el cual produce una señal eléctrica en respuesta al movimiento oscilatorio al que se encuentra sujeto. Este se encarga de producir señales uniformes en el rango de la frecuencia de interés. En la Figura 1.2 se puede ver la estructura interna de un acelerómetro piezoeléctrico [9].



**Figura 1.2** Acelerómetro piezo eléctrico.  
Fuente: [9]

El acelerómetro piezoeléctrico se lo utiliza principalmente para la medición de vibraciones en máquinas rotacionales. El elemento piezoeléctrico más utilizado es el cuarzo y se encuentra entre la base y la masa sísmica del equipo, que al estar sujeto a una fuerza, este genera una carga eléctrica entre sus superficies.

Al moverse el acelerómetro de arriba hacia abajo, la fuerza necesaria para mover la masa sísmica es soportada por el elemento activo, que, de acuerdo con la segunda ley de Newton, esta fuerza es proporcional a la aceleración de la masa. Por lo tanto, la fuerza ejercida sobre el cristal es la encargada de producir la señal de salida proporcional a la aceleración del transductor [9].

### **Métodos de dimensionamiento de tuberías neumáticas.**

En esta sección se describirán algunos métodos para el dimensionamiento de tubería neumática que serán útiles en la selección del diámetro interno de la tubería del sistema de distribución principal de aire comprimido a implementar en el LTI.

Para poder comparar los resultados entre cada método aquí mencionado se utilizarán los datos reales detallados en el Anexo 3, provistos por el fabricante del compresor que se adquirió, además de los valores necesarios que se encuentran tabulados en la bibliografía de cada método respectivamente.

Los métodos para analizar son los siguientes:

- ✓ Método 1. Flujo interno con ecuación de Colebrook [10].
- ✓ Método 2. Flujo interno con diagrama de Moody [10].
- ✓ Método 3. Fórmula del fabricante Atlas Copco [11].
- ✓ Método 4. Uso de nomograma de Festo [4].
- ✓ Método 4. Fórmula del fabricante Parker Hannifin [12].

#### **Método 1. Flujo interno con ecuación de Colebrook.**

Este método de dimensionamiento es planteado en el libro de Mecánica de Fluidos de Yunus A. Çengel [10] y permite calcular el diámetro interno de la tubería cuando la longitud de la tubería y la razón de flujo se proporcionan para una caída de presión o pérdida de carga específica.

La ecuación de Colebrook como tal se muestra en la Ecuación 1.1:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

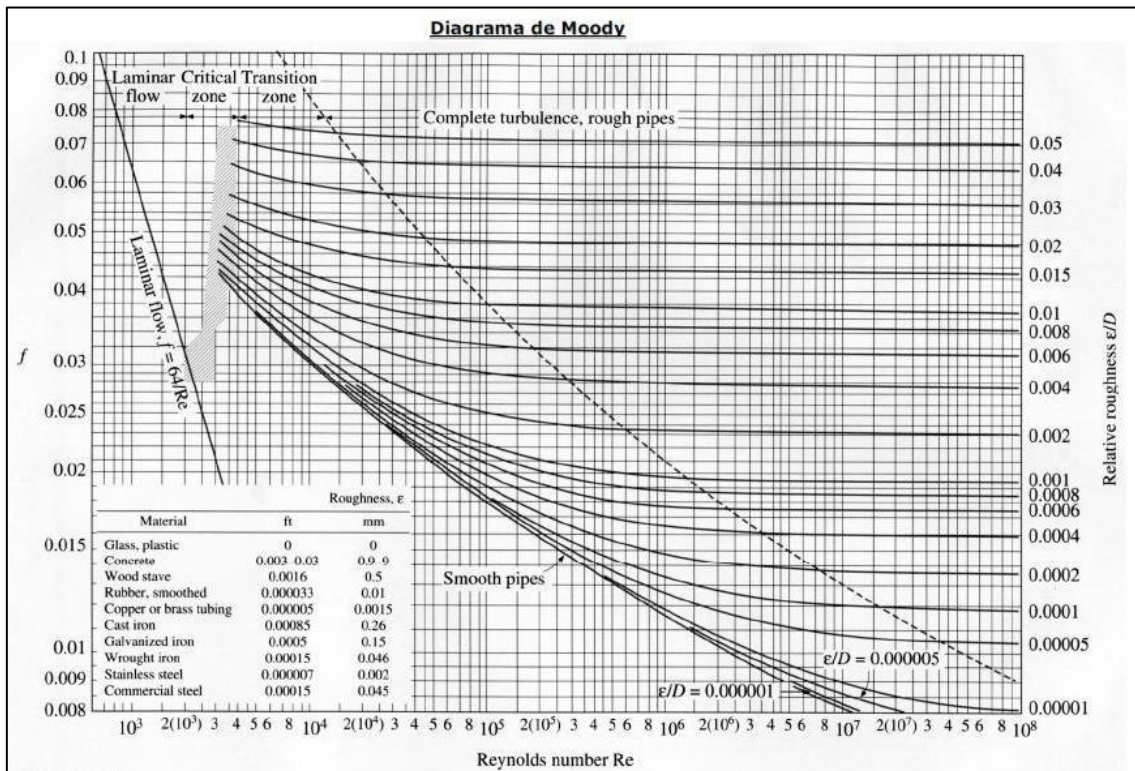
**Ecuación 1.1** Ecuación de Colebrook.  
Fuente: [10]

Donde:

- f : Fricción del material (adimensional)
- Re : Número de Reynolds (adimensional)
- $\epsilon/D$  : Rugosidad relativa (adimensional)

### Método 2. Flujo interno con diagrama de Moody.

De igual manera este método se encuentra en el libro de Mecánica de Fluidos de Yunus A. Çengel, el diagrama de la Figura 1.3 representa el factor de fricción de Darcy para flujo en tubería como función del número de Reynolds y la rugosidad relativa  $\epsilon/D$  sobre un amplio rango de valores [10].



**Figura 1.3** Diagrama de Moody.  
Fuente: [10]

### Método 3. Fabricante Atlas Copco.

Atlas Copco es una empresa dedicada a la fabricación de sistemas neumáticos. Esta ha definido su propio método de dimensionamiento de tuberías para distribución de aire comprimido, este se muestra en la Ecuación 1.2 y representa la caída de presión para una tubería recta [11].

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

**Ecuación 1.2** Cálculo para una tubería recta.

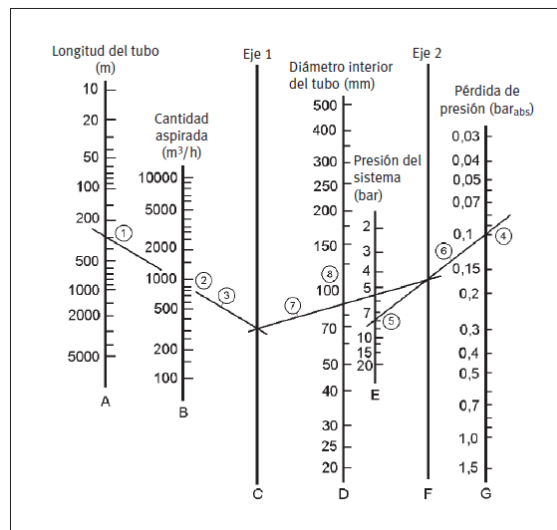
Fuente: [11]

Donde:

- $\Delta p$  : caída de presión (bar).
- $q_c$  : caudal de aire. FAD (l/s).
- $d$  : diámetro interno de la tubería (mm).
- $l$  : longitud de la tubería (m).
- $p$  : presión absoluta inicial (bar a).

### Método 4. Nomograma de Festo.

Festo es una de las empresas más grandes de sistemas neumáticos. Ellos brindan soluciones de ingeniería, fabrican maquinaria y herramientas. Ellos también han diseñado un método con el cual es posible determinar tuberías para aire comprimido utilizando el nomograma de la Figura 1.4 [4].



**Figura 1.4** Nomograma de Festo.

Fuente: [4]

## Método 5. Fabricante Parker Hannifin

Parker Hannifin es una empresa dedicada a la fabricación de accesorios neumáticos, así como de implementos para instalaciones de redes de aire comprimido. Dentro de sus manuales cuentan con una única fórmula que permite dimensionar la tubería de una red neumática Ecuación 1.3 [12].

$$\Delta P = 1.6 \times 10^3 * Q^{1.85} \left( \frac{l}{\phi^5 * P} \right)$$

**Ecuación 1.3** Cálculo de tubería según fabricante Parker Hannifin.

Fuente: [12]

Donde:

- $\Delta P$  : caída de presión en el sistema (Pa).
- P : presión manométrica del sistema (Pa).
- L : longitud de la tubería (m).
- $\phi$  : diámetro interno de la tubería (m).
- Q : Caudal normal del sistema (Nm<sup>3</sup>/s).

## Recomendaciones de instalación de las tuberías.

Cuando se trata de distribución de aire comprimido es preciso abordar la red de tuberías ya que, si no se encuentran bien tendidas y no se realiza un mantenimiento apropiado, estas serán fuente de pérdidas de energía y costos elevados en la producción de aire comprimido. Por lo tanto, es preciso tener en consideración las siguientes recomendaciones [13]:

- El estado físico de la red de tuberías debe ser óptimo para evitar fugas que, a largo plazo, generarán costos elevados.
- Los tubos deben estancos, es decir herméticos o completamente cerrados, resistentes a la corrosión y deben permitir ampliaciones futuras.
- Los tramos de tubería deben ser bien dimensionados ya que un diámetro demasiado pequeño, producirá una caída de presión considerable.
- El sistema de evacuación de condensado debe estar diseñado de tal forma que cumpla su propósito, se recomienda colocar purgas en la parte más baja de la red de tuberías que permita acumular y evacuar el condensado formado en la red.
- Con el fin de cumplir el punto anterior se debe tender cada tramo horizontal de la red con una inclinación del 1 (%) hasta 2 (%) de la longitud de la tubería.

