



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Diseño e Implementación de una Red de Aire Comprimido para el Laboratorio de  
Hidráulica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Sede  
Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara**

Peralvo Haro, Christian Andrés y Valencia Chicaiza, Diego Armando

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico

Ing. Sánchez Ocaña, Wilson Edmundo

8 de febrero del 2023

Latacunga.

## Document Information

Analyzed document	TESIS Peralvo - Valencia.docx (D158072695)
Submitted	2/7/2023 6:25:00 PM
Submitted by	Juan Carlos Altamirano
Submitter email	jc.altamiranoc@uta.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	jc.altamiranoc.uta@analysis.arkund.com



## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO / submission.pdf</b> Document submission.pdf (D89789797) Submitted by: gladys.rocy@gmail.com Receiver: deadv.pved.12.uta@analysis.arkund.com		4
<b>SA</b>	<b>UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO / submission.pdf</b> Document submission.pdf (D89781325) Submitted by: agarcesc7@gmail.com Receiver: deadv.pved.12.uta@analysis.arkund.com		6
<b>SA</b>	<b>Red neumática.pdf</b> Document Red neumática.pdf (D10709413)		1
<b>SA</b>	<b>TESIS DANNY PINCAY FINAL.pdf</b> Document TESIS DANNY PINCAY FINAL.pdf (D48238143)		3
<b>SA</b>	<b>introducción a la neumática.docx</b> Document introducción a la neumática.docx (D13990192)		1
<b>SA</b>	<b>Red neumática.pdf</b> Document Red neumática.pdf (D11624593)		4
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.docsity.com/es/foro-senati/7834285/">https://www.docsity.com/es/foro-senati/7834285/</a> Fetched: 1/28/2023 5:57:20 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.slideshare.net/gadaywen/manual-festo-43213884">https://www.slideshare.net/gadaywen/manual-festo-43213884</a> Fetched: 9/28/2019 6:27:57 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://b2b.aignep.com/esl/content/download/181247/21537905/file/INFINITY.pdf">https://b2b.aignep.com/esl/content/download/181247/21537905/file/INFINITY.pdf</a> Fetched: 2/7/2023 6:26:00 PM		2
<b>SA</b>	<b>TOLEDO, CRISTIAN.pdf</b> Document TOLEDO, CRISTIAN.pdf (D111730723)		1



**Departamento de Eléctrica y Electrónica**

**Carrera Ingeniería Electromecánica**

**Certificación**

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Diseño e implementación de una red de aire comprimido para el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara."** fue realizado por los señores **Peralvo Haro, Christian Andrés y Valencia Chicaiza, Diego Armando**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodologías establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de solicitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Latacunga, 8 de febrero del 2023**

Firma:



.....  
**Ing. Sánchez Ocaña, Wilson Edmundo**

C.C: 0501529937



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera Ingeniería Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Peralvo Haro, Christian Andrés**, con cédula de ciudadanía n° **1850127901** y **Valencia Chicaiza, Diego Armando**, con cédula de ciudadanía n° **0503838039**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: *Diseño e Implementación de una Red de Aire Comprimido para el Laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara*. Es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodologías establecidos por la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciado las citas bibliográficas.

Latacunga, 8 de febrero del 2023

Firma:

Peralvo Haro, Christian Andrés

C.C: 1850127901

Valencia Chicaiza, Diego Armando

C.C.: 0583838039



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera Ingeniería Electromecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Peralvo Haro, Christian Andrés**, con cédula de ciudadanía n° **1850127901** y **Valencia Chicaiza, Diego Armando**, con cédula de ciudadanía n° **0503838039**, autorizamos a la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: *Diseño e Implementación de una Red de Aire Comprimido para el Laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara*. En el Repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 8 de febrero del 2023

Firma:

Peralvo Haro, Christian Andrés

C.C.: 1850127901

Valencia Chicaiza, Diego Armando

C.C.: 0583838039

## **Dedicatoria**

El presente proyecto de investigación se lo dedico primeramente a Dios todopoderoso, por siempre acompañarme y darme las fuerzas cada día para cumplir mis metas con perseverancia y sabiduría.