- Siempre instalar las tomas de servicio a través de la conexión llamada sifón invertido, que permite que el condensado generado en la red no llegue al punto de consumo.

### **Caída de Tensión.**

Como parte del proyecto se procedió a la instalación eléctrica del compresor, por lo tanto, es importante incluir este tema para que el lector tenga en cuenta las precauciones que se deben tener al momento de escoger los materiales y protecciones que el circuito de fuerza requiere para su correcto funcionamiento.

La caída de tensión es la diferencia entre la tensión que se aplica a un circuito y la obtenida en cualquier parte de este. Por lo general, la caída de tensión se analiza en el punto más lejano de la instalación y es importante para que cualquier máquina eléctrica no sufra daño por sobrecarga de corriente. La Ecuación 1.4 muestra la forma de calcular dicha caída de tensión [14].

Al ser el compresor parte esencial de la red de aire comprimido, es fundamental tener presente este efecto de pérdida de potencial causado por la resistencia propia del conductor eléctrico que energiza la máquina a lo largo de su recorrido, ya que, si a la máquina eléctrica le llega menor voltaje del necesario, esta consumirá mayor corriente de la nominal, para así mantener la potencia de trabajo, originando una sobrecarga y por consiguiente el sobrecalentamiento de los devanados del estator, llegando inclusive a quemarlos.

$$\Delta V = V_A - V_T$$

**Ecuación 1.4** Cálculo de caída de tensión.  
Fuente: [14]

Donde:

$\Delta V$  : caída de tensión (V).

$V_A$  : tensión aplicada al circuito (V).

$V_T$  : tensión medida en el punto más lejano del circuito (V).



La caída de tensión es preferible expresarla en porcentaje de la tensión aplicada, como muestra la Ecuación 1.5.

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V}{V_A} * 100$$

**Ecuación 1.5** Caída de tensión como porcentaje de la tensión aplicada.  
Fuente: [14]

De acuerdo a la NEC en el capítulo 5 Calibre de conductores, la caída máxima de tensión permitida debe ser del 3 (%), ya que caídas de tensión mayores producirán fallos en el funcionamiento de los equipos conectados al circuito y deterioro temprano de los mismos [15].

Si se desea calcular la caída de tensión en cualquier circuito se utiliza la Ecuación 1.6 [14].

$$\Delta V = \frac{\rho * L * I}{A}$$

**Ecuación 1.6** Cálculo de caída de tensión en cualquier circuito.  
Fuente: [14]

Donde:

$\Delta V$  : caída de tensión (V).

$\rho$  : resistividad del conductor ( $\Omega * \text{mm}^2/\text{m}$ )

L : longitud de ida y vuelta del conductor (m).

I : corriente eléctrica (A).

A : área de la sección transversal del conductor ( $\text{mm}^2$ ).

La resistividad del cobre es:

$$\rho = 0,01724 \left( \frac{\Omega * \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$$

### **Cálculo del calibre del conductor eléctrico**

Para poder calcular el área de la sección del conductor necesario para la instalación de una carga, tomando en cuenta la caída de tensión sugerida en el Capítulo 5 Calibre de conductores de la NEC, simplemente se despeja el área (A) de la Ecuación 1.6 [14].

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1 Descripción de la metodología usada.**

El presente proyecto se implementa a través de un proceso de metodología aplicada.

Se implementó el sistema de distribución de aire comprimido en el LTI de tal manera que el suministro de caudal permita desarrollar varias prácticas simultáneamente. Se determinó el número y la ubicación de las tomas de servicio a instalar tomando en cuenta la distribución de espacio disponible en el laboratorio, así como sus posibles ampliaciones. Luego se dimensionó el diámetro de las tuberías tanto de distribución como de servicio tomando como base la caída máxima de presión recomendable por el manual de Atlas Copco® [11]. Con esta información se realizó la estructura del sistema mediante un modelado 3D utilizando el software de diseño SolidWorks® [16].

Con base al modelado 3D se implementaron los diferentes componentes del sistema de distribución de aire comprimido, se inició con la instalación del compresor en el subsuelo del LTI, este lugar se lo denominó como “cuarto de máquinas” y fue escogido ya que, al momento de funcionar el compresor, sus componentes mecánicos generan un nivel alto de ruido, además cuenta con el espacio suficiente para alojar el compresor, según sus dimensiones, y un piso adecuado para fijarlo sin mayor problema [17]. Se continuó con el sistema de distribución de aire comprimido, junto con sus diferentes componentes, esto se realizó basándose en los cálculos y el modelo 3D previamente elaborados con las recomendaciones de instalación de aire comprimido, como, por ejemplo: la inclinación de la tubería, ubicación de válvulas de cierre y purgas de condensados [10].

Finalmente, en el proceso de implementación, se realizó la instalación eléctrica del compresor considerando que es un circuito de carga especial. Para este propósito se calculó tanto el calibre del conductor a utilizar, como la protección eléctrica a instalar, cumpliendo lo estipulado en el Capítulo 7 Protecciones contra sobrecorrientes de la Norma Ecuatoriana de la Construcción referente a Instalaciones Eléctricas (NEC) [15].

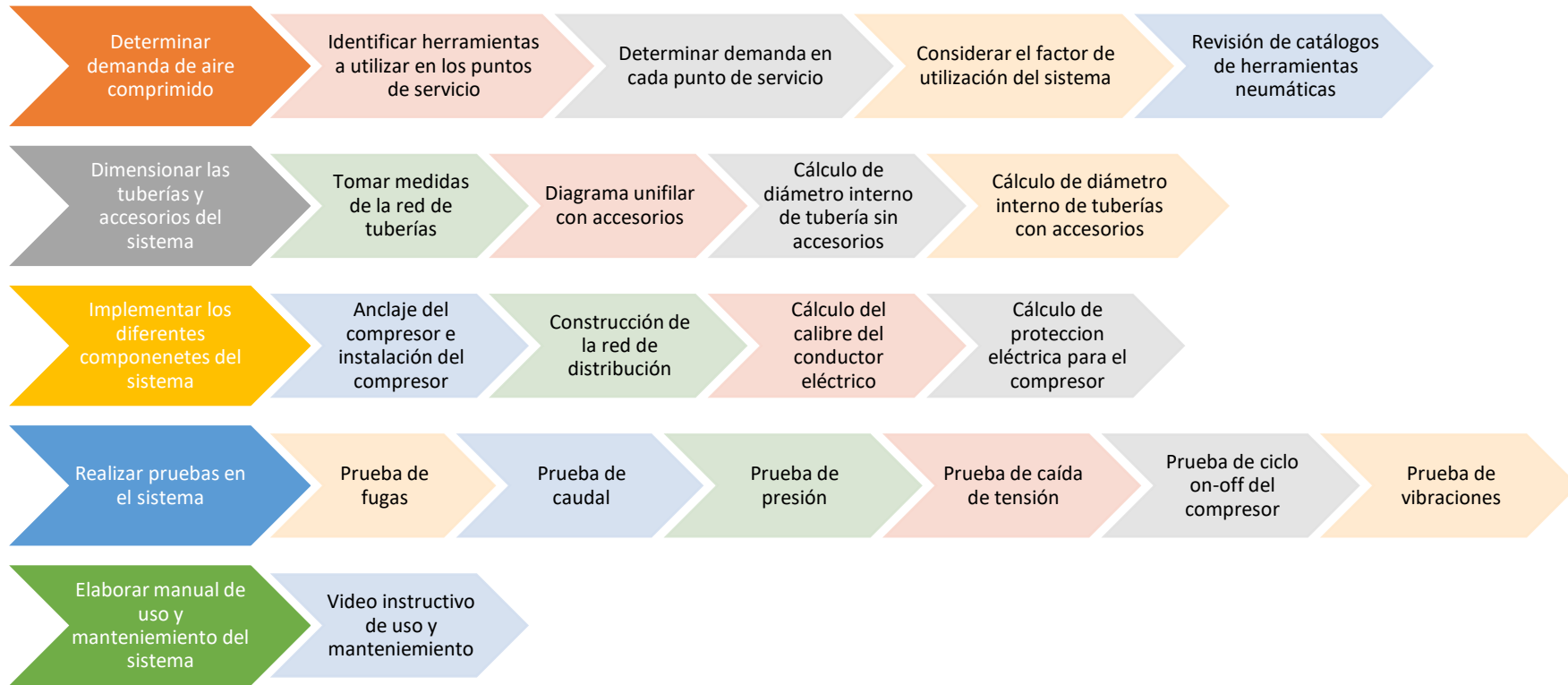
Luego de la implementación del sistema de distribución de aire comprimido, se realizaron las siguientes pruebas del sistema:

- Prueba de fugas de manera auditiva.
- Prueba de caída de presión en la línea crítica.
- Prueba de caudal en cada punto de servicio.
- Prueba de caída de tensión.
- Prueba de ciclos de encendido y apagado del compresor.
- Prueba de vibraciones.

Considerando que el sistema funciona adecuadamente, se muestra en el Anexo 1 el certificado de funcionamiento del equipo.

Finalmente, se elaboró un manual de uso y mantenimiento preventivo del sistema, este detalla el correcto uso del sistema de distribución de aire comprimido que contiene las principales acciones que se deben considerar en el sistema para su operación [13]. Además, se realizó una guía para realizar el mantenimiento preventivo del sistema, considerando las recomendaciones del fabricante para cada dispositivo instalado [18].

En la Figura 2.1 se observa un esquema donde se resume la metodología antes descrita.



**Figura 2.1** Esquema de la metodología utilizada.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Demanda de aire comprimido.

##### Ubicación del compresor y tomas de aire comprimido.

Para determinar la ubicación del compresor, como se observa en la Figura 3.1, se buscó el lugar adecuado, el cual cumpla con las siguientes características:

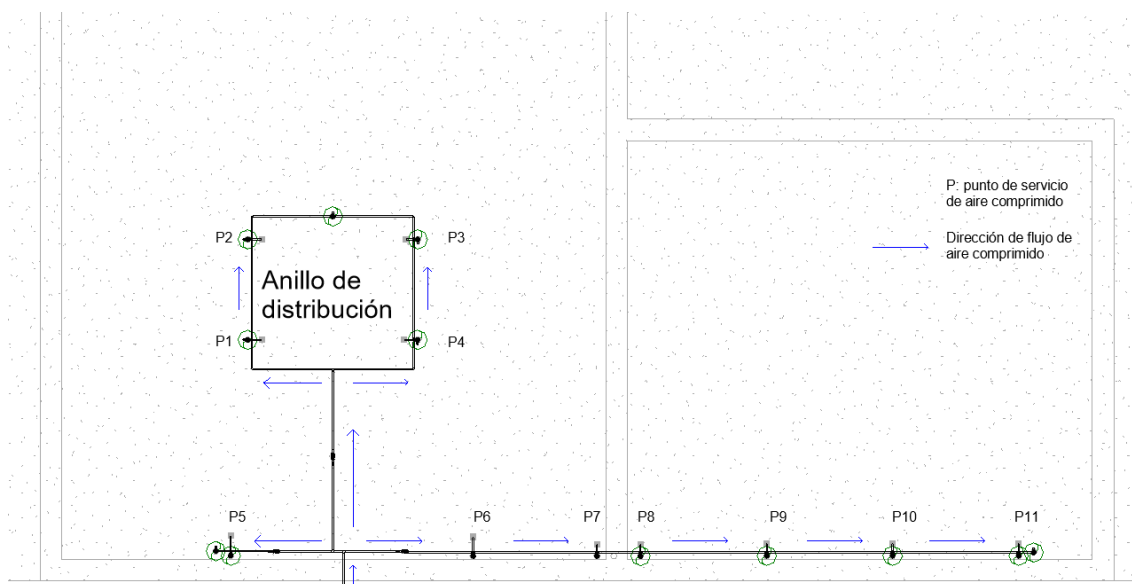
- Poseer el espacio necesario para las dimensiones del compresor.
- El piso sea adecuado para el anclaje del compresor.
- El cableado de la instalación eléctrica sea sencillo.
- El lugar debe aislar en lo posible el ruido que genera el motor del compresor.

El subsuelo del LTI posee el espacio que cumple con las características buscadas, por lo que se lo denominó como cuarto de máquinas, y es en este lugar donde se halla el compresor.



**Figura 3.1** Ubicación del compresor en el cuarto de máquinas.

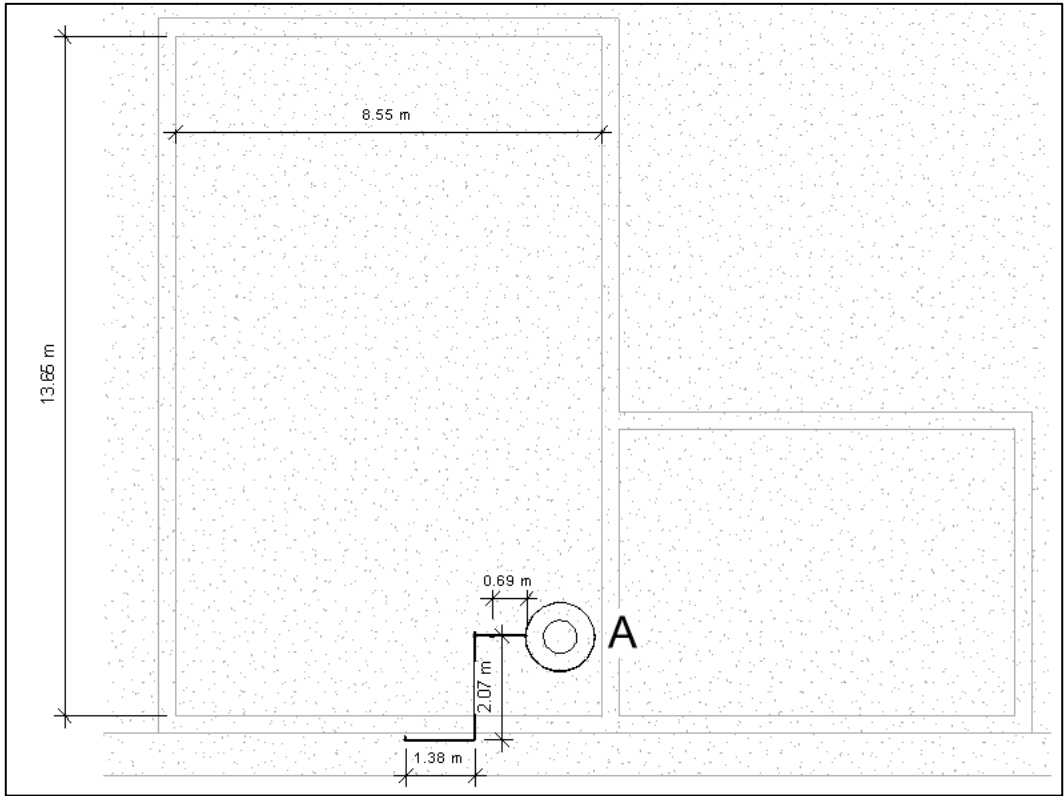
La ubicación de los puntos de servicio alrededor del LTI y su extensión hacia el aula 33, se muestran en la Figura 3.2, éstas fueron elegidas de acuerdo con la distribución existente de las mesas de trabajo de las diferentes prácticas de laboratorio desarrolladas aquí (P1 a P4 y P8 a P11). También se consideró el espacio destinado a los módulos neumáticos móviles y finalmente futuras expansiones (P5 a P7).



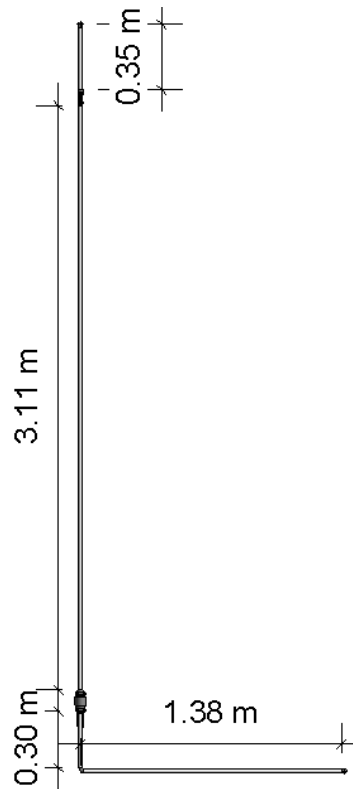
**Figura 3.2** Distribución de puntos de servicio en LTI.

### **Dimensiones de la red.**

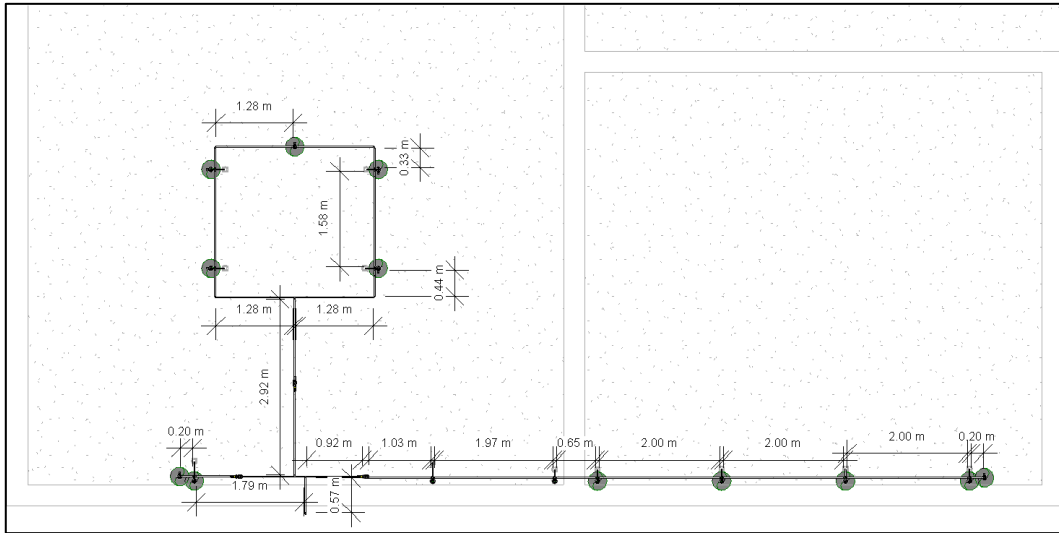
Se tomaron las medidas de todos los puntos de distribución y los puntos de servicios donde se va a instalar la red de aire comprimido en el LTI, desde el compresor hacia todas las tomas de servicio como se muestra en la Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5.