A mis queridos padres Segundo Joel Peralvo Haro y Lourdes Mercedes Haro Haro por ser quienes con su inmenso amor, esfuerzo y dedicación hacia mi persona me han permitido alcanzar esta meta tan importante para mí, inculcando siempre principios y valores de bien. Gracias a su apoyo incondicional y sus consejos que me convirtieron en un hombre de bien y me ayudaron a convertirme en profesional.

A mi hermano Justin quien me motiva junto a mis padres a convertirme en un ejemplo digno de su admiración y respeto.

A mi abuela María Evangelina Haro quien a pesar de su partida siempre me cuida en cada paso que doy y fue un pilar fundamental en mi vida, gracias a ella por cuidarme y brindarme todo su amor. Finalmente, el presente proyecto se los dedico a todas aquellas personas y demás familiares que me han brindado su apoyo y confianza en todos estos años.

***Christian Andrés***

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de integración curricular se lo dedico esencialmente a nuestro padre celestial Dios, que me ha guiado en cada uno de mis pasos manteniéndome firme siempre.

A mis extraordinarios padres Valencia Toapanta Luis Medardo y Chicaiza Chazi Laura Inés que a pesar de las adversidades que se me han atravesado durante mi vida estudiantil, siempre han estado apoyándome incondicionalmente, lo que me ha permitido llegar a ser una persona de bien con buenos valores y principios, que me servirán de guía para afrontar la vida profesional y cotidiana.

A mi bella hija Camilita Valencia que fue la motivación principal para culminar esta meta, también acotar que es ella quien me da las fuerzas para levantarme día a día para cumplir mis metas, porque es mi inspiración primordial para salir adelante.

A mi querida novia Stefania Quintana que me dio una hermosa hija, que a pesar de todos los inconvenientes que hemos tenido a lo largo de nuestra relación, siempre ha estado ahí apoyándome, siendo un pilar fundamental en mi vida estudiantil.

A mis hermanos David y Marcia que siempre han aceptado todas las decisiones que he tomado, aportando siempre consejos positivos.

**Diego Armando**

## **Agradecimiento**

Al señor Dios todopoderoso, la virgen María Santísima y Cristo rey por ayudarme y permitirme realizarme como profesional con ayuda de su bendición divina.

A mis queridos padres y toda mi familia que me han apoyado en este arduo camino, por su esfuerzo, sacrificio y confianza que han depositado en mí para verme realizado culminando esta meta.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, a la Carrera de Ingeniería en Electromecánica, y a los docentes que fueron parte de mi formación como profesional.

Al Ing. Wilson Sanchez por haber compartido su conocimiento como director del proyecto y su apoyo incondicional para lograr la culminación del mismo.

A todos mis compañeros y amigos por haber formado parte de esta experiencia como estudiante universitario.

***Christian Andrés***

## **Agradecimiento**

A nuestro padre celestial que siempre me ha guiado por el camino del bien y cuidarme siempre incondicionalmente, tanto en mi vida cotidiana como estudiantil.

Agradecer de todo corazón a toda mi valiosa familia que siempre ha estado aportando en mi formación directa o indirectamente de varias formas.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Carrera de Electromecánica y a todos los docentes que estuvieron inmersos en mi formación profesional.

A mi director de tesis Ing. Wilson Sánchez, que me guió incondicionalmente en el camino del proyecto de titulación, logrando llegar al objetivo planteado.

A todos mis compañeros agradecerles por haber compartido sus conocimientos en el aula de clases.

***Diego Armando***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de Verificación de Contenido .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido .....	10
Índice de figuras .....	16
Índice de tablas .....	18
Índice de ecuaciones.....	20
Resumen .....	21
Abstract.....	22
Capítulo I: Marco metodológico de la investigación .....	23
Antecedentes investigativos .....	23
Planteamiento del problema.....	24
Descripción resumida de proyecto .....	25
Justificación e importancia .....	26
Alcance .....	27
Objetivos.....	28
<i>Objetivo General</i> .....	28
<i>Objetivos Específicos</i> .....	28
Metas del proyecto .....	29