**Figura 3.3** Medidas de tuberías de la red en el subsuelo.



**Figura 3.4** Medidas de tuberías que conectan el tramo subsuelo - LTI.



**Figura 3.5** Medidas de tuberías de LTI.

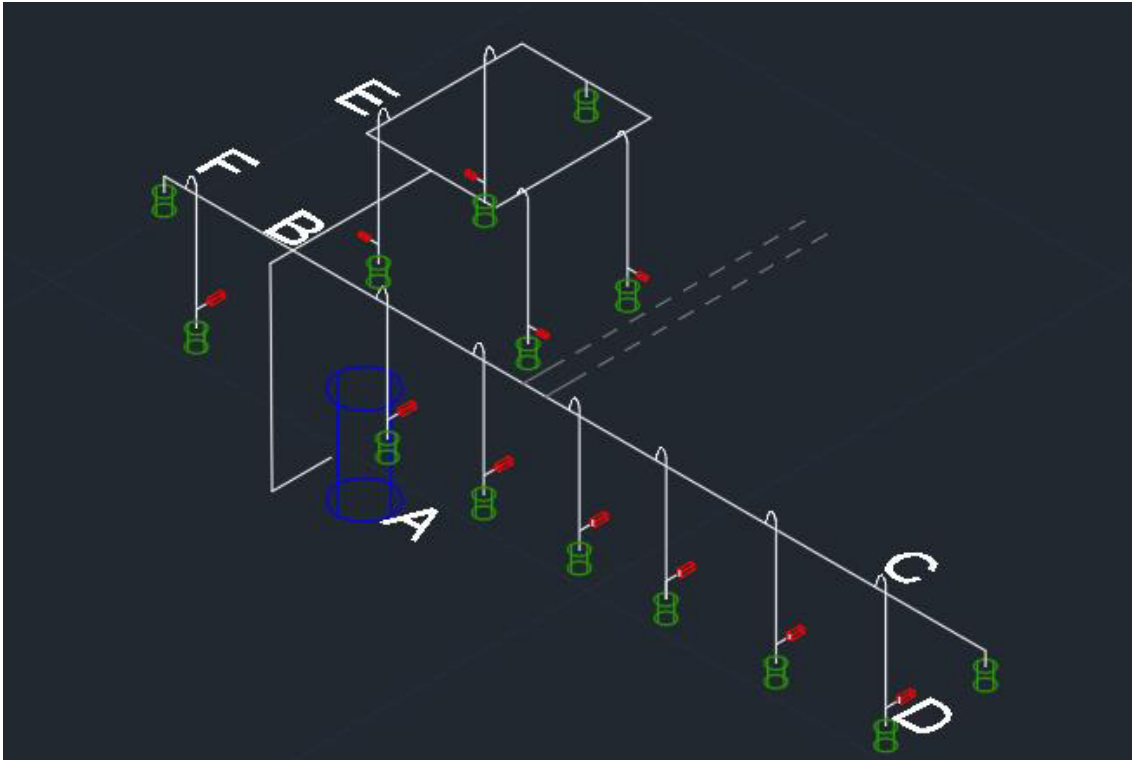
### **Diagrama unifilar.**

Con las medidas necesarias, tomadas dentro del LTI y su expansión en el aula 33, se procedió a realizar el diagrama unifilar con los accesorios principales seleccionados.

En el diagrama de la Figura 3.6, se observa el punto A con la figura de color azul que representa el compresor, las figuras de color verde representan las purgas de condensado y las figuras de color rojo representan las tomas de servicio, mientras que las líneas entrecortadas paralelas representan la pared que divide el LTI y el aula 33.

En el Anexo 2 se pueden encontrar a más detalle los planos y esquemas utilizados para la implementación del sistema, aquí se pueden visualizar los accesorios instalados junto con la tubería de distribución, dimensiones de la red, así como la vista isométrica del proyecto finalizado.

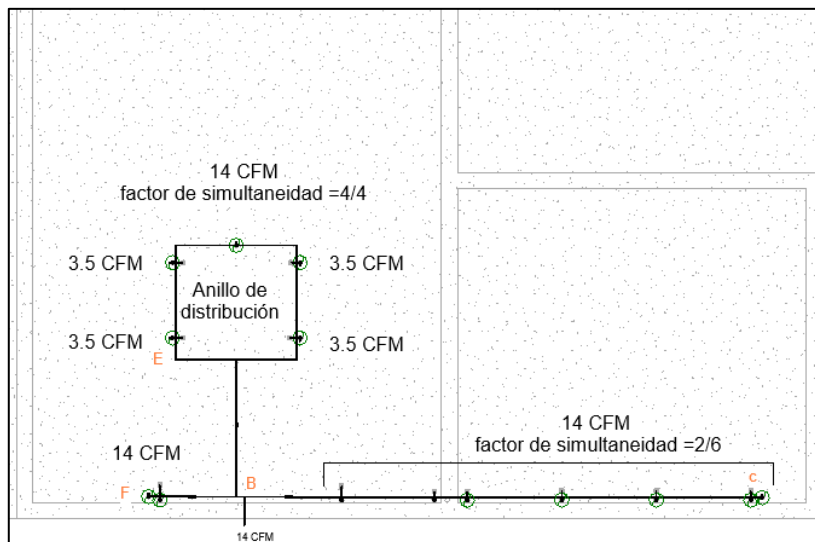




**Figura 3.6** Vista isométrica del diagrama unifilar de la red.

### **Cálculo de consumo de aire en puntos de servicio**

Teniendo en claro todos los accesorios necesarios para la construcción de la red y la dirección en que va a ser instalada la tubería, se estimaron las unidades de consumo y el caudal que va a circular en toda la red de aire comprimido, mediante catálogos de los equipos neumáticos que serán utilizados en cada punto de servicio, tal como se observa en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Consumo de aire en el LTI.

De la ficha técnica del compresor que se encuentra en el Anexo 3 se toma el dato de la capacidad máxima de caudal suministrado, que es de 14 (CFM).

Como se puede ver en la Figura 3.7 se tienen 11 tomas de servicio.

Tomando en cuenta que, en una práctica de laboratorio no se utilizarán la totalidad de tomas, sino que, se podrán utilizar las 4 tomas del anillo ubicado en el tramo B-E de la Figura 3.7, 2 tomas del tramo B-C de la Figura 3.7, o solamente la toma que se encuentra en el tramo B-F de la Figura 3.7, es posible utilizar un factor de simultaneidad como se detalla en la Tabla 3.1.

El factor de simultaneidad es un valor que se estima y toma en cuenta el hecho de que en la red de aire comprimido nunca todas las tomas de servicio estarán funcionando al mismo tiempo y a pleno rendimiento [4].

De manera simple el factor de simultaneidad representa el número de tomas que se usan al mismo tiempo, por ejemplo, si en un circuito existieran únicamente dos tomas y de estas, solamente se está usando una, el factor de simultaneidad será de 1/2. Por esto para calcular el factor de simultaneidad dentro del presente proyecto, se toman en cuenta la totalidad de tomas existentes en cada tramo (B-C, B-E o B-F) que será utilizado durante una práctica de laboratorio, y se estima el número de tomas dentro del tramo que efectivamente estarán siendo usadas por los estudiantes. El cociente entre el número de tomas de servicio utilizadas dentro del tramo, sobre el número total de tomas de servicio correspondientes al tramo, representa el factor de simultaneidad.

**Tabla 3.1** Factor de simultaneidad.

Tramo	# Máximo de tomas en uso	# Total de tomas	Factor de simultaneidad	Factor de simultaneidad simplificado
B-C	2	6	2/6	1/3
B-E	4	4	4/4	1
B-F	1	1	1/1	1

Como ya se mencionó, en una práctica de laboratorio solamente se utilizará un tramo conocido del sistema de distribución de aire comprimido, ya sea este el tramo B-C, el tramo B-E o el tramo B-F.

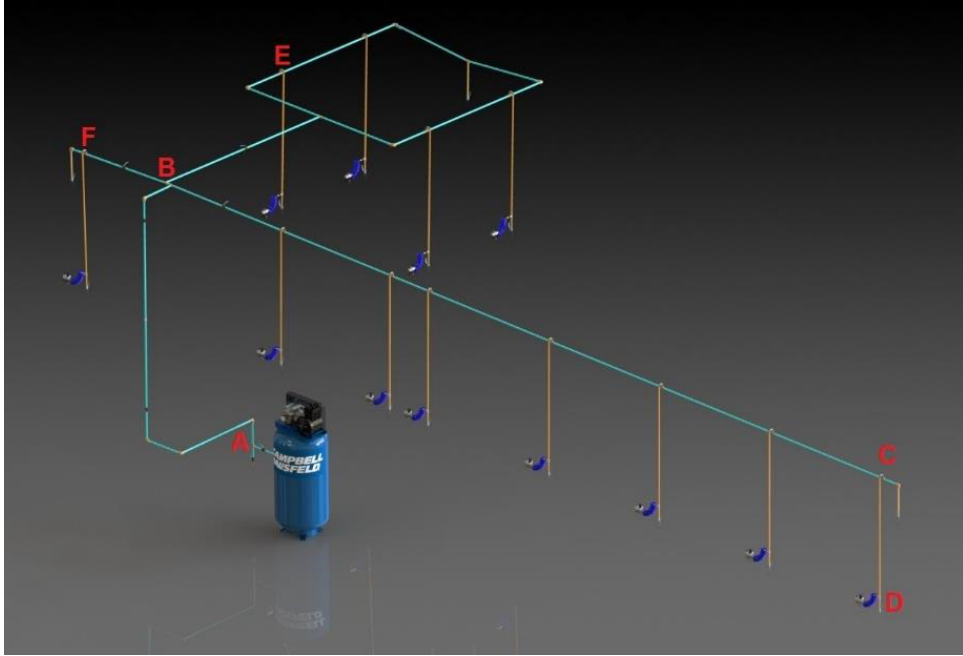
Para conocer cuál será el consumo específico de una toma de servicio dentro de cada tramo, se revisa la Tabla 3.1, por ejemplo, en el tramo B-C se tiene que se utilizarán dos tomas de servicio simultáneamente de las seis disponibles, debido a que este número representa a los dos módulos que trabajarán al mismo tiempo, esto quiere decir que si por el tramo circulan 14 (CFM) que es la capacidad máxima de caudal suministrado por el compresor, 7 (CFM) podrán ser utilizados en una toma y 7 (CFM) en cualquier otra del mismo tramo, únicamente las dos a las vez, a esto se refiere que al tramo se le aplica un factor de simultaneidad de  $2/6$  o simplificada la fracción,  $1/3$ .

Del mismo modo en el tramo B-E, se tienen cuatro tomas de servicio, de las cuales podrán ser utilizadas su totalidad al mismo instante, esto quiere decir que el caudal que entrega el compresor (14 CFM), es dividido equitativamente para las cuatro tomas que conforman el tramo, obteniendo un caudal de 3.5 CFM por toma. De esta manera se representa que el factor de simultaneidad sea de  $4/4$  o simplificando la fracción 1.

### **3.2 Dimensionamiento de las tuberías y selección de accesorios.**

Con el método de diseño de la red de aire comprimido de Atlas Copco se realizó el dimensionamiento de los tramos correspondientes a este proyecto que vendrían a ser las líneas de distribución principales identificadas por los tramos A-B, B-C, B-E y B-F mostrados en la Figura 3.8 y de color azul, mientras que el dimensionamiento de las líneas de servicio, mostradas de color naranja y denotado como el tramo C-D, le corresponde al proyecto complementario denominado “Implementación de un sistema de líneas de servicio de aire comprimido en el laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT-EPN”. Los dos proyectos en conjunto componen el sistema completo de distribución de aire comprimido.

En el Anexo 2 se pueden visualizar los planos y esquemas con más detalle, además de los elementos utilizados dentro del proyecto final y en conjunto con su complementario.

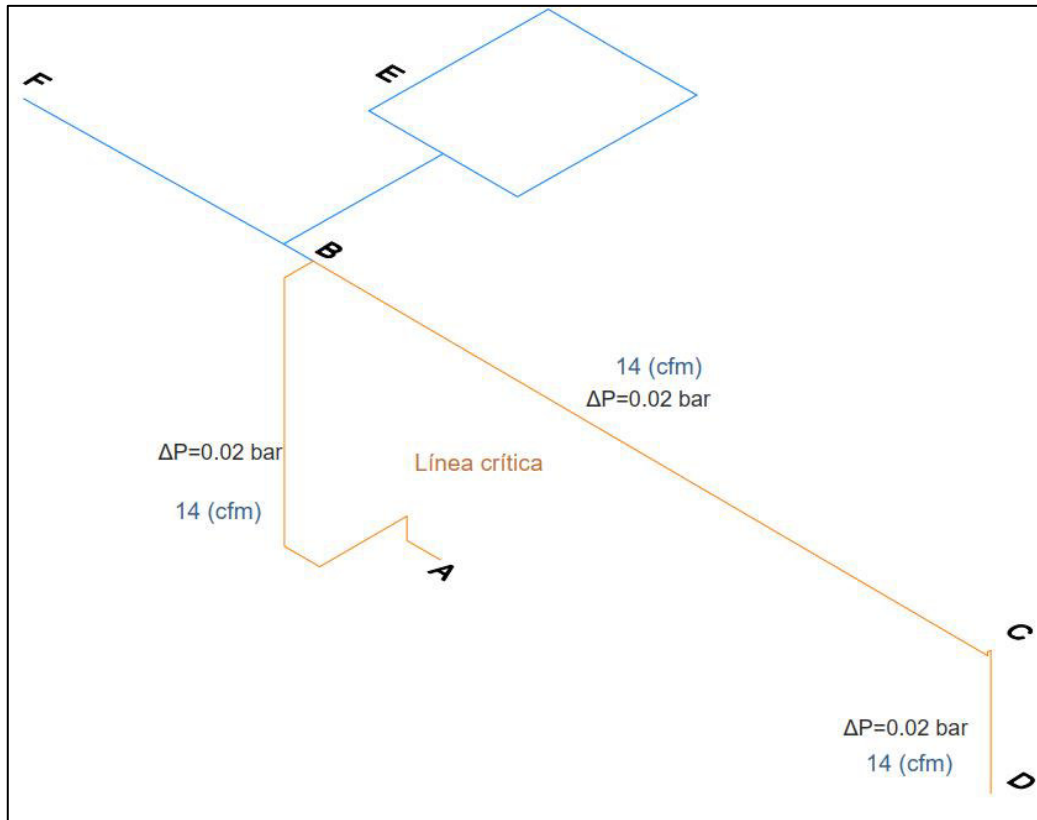


**Figura 3.8** Líneas de distribución principal y líneas de servicio

### **Dimensionamiento del diámetro de las tuberías sin accesorios.**

Una vez obtenido el caudal y la presión necesaria se realiza el dimensionamiento de la red para obtener de esta manera el diámetro de la tubería, se empezó tomando la línea crítica de la red de aire comprimido como se muestra en la Figura 3.9.

La línea crítica en una red de aire comprimido es el trayecto que debe cruzar el fluido generado desde el compresor hasta el punto más lejano de la red. La línea crítica se la determina midiendo la trayectoria de tubería más alejada a la que el compresor debe poder transportar el fluido de trabajo. Se elige esta trayectoria como referencia principal de cálculo, ya que, si el aire comprimido llega a este punto, sin ningún problema llegará a todos los demás puntos de servicio.



**Figura 3.9** Línea crítica del sistema de aire comprimido.

Se determinó que, la línea crítica empieza en el punto A y termina en el punto D (A-D), ya que se obtuvo una medida de 19.73 (m) y este se consideró el punto más lejano como se observa en la Figura 3.9.

La generación de aire comprimido genera pérdidas principalmente por rozamiento dentro de las tuberías debido a los cambios de dirección del fluido por causa de los accesorios instalados, estas pérdidas se convierten en calor produciendo caídas de presión.

Estas caídas de presión son valores que se encuentran en catálogos o a su vez son recomendados por fabricantes de sistemas neumáticos para la construcción de redes de distribución. En este caso en particular y como se ha venido mencionando se han tomado los valores de caída de presión máxima recomendados por el Manual de Aire Comprimido de Atlas Copco [11], en la Tabla 3.2 se pueden observar las caídas de presión recomendadas por este fabricante.

**Tabla 3.2** Caída de presión máxima recomendada

Caída de presión en las tuberías de servicio	0.03 (bar)
Caída de presión en las tuberías de distribución	0.05 (bar)
Caída de presión en tuberías verticales	0.02 (bar)

En este caso se tomó una caída de presión de 0.02 (bar) ya que es un sistema no muy extenso, esto tanto para las líneas de distribución como para las de líneas de servicio.

### **Cálculo del tramo A-B**

Para el cálculo de la tubería del tramo (A-B) tenemos los siguientes datos:

Caudal (Q): 14 (NCFM)

Longitud del tramo A-B (l): 6.8 (m)

Presión absoluta (P): 12.06 (bar)

Caída de presión máxima recomendada por fabricante ( $\Delta P$ ): 0.02 (bar).

Con los datos mencionados se procede a calcular el diámetro del tramo (A-B) sin accesorios utilizando la Ecuación 1.2.

Donde:

$q_c$  : 6.61 (l/s) caudal.

$l$  : 6.8 (m) longitud de la tubería.

$\Delta p$  : 0.02 (bar) caída de presión.

$p$  : 12.06 (bar) presión.

Usando la Ecuación 1.2 se obtiene:

$$d = 13.31 \text{ (mm)}$$












Después de calcular el diámetro del tramo (A-B) de la red de aire comprimido, se continua con el cálculo de cada uno de los tramos que contienen a la línea crítica del sistema. Esto se muestra en la Tabla 3.3, los tramos de la línea crítica se encuentran en la Figura 3.9.

**Tabla 3.3** Diámetro de tuberías sin accesorios

Tramos	Caída de presión (bar)	Caudal (l/s)	Longitud (m)	Diámetro de tubería (mm)
A-B	0.02	6.61	6.8	13.31
B-C	0.02	6.61	10.8	14.6
B-F	0.02	6.61	1.91	10.32
B-E	0.02	6.61	11.86	14.87
C-D	0.02	3.30	2.2	8.21

### **Dimensionamiento de tuberías considerando accesorios**

Para poder construir la red de aire comprimido se utilizarán varios accesorios que serán instalados en conjunto con la tubería, por lo tanto, se debe considerar que cada uno de ellos aportan una pérdida de carga. Esta pérdida de carga por accesorios está considerada en el método de diseño de redes de aire comprimido del Manual de Aire Comprimido de Atlas Copco, el mismo que nos provee de la tabla de longitudes equivalentes para cada accesorio, mostrada en la Figura 3.10 [11].

Longitud equivalente en metros											
Componente	Diámetro interior de la tubería en mm (d)										
	25	40	50	80	100	125	200	250	300	400	
Válvula de bola totalmente abierta 	0,3 5	0,5 8	0,6 10	1,0 16	1,3 20	1,6 25	1,9 30	2,6 40	3,2 50	3,9 60	5,2 80
Válvula de diafragma totalmente abierta 	1,5	2,5	3,0	4,5	6	8	10	-	-	-	-
Válvula angular totalmente abierta 	4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula de globo 	7,5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Válvula antirretorno de clapeta 	2,0	3,2	4,0	6,4	8,0	10	12	16	20	24	32
Codo R = 2d 	0,3	0,5	0,6	1,0	1,2	1,5	1,8	2,4	3,0	3,6	4,8
Codo R = d 	0,4	0,6	0,8	1,3	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4
Ángulo 90° 	1,5	2,4	3,0	4,5	6,0	7,5	9	12	15	18	24
Te, salida en línea 	0,3	0,4	1,0	1,6	2,0	2,5	3	4	5	6	8
Te, salida angular 	1,5	2,4	3,0	4,8	6,0	7,5	9	12	15	18	24
Reductor 	0,5	0,7	1,0	2,0	2,5	3,1	3,6	4,8	6,0	7,2	9,6

**Figura 3.10** Longitud equivalente de accesorios método Atlas Copco.  
Fuente: [10]

A continuación, se detallan los accesorios instalados en cada tramo y sus respectivas longitudes equivalentes tomadas de la Figura 3.10, comenzando por el tramo (A-B) como se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (A-B)

Accesorio (25 mm)	Unidades	Longitud equivalente (m)	Total (m)
Codo	4	0,4	1,6
Te	1	1,5	1,5
Válvula de bola	2	5	10
Válvula antirretorno	1	2	2
Longitud equivalente total ( $l_{eq}$ )			15,1



Una vez que se ha calculado la longitud equivalente ( $l_{eq}$ ) de los accesorios del tramo correspondiente (A-B), se le suma a la longitud inicial ( $l$ ), obteniendo como resultado la longitud total con accesorios ( $l_t$ ), esto utilizando la Ecuación 3.1.

$$l_t = l + l_{eq}$$

### **Ecuación 3.1** Longitud con accesorios

Donde:

- $l_t$  : Longitud total de la tubería.
- $l$  : Longitud inicial de la tubería sin accesorios.
- $l_{eq}$  : Longitud equivalente de accesorios.