Hipótesis .....	30
VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN .....	30
<i>Variables Independientes</i> .....	30
<i>Variables Dependientes</i> .....	31
Metodología de desarrollo del proyecto .....	31
<i>Método descriptivo</i> .....	31
<i>Método analítico</i> .....	31
<i>Método experimental</i> .....	32
<i>Método documental-bibliográfico</i> .....	32
Capítulo II: Marco Teórico.....	33
Evolución histórica del aire comprimido .....	33
Ventajas y desventajas del aire comprimido.....	34
Variables físicas.....	36
<i>Presión</i> .....	36
<i>Compresibilidad</i> .....	37
<i>Caudal</i> .....	38
<i>Flujo</i> .....	39
<i>Humedad del aire</i> .....	40
<i>Punto de condensación</i> .....	40
Producción del aire comprimido.....	41
<i>Principio de funcionamiento del compresor</i> .....	41
<i>Tipos de compresores</i> .....	42
Compresores de desplazamiento positivo .....	42
<i>Compresor de Pistón</i> .....	43
<i>Compresor de tornillo</i> .....	43
Compresores dinámicos.....	44

<b>Tratamiento y componentes del aire comprimido.....</b>	<b>45</b>
<i>Generalidades .....</i>	<b>45</b>
<i>Calidad del aire comprimido .....</i>	<b>46</b>
<i>Filtración .....</i>	<b>48</b>
Principio de Funcionamiento del Filtro.....	<b>48</b>
Clasificación de los filtros .....	<b>49</b>
Selección de los filtros.....	<b>50</b>
<i>Regulación de presión .....</i>	<b>51</b>
Principio de Funcionamiento del Regulador.....	<b>52</b>
Clasificación de los Reguladores .....	<b>53</b>
<i>Lubricación.....</i>	<b>53</b>
Principio de Funcionamiento del lubricador.....	<b>54</b>
Clasificación de los lubricadores .....	<b>55</b>
<i>Secado .....</i>	<b>56</b>
Principio de Funcionamiento del Secador .....	<b>56</b>
Clasificación de los Secadores.....	<b>56</b>
<i>Secadores refrigerativos.....</i>	<b>57</b>
<i>Secadores desecantes .....</i>	<b>58</b>
<i>Secadores de membrana .....</i>	<b>59</b>
Criterios para la implementación de secadores en instalaciones....	<b>59</b>
<b>Distribución del aire comprimido .....</b>	<b>60</b>
<i>Tipos de circuitos .....</i>	<b>61</b>
Red en circuito abierto.....	<b>61</b>
Red en circuito cerrado.....	<b>61</b>
<i>Tubería de circuito principal .....</i>	<b>62</b>
Inclinación de la red .....	<b>62</b>

<i>Bajantes o circuito secundario</i> .....	62
Curvatura .....	63
Actuadores Neumáticos.....	63
<i>Actuadores lineales</i> .....	63
<i>Actuadores de movimiento rotativo</i> .....	64
Dimensionamiento de la red.....	64
<i>Presión de funcionamiento</i> .....	64
<i>Caídas de presión en la red</i> .....	65
<i>Caudal de consumo de la instalación</i> .....	65
<i>Longitud de la red</i> .....	68
<i>Diámetro para la tubería</i> .....	70
<i>Materiales para tubería de aire comprimido</i> .....	71
Capítulo III: Diseño de la red de aire comprimido .....	73
Ubicación .....	73
Determinación de la Calidad del aire para la instalación.....	74
Presión de la Red.....	74
Cálculo del caudal de consumo de aire comprimido de la instalación .....	75
Trazado de la red .....	79
Longitud de la tubería .....	79
Diámetro de tubería .....	81
Material de la tubería .....	82
Unidades de mantenimiento.....	83
Análisis de selección de secador .....	84
Selección de accesorios .....	86
Selección del compresor .....	88
Capítulo IV: Recomendaciones de Operación y Mantenimiento .....	90