Utilizando la Ecuación 3.1 y con el valor de la longitud equivalente mostrada en la Tabla 3.4 se calcula la longitud total del tramo de tubería (A-B).

Donde:

- $l$  : 6.8 (m).
- $l_{eq}$  : 15.1 (m).

$$l_t = 21.9 (m)$$

Ahora, con este nuevo valor de longitud total ( $l_t$ ), se recalcula el diámetro de la tubería con la ayuda de la Ecuación 1.2, obteniendo el valor del diámetro del tramo (A-B) tomando en cuenta la caída de presión por causa de los accesorios necesarios.

Donde:

- $q_c$  : 6.61 (l/s)
- $l_t$  : 21.9 (m)
- $\Delta p$  : 0.02 (bar)
- $p$  : 12.06 (bar)

Usando la Ecuación 1.2 se obtiene:

$$d = 16.82 (mm)$$

Las longitudes equivalentes para los demás tramos de la línea crítica del sistema se las puede encontrar a continuación en la Tabla 3.5, Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8.

**Tabla 3.5** Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (B-C).

Accesorio (25 mm)	Cantidad	Longitud equivalente (m)	Total (m)
Válvula de bola	1	5	5
Te, salida angular	1	1.5	1.5
Te, salida en línea	6	0.3	1.8
Total ( $l_{eq}$ )			8.3

**Tabla 3.6** Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (B-E).

Accesorio (25mm)	Cantidad	Longitud equivalente (m)	Total (m)
Válvula de bola	1	5	5
Te, salida angular	3	1.5	4.5
Te, salida en línea	4	0.3	1.2
Codo	3	0.4	1.2
Total ( $l_{eq}$ )			11.9

**Tabla 3.7** Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (B-F).

Accesorio (25mm)	Cantidad	Longitud equivalente (m)	Total (m)
Válvula de bola	1	5	5
Te, salida angular	2	1.5	3
Te, salida en línea	1	0.3	0.3
Total ( $l_{eq}$ )			8.3

**Tabla 3.8** Longitudes equivalentes de accesorios del tramo (C-D).

Accesorio (25mm)	Cantidad	Longitud equivalente (m)	Total (m)
Te, salida de línea	2	1.5	3
Codo	2	0.4	0.8
Total ( $l_{eq}$ )			3.8

Una vez que se obtienen las longitudes equivalentes de todos los tramos, se puede recalculer el diámetro interno que debe tener cada tubería de la red de aire comprimido con la Ecuación 1.2.

En la Tabla 3.9 se presentan los resultados de los cálculos obtenidos de los diámetros de cada tramo de tubería de la línea crítica incluidas las pérdidas de carga por accesorios.

**Tabla 3.9** Diámetros de tuberías incluidas las pérdidas por accesorios.

Tramo	Longitud total (m)	Diámetro (mm)
A-B	21.9	16.82
B-C	19.10	16.36
B-E	23.76	16.48
B-F	10.21	13.92
C-D	6.00	12.98

### **Tuberías seleccionadas en base de catálogos**

Una vez que se han obtenido los valores de los diámetros de cada tramo de tubería, se debe acudir a un catálogo de tuberías donde se encontrarán los diámetros comerciales que existen en el mercado y así poder elegir el que más se acerque al requerimiento de diseño.

Un catálogo comercial o de fabricante, es un documento impreso o digital donde las empresas muestran la oferta de productos a sus clientes. En este caso, el catálogo de tuberías que se encuentra en el Anexo 3, es un documento donde se encuentran las especificaciones técnicas, entre ellas los diferentes diámetros de tubería de material PVC que oferta en el mercado la empresa Plastigama [19].

En la Tabla 3.10, se presentan los valores de los diámetros internos recalculados, así como el diámetro comercial que más se ajusta al diseño [11].

**Tabla 3.10** Diámetros de tuberías estandarizados.

Tramo	Diámetro interno recalculado (mm)	Diámetro interno estandarizado (mm)	Diámetro interno estandarizado (plg)
A-B	16.82	18.85	3/4
B-C	16.36	18.85	3/4
B-E	16.48	18.85	3/4
B-F	13.92	18.85	3/4
C-D	12.98	13.88	1/2

En la Figura 3.8, se muestra el modelado 3D del proyecto finalizado, donde se puede observar la implementación del sistema de distribución principal de aire comprimido en el Laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT-EPN.

El sistema inicia con el compresor, encargado de transferir la energía necesaria al aire para abastecer las necesidades de los puntos de servicio, mediante tuberías de PVC el aire es transportado a través de la línea vertical hacia las tuberías de distribución y finalmente a los puntos de servicio. En cada punto de servicio se encuentra un equipo FRL (filtro, regulador y lubricador), que será quien controle el caudal necesario en cada toma de trabajo.

En el Anexo 2 se puede observar a más detalle el proyecto finalizado.

### 3.3 Implementación del sistema

#### Conductor eléctrico para instalación de compresor

Para dimensionar el conductor de la instalación eléctrica del compresor, se revisó la ficha técnica del equipo, donde se encuentran sus especificaciones eléctricas. En la Figura 3.11, se observa un extracto de la ficha técnica con los datos necesarios para la selección del calibre del conductor. La ficha técnica completa se la puede encontrar en Anexo 4.

Specifications	
Modelo	HS5180
Tamaño	80 galones
MAX PSI	175
Al aire libre CFM	14 @ 90 PSI 13.7 @ 175 PSI
Bomba	aceite de lubricación
Peso de la unidad	429 lbs
Tensión	208-230 Volt
Fases	1
Amperaje	22A
UPC	045564623074

**Figura 3.11** Especificaciones técnicas del compresor

En la Figura 3.11, se observa que el compresor consume 22 (A), a una tensión de 220 (V), de acuerdo al Capítulo 5.1 Capacidad de corriente de la NEC es recomendable dimensionar tanto conductores como protecciones eléctricas al 125 (%) de su carga continua [15], esto quiere decir que al consumo nominal de circuito se le debe aplicar un 25 (%) de carga como factor de seguridad, dando como resultado 27,5 (A). Con este nuevo valor se busca en la Figura 3.12 la medida del calibre adecuado para el cable de esta instalación.

AMPERAJE - CABLE DE COBRE			
Tipo de aislante	TW	RHW,THW, THWN	THHN,XHHW-2 THWN-2
Nivel de temperatura	60°C	75°C	90°C
Calibre de cobre	Amperaje soportado		
14 AWG	15 A	15 A	15 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A
6 AWG	55 A	65 A	75 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A
3 AWG	85 A	100 A	115 A
2 AWG	95 A	115 A	130 A
1 AWG	110 A	130 A	145 A
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A

**Figura 3.12** Tabla de calibres de cables eléctricos.  
Fuente: [20]

Se ha determinado que el calibre adecuado para esta instalación es el 10 (AWG).

### Protección eléctrica.

Del mismo modo, en que se calculó el calibre del conductor, se obtiene el valor del elemento de protección eléctrica para el compresor. Cabe mencionar que, este elemento cumplirá también la función de interruptor de encendido y apagado del equipo.

Se determinó que el elemento de protección adecuado es un interruptor termomagnético, ya que este protegerá al compresor contra cortocircuitos o sobrecargas.

De igual forma, para determinar el valor nominal del interruptor termomagnético se utiliza la corriente que consume el compresor, en este caso es nuevamente 22 (A), se le aplica un factor de seguridad del 25 (%), recomendado por la NEC, dando como resultado 27,5 (A).

Con este nuevo valor de corriente se busca el interruptor termomagnético que se adapte a la necesidad del proyecto. Con la ayuda de la Figura 3.13 se obtuvo el elemento comercial que ayudará a resguardar el compresor.

La protección seleccionada es un interruptor termomagnético, de dos polos, que soporte un voltaje de 220 (V) y una corriente de 30 (A).

Tabla de selección				
	Interruptor tipo	Modelo	Corriente nominal de servicio	Número de catalogo
	QP 1" 1 polo 120 /240 V CA	Q115	15	Q115
		Q120	20	Q120
		Q130	30	Q130
		Q140	40	Q140
		Q150	50	Q150
		Q160	60	A7B10000005610
	QP 1" 2 polos disparo simultáneo 120/240 V CA	Q215	15	Q215
		Q220	20	Q220
		<b>Q230</b>	<b>30</b>	<b>Q230</b>
		Q240	40	Q240
		Q250	50	Q250
		Q260	60	Q260
		Q270	70	Q270
		Q280	80	Q280
		Q290	90	Q290
		Q2100	100	Q2100
Q2125	125	Q2125		
	QP 1" 3 polos disparo simultáneo 240 V CA	Q315	15	Q315
		Q320	20	Q320
		Q330	30	Q330
		Q340	40	Q340
		Q350	50	Q350
		Q360	60	Q360
		Q370	70	Q370
		Q380	80	Q380
		Q390	90	Q390
		Q3100	100	Q3100

**Figura 3.13** Interruptores termomagnéticos comerciales.

Fuente: [21]

### **Instalación de tuberías y accesorios de línea de distribución.**

Una vez elegido el diámetro comercial de la tubería de distribución, se continuó con la compra del material necesario para proceder con la instalación de la misma y sus respectivos accesorios.

Primero se ubicó el compresor en área destinada para su instalación, luego se fijó el compresor con pernos de anclaje al piso con la ayuda de las herramientas necesarias, como en las Figura 3.14 y Figura 3.15.



**Figura 3.14** Proceso de anclaje del compresor



**Figura 3.15** Compresor fijado al piso

Luego, se empezó a tender la línea de distribución desde el compresor hacia arriba como muestra la Figura 3.16, para ello se midió la tubería para sacar porciones del tamaño requerido siguiendo las medidas establecidas en el Anexo 2, el proceso práctico lo podemos observar en la Figura 3.17. Se realizó este paso ya que la tubería se comercializa únicamente de una longitud de 3 (m).



**Figura 3.16** Construcción de línea de distribución desde compresor



**Figura 3.17** Medición de longitudes necesarias de tubería



Luego, con la ayuda de una sierra, se cortó la tubería de acuerdo con las dimensiones antes medidas, como se muestra en la Figura 3.18.



**Figura 3.18** Corte de tubería de longitud necesaria

Una vez logrado el corte se preparó el extremo libre, realizando el roscado con la ayuda de una tarraja manual, como en la Figura 3.19 y colocando teflón en la rosca terminada, esto se observa en la Figura 3.20, este proceso con el fin de realizar las uniones respectivas a los accesorios necesarios para direccionar la línea principal de distribución alrededor del LTI.



**Figura 3.19** Roscado de tubería



**Figura 3.20** Colocación de teflón en roscas

De esta manera se fueron construyendo los tramos necesarios, para luego poder tender las líneas de distribución principales y sujetarlas al tumbado del LTI con la ayuda de accesorios de soporte de tubería, esto se visualiza en la Figura 3.21.



**Figura 3.21** Sujeción de tuberías al tumbado

Se debe tener en cuenta una inclinación de  $5^\circ$  de la tubería mostrada en las Figura 3.22 y Figura 3.23, esta debe permitir que la formación de condensado pueda ser expulsada fuera de la red a través de las purgas colocadas al final de cada línea de servicio.



**Figura 3.22** Tendido de líneas de distribución principal



**Figura 3.23** Inclinación de tuberías de distribución principal

En cada toma de servicio se instaló un FRL y una purga de condensado como en la Figura 3.24, el primero permite el suministro de aire comprimido de acuerdo a las necesidades del usuario, mientras que la purga ayuda a drenar el condensado formado dentro de las tuberías.



**Figura 3.24** Instalación de FRL y purgas de condensado

También, se instaló un accesorio que permite la conexión de un transductor de presión para prácticas de laboratorio, esto únicamente para las tomas de servicio que se encuentran en el anillo como se visualiza en la Figura 3.25.



**Figura 3.25** Instalación de accesorio para conexión de transductores de presión

Finalmente, en la Figura 3.26 se muestran todas las líneas de distribución principal instaladas de acuerdo con las especificaciones técnicas preestablecidas, al igual que el equipo de trabajo complementario con su instalación respectiva del sistema de líneas de servicio.



**Figura 3.26** Proyecto finalizado

Para mayor detalle en la Figura 3.27, se encuentra un código QR que al escanearlo muestra un video explicativo del paso a paso de la implementación de la red de distribución principal de aire comprimido.



**Figura 3.27** Código QR, video implementación del sistema.

**Enlace del video:** <https://youtu.be/zfWKAygD-YA>

### 3.4 Pruebas del sistema

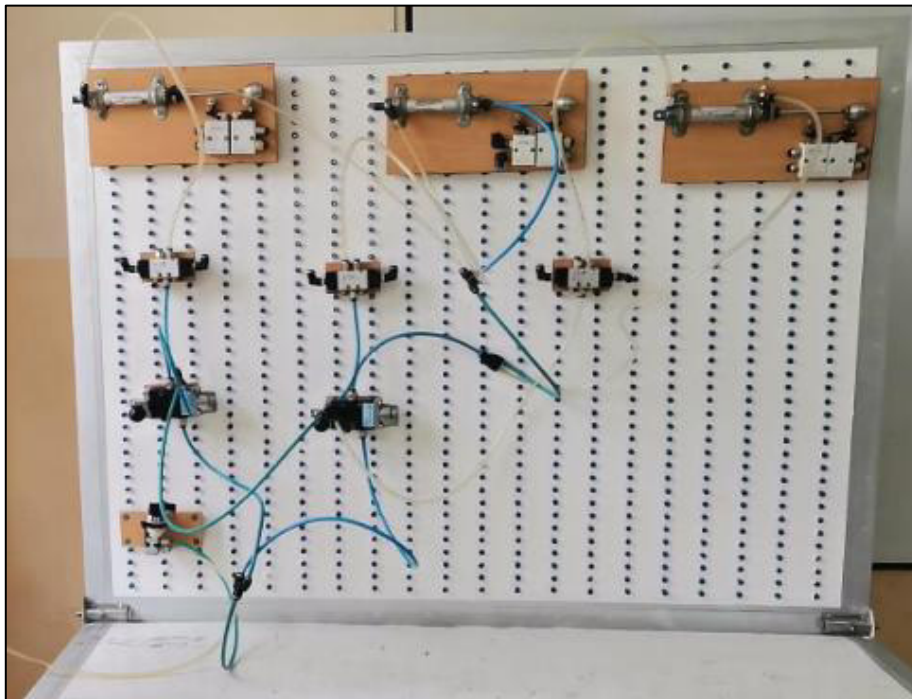
Para comprobar el buen funcionamiento del sistema de distribución de aire comprimido se realizaron las siguientes pruebas:

#### **Prueba de caudal en la red de aire comprimido.**

Los instrumentos y herramientas neumáticas son las que están en contacto directo con el aire comprimido del sistema de distribución, por lo tanto, se requiere que cada punto de servicio sea provisto del caudal necesario para su correcto funcionamiento.

Para esta prueba fue necesario armar un circuito con varios elementos neumáticos, entre ellos elementos de control, así como actuadores, con el cual se fue conectando a cada línea de servicio el circuito armado y probando que el sistema lo abastezca de aire comprimido.

El circuito para esta prueba se observa en la Figura 3.28, este está conformado por 3 cilindros neumáticos de doble efecto, 3 válvulas 5/2, 1 válvula de paso y 2 interruptores neumáticos.



**Figura 3.28** Circuito neumático utilizado para las pruebas

El sistema pasó satisfactoriamente esta prueba ya que en cada punto de servicio se comprobó el funcionamiento del circuito

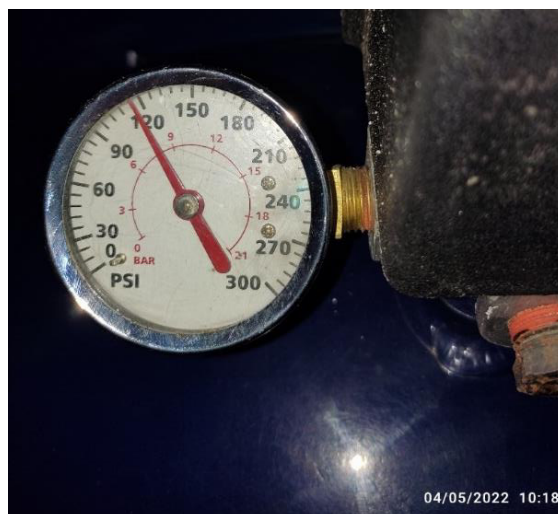
### **Prueba de fugas en la red de aire comprimido.**

Es importante realizar esta prueba ya que el aire comprimido se desperdicia por medio de fugas en el sistema antes que llegue a cada punto de servicio. Detectar y corregir estas fugas ayudará a ahorrar energía a lo largo del año, ya que los periodos de encendido y apagado del compresor se reducen.

Esta prueba consiste en determinar si existen fugas a lo largo de la red de aire comprimido, mediante la pérdida de carga medida desde el manómetro del compresor.

La prueba de fugas se realizó de la siguiente manera:

- En primer lugar se verificó que no existan fugas a través de la válvula de drenaje de condensado, para ello se cerró la válvula ubicada a la salida del tanque de almacenamiento.
- Después se encendió el compresor y se esperó a que el tanque acumule aire comprimido hasta su presión máxima de seguridad preestablecida con el presóstato a 114 (psig), esto se puede constatar a través del manómetro ubicado en la unidad de almacenamiento como se observa en la Figura 3.29.
- Luego de 30 minutos se revisa el manómetro de la Figura 3.30 y se observa que la presión se mantiene a 114 (psig), esto indica que no existen fugas en el tanque de almacenamiento.



**Figura 3.29** Presión inicial del tanque de almacenamiento



**Figura 3.30** Presión del tanque de almacenamiento después de 30 minutos.

- En seguida, se abren todas las válvulas principales de la red, de esta manera el aire comprimido almacenado en el tanque llega a cada punto de servicio instalado en el sistema y por esta razón la presión disminuye en una división de escala hasta 108 (psig).
- Luego se verifica esta presión de la misma forma en el manómetro del tanque, véase la Figura 3.31.
- De igual manera se espera 30 minutos y se vuelve a tomar el valor de la presión en el manómetro del tanque, se observa en la Figura 3.32 que existe una disminución de presión, sin embargo, no es significativa por lo que se da por aprobada esta prueba.



**Figura 3.31** Lectura inicial una vez presurizado el sistema





**Figura 3.32** Lectura después de 30 minutos de presurizar el sistema

### **Verificación de la caída de presión.**

Todo componente y elemento neumático necesita ser suministrado por la fuerza de aire comprimido necesaria para llevar a cabo su correcto funcionamiento, para ello es importante realizar la prueba de presión desde el punto generador de la presión del sistema hasta el punto crítico del mismo.

Para comprobar que no existen caídas de presión a lo largo del sistema, se mide esta magnitud con la ayuda de dos manómetros colocados en el punto inicial y final de la línea crítica en el mismo instante de tiempo.

Esto se lo puede verificar en la Figura 3.33 y Figura 3.34, donde se observa que tanto la presión en el compresor como en el punto más lejano o crítico es la misma, 8 (bar).

Para asegurarnos de que las imágenes fueron capturadas al mismo instante, estas están marcadas con la fecha y hora de captura.

Al obtener la misma presión en las dos ubicaciones, se considera que el sistema ha pasado la prueba.



**Figura 3.33** Manómetro en el compresor.



**Figura 3.34** Manómetro en la parte crítica de la red.

### **Prueba de caída de voltaje en la alimentación eléctrica.**

Consiste en determinar si existe una pérdida de voltaje desde el punto de suministro de energía eléctrica hasta llegar al punto donde se conecta la carga, este efecto se debe a la resistividad propia del conductor.

Para realizar esta prueba el circuito debe permanecer a plena carga (compresor encendido), luego con la ayuda de un multímetro se mide el voltaje tanto al inicio como al final del circuito.

En la Figura 3.35 y Figura 3.36, se muestra la lectura del multímetro en los 2 puntos de la prueba de voltaje.



**Figura 3.35** Voltaje medido en el tablero de distribución.



**Figura 3.36** Voltaje medido en el compresor.

Con los valores medidos de la Figura 3.35 y Figura 3.36 y con la ayuda de la Ecuación 1.4 y Ecuación 1.5 se determina que la caída de voltaje es del 1.4 (%).

Con este resultado se puede dar por hecho que la instalación eléctrica del sistema cumple con lo establecido en el Capítulo 5 Calibre de conductores de la NEC y por lo tanto pasa la prueba.

En la Figura 3.37, se encuentra un código QR que al escanearlo muestra un video explicativo de todas las pruebas realizadas para verificar que el sistema de distribución de aire comprimido esté funcionando adecuadamente.



**Figura 3.37** Código, video pruebas del sistema y funcionamiento.

**Enlace del video:** <https://youtu.be/yhPtcsIJepY>

### 3.5 Manual de uso y mantenimiento

Para que el sistema de distribución de aire comprimido implementado funcione correctamente se ha redactado un manual en donde se detallan los pasos a seguir para utilizar el sistema de manera segura para el usuario, así como también se detallan las acciones que deben ser ejecutadas periódicamente para realizar el mantenimiento preventivo del sistema y de esta manera mantener la integridad del mismo a lo largo del tiempo. Este manual se lo puede revisar en el Anexo 5.

En la Figura 3.38, se encuentra un código QR que al escanearlo muestra un video explicativo del manual de uso y mantenimiento del sistema de distribución principal de aire comprimido.



**Figura 3.38** Código QR, video de manual de uso y mantenimiento.

**Enlace del video:** [https://youtu.be/QaoKitKr\\_ZM](https://youtu.be/QaoKitKr_ZM)

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El sistema de distribución de aire comprimido implementado en el LTI permitirá mejorar la experiencia de las prácticas tanto del laboratorio de control industrial como del laboratorio de neumática, esto gracias a que la capacidad del compresor es suficiente para utilizar varias tomas de aire comprimido simultáneamente.
- El método de dimensionado de la red de aire comprimido de Atlas Copco fue el adecuado para este proyecto, ya que garantiza que la caída de presión en las tuberías entre el compresor y el punto de consumo más lejano no sobrepase de 0,1 (bar). Estas caídas de presión son causadas por el rozamiento en las tuberías y cambios de dirección del fluido debido a los accesorios instalados que luego son tomados en cuenta para corregir el cálculo del diámetro final de diseño.
- El diámetro de diseño de las tuberías de distribución y de servicio son 3/4" y 1/2", respectivamente. El caudal que pasa a través de estas tuberías depende del factor de utilización en cada tramo. En el tramo B-C el caudal de cada toma es de 7(CFM) utilizando como máximo 2 tomas, en el tramo B-E el caudal es de 3.5 (CFM) utilizando el total de sus 4 tomas, y en el tramo B-F se tienen los 14 (CFM) ya que solo cuenta con 1 toma.
- Las tuberías de distribución deben tener la inclinación recomendada de 5°, adecuada para que el condensado acumulado dentro de la red fluya hacia las purgas colocadas al final de cada tramo, así como también al final de cada toma de servicio. Esta inclinación en las tuberías se logró con la ayuda de soportes regulables anclados al tumbado del LTI.
- El diseño asistido por computadora fue una herramienta muy útil dentro del desarrollo del proyecto, permitiendo realizar el diagrama unifilar en primera instancia para realizar los cálculos de diseño del sistema. Luego ayudó a modelar en 3D el proyecto con todos los detalles y accesorios. Finalmente, se obtuvieron los planos de construcción. Gracias a esto se optimizaron los recursos materiales y el tiempo de implementación.
- La prueba de caída de presión desde el compresor hasta el punto de consumo más lejano muestra que esta se mantiene en 8 (bar). La prueba de fugas muestra que de igual forma la presión en el sistema permanece en 8 (bar) luego de 1

hora de mantener las válvulas principales abiertas. Estos resultados dieron a conocer que el sistema se encuentra en óptimas condiciones tanto físicas como operativas, y cumplirá con los requerimientos técnicos preestablecidos en el desarrollo del proyecto.

- Para realizar la instalación eléctrica del compresor se siguieron los lineamientos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) garantizando que la instalación sea segura para el operador como para el mantenimiento de la maquinaria.
- A través de las pruebas eléctricas realizadas en el sistema se observó una caída máxima de voltaje en la alimentación eléctrica de 1.4%. Ante esto se comprobó que la caída de voltaje está dentro del límite máximo 3% establecido por la NEC para así mantener la integridad del compresor durante un largo período de tiempo.

## **4.2 Recomendaciones**

- Al momento de la implementación se debe asegurar que las uniones entre tuberías y accesorios sean lo más herméticas posible, ya que la causa principal de pérdida de carga en el sistema son las fugas a través de uniones mal logradas.
- Se recomienda seguir los pasos de uso adecuado detallados en el manual, así como la ejecución de las acciones preventivas detalladas en el manual de mantenimiento, incluidas las pruebas de funcionamiento, a fin de detectar cualquier problema a tiempo y no sufrir costosos daños.
- Es de mucha importancia seguir los pasos detallados en el manual de mantenimiento de la instalación del sistema de distribución de aire comprimido, ya que en este se detallan las actividades a realizar, así como la frecuencia de dichos mantenimientos, de esta manera se asegura la extensión de la vida útil de los elementos del sistema.
- Si en algún momento se debe cambiar el elemento de protección eléctrica del circuito del compresor, lo ideal será hacerlo por un elemento de las mismas especificaciones técnicas, para así mantener la integridad de la maquinaria.
- Se debe drenar el condensado formado tanto dentro del tanque de almacenamiento del compresor, así como el condensado formado dentro de las tuberías de distribución y servicio, esto utilizando las válvulas respectivas instaladas en cada purga. Esta labor se la debe llevar a cabo una vez se haya

finalizado su uso en cada práctica, además estos tiempos se establecen dentro del manual de mantenimiento.

- Se debe revisar el nivel de aceite del compresor cada 30 días, este debe mantenerse en el nivel medio marcado por un punto rojo en el visor de aceite, esto para mantener lubricados los elementos mecánicos y contar con un correcto funcionamiento del motor del compresor.
- El sistema implementado considera posibles ampliaciones acorde a las necesidades que se presenten en el futuro dentro del laboratorio, por tal razón al final de cada tramo se tienen accesorios que fácilmente permiten la expansión del sistema. Se recomienda hacer uso de las mismas en caso de ser necesario.
- Cualquier expansión del sistema que se desee realizar debe considerar mantener las dimensiones de los diámetros tanto de las tuberías de distribución, así como de las tuberías de servicio, ya que así se garantiza mantener las caídas de presión al nivel máximo recomendado.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. C. Solé, *Neumática e Hidráulica*, Marcombo. 2010.
- [2] C. Bravo Castañeda, *Pedagogía General*, 1ra edicio. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias de la Educación, 2013.
- [3] C. A. Yunes and M. A. Boles, *Termodinámica*, 7ma ed. México: McGraw-Hill, 2012.
- [4] S. Hesse, *Aire Comprimido, Fuente de Energía Preparación y Distribución*. Co., Festo Didactic GmbH &, 2002.
- [5] D. M. Cruz and F. X. Osorio, "Simulación de una red de aire comprimido con dos tomas para el Laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT-EPN," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020.
- [6] A. Moreno, *Introducción a la neumática*, 1era ed. Buenos Aires: Micro, 2015.
- [7] C. Hausfeld, "Campbell Hausfeld," 2021. <https://bit.ly/3nRilB7>.
- [8] S. S. Rao, *Vibraciones Mecánicas*, 5ta ed. Estado de México: Pearson Educación, 2012.
- [9] G. White, *Introducción al análisis de vibraciones*, 1era ed. Woburn: Azima DLI, 2010.
- [10] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos Fundamentos y Aplicaciones*, 4ta ed. México: McGraw-Hill, 2018.
- [11] A. Copco, *Manual de aire comprimido*, 8va ed. Boomsesteenweg: Atlas Copco Airpower NV, 2015.
- [12] P. Hannifin, *Tecnología Neumática Industrial*, 1ra ed. Jacareí: Parker Hannifin Corporation, 2003.
- [13] F. Ebel, S. Idler, G. Prede, and D. Scholz, *Neumática Electroneumática Fundamentos*. Denkdorf: Co., Festo Didactic GmbH &, 2010.
- [14] G. J. Botero, *Manual de Instalaciones Eléctricas*, 1ra ed. Armenia: RETIE, 2019.
- [15] A. D. S. Unamuno, *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. 2018.



- [16] C. SolidWorks, "Dessault Systemes SolidWorks Corporation," 2022. <https://www.solidworks.com/es> (accessed Jan. 22, 2022).
- [17] R. L. Mott and J. A. Untener, *Mecánica de Fluidos*, 7ma ed. México: Pearson, 2015.
- [18] A. Copco, "Normas y reglamentos aplicables a la industria de los compresores," 2011. <https://bit.ly/3m9i5Lu>.
- [19] Plastigama, "Presión PVC Roscable," p. 2, 2019.
- [20] Construyendo.co, "Cables eléctricos," *construyendo.co* .
- [21] N. T. B. SURVEILANS RABIES DI PROVINSI BALI, B. VETERINER, and I. K. H. D. K. M. VE, "Catálogo de material eléctrico para la construcción," 2014.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1: CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO**

**ANEXO 2: PLANOS Y ESQUEMAS**

**ANEXO 3: FICHA TÉCNICA DEL COMPRESOR**

**ANEXO 4: CATÁLOGO DE TUBERÍAS**

**ANEXO 5: MANUAL DE USO Y MANTENIMIENTO**