<b>Mantenimiento de la red de aire comprimido.....</b>	<b>90</b>
<i>Situación actual de la red de aire comprimido .....</i>	<i>90</i>
<i>Ubicación y funcionamiento del Compresor.....</i>	<i>90</i>
<i>Encargados del mantenimiento de la red de aire comprimido .....</i>	<i>90</i>
<i>Codificación de elementos de la red de aire comprimido .....</i>	<i>91</i>
<i>Orden de trabajo de mantenimiento.....</i>	<i>92</i>
<i>Plan de mantenimiento .....</i>	<i>92</i>
<b>Recomendaciones de operación .....</b>	<b>93</b>
<i>Equipos .....</i>	<i>93</i>
<b>Compresor .....</b>	<b>93</b>
<b>Purgado de condensados.....</b>	<b>93</b>
<b>Válvulas esféricas.....</b>	<b>93</b>
<b>Unidades de mantenimiento FRL .....</b>	<b>93</b>
<b>Red de tuberías .....</b>	<b>94</b>
<i>Pasos para la operación de la red de aire comprimido .....</i>	<i>94</i>
<b>Capítulo V: Análisis de Resultados .....</b>	<b>95</b>
<b>Pruebas de funcionamiento del compresor .....</b>	<b>95</b>
<i>Tiempo de carga en vacío del compresor .....</i>	<i>95</i>
<i>Tiempo de carga de aire en la red de aire comprimido.....</i>	<i>96</i>
<i>Tiempo de descarga a plena carga en funcionamiento .....</i>	<i>96</i>
<i>Tiempo de descarga de funcionamiento real.....</i>	<i>96</i>
<b>Pruebas de Caída de presión .....</b>	<b>98</b>
<i>Prueba de caída de presión en vacío .....</i>	<i>98</i>
<i>Simulación de caídas de presión en vacío .....</i>	<i>99</i>
<i>Prueba de caída de presión en funcionamiento .....</i>	<i>101</i>
<i>Simulación de caídas de presión en funcionamiento .....</i>	<i>102</i>

<b>Prueba de condensados .....</b>	<b>105</b>
<b>Prueba de sonido.....</b>	<b>107</b>
<b>Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>114</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>114</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>116</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>117</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>122</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	<i>Árbol de planteamiento del problema</i> .....	24
<b>Figura 2</b>	<i>Compresión del aire</i> .....	38
<b>Figura 3</b>	<i>Flujo de aire comprimido</i> .....	40
<b>Figura 4</b>	<i>Compresión por pistón</i> .....	43
<b>Figura 5</b>	<i>Compresor de tornillo</i> .....	44
<b>Figura 6</b>	<i>Componentes del aire comprimido</i> .....	46
<b>Figura 7</b>	<i>Características del aire según su aplicación</i> .....	48
<b>Figura 8</b>	<i>Combinaciones de filtros según su aplicación</i> .....	50
<b>Figura 9</b>	<i>Regulación de presión</i> .....	53
<b>Figura 10</b>	<i>Clasificación de los reguladores de presión.</i> .....	53
<b>Figura 11</b>	<i>Funcionamiento del lubricador</i> .....	54
<b>Figura 12</b>	<i>Partes del lubricador</i> .....	55
<b>Figura 13</b>	<i>Secadores refrigerativos</i> .....	57
<b>Figura 14</b>	<i>Secadores desecantes</i> .....	58
<b>Figura 15</b>	<i>Secador de membrana</i> .....	59
<b>Figura 16</b>	<i>Nomograma para selección de un secador</i> .....	60
<b>Figura 17</b>	<i>Nomograma de longitudes equivalentes para accesorios</i> .....	69
<b>Figura 18</b>	<i>Nomograma para determinar tuberías de aire comprimido</i> .....	70
<b>Figura 19</b>	<i>Ubicación del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica</i> .....	73
<b>Figura 20</b>	<i>Diseño 3D del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica</i> .....	80
<b>Figura 21</b>	<i>Sistema de sujeción para accesorios de aire comprimido</i> .....	87
<b>Figura 22</b>	<i>Racor T para bajante</i> .....	88
<b>Figura 23</b>	<i>Presión de funcionamiento de la red de aire comprimido</i> .....	95
<b>Figura 24</b>	<i>Simulación prueba en vacío</i> .....	100
<b>Figura 25</b>	<i>Simulación prueba en funcionamiento</i> .....	103

<b>Figura 26</b> <i>Evacuación de condensados</i> .....	105
<b>Figura 27</b> <i>Volumen de condensados del compresor</i> .....	106
<b>Figura 28</b> <i>Purgado de la red de aire comprimido</i> .....	106
<b>Figura 29</b> <i>Sonómetro</i> .....	107
<b>Figura 30</b> <i>Intensidad de sonido en [dB]</i> .....	108
<b>Figura 31</b> <i>Zona 1</i> .....	109
<b>Figura 32</b> <i>Zona 2</i> .....	109
<b>Figura 33</b> <i>Zona 3</i> .....	110
<b>Figura 34</b> <i>Zona 4</i> .....	111
<b>Figura 35</b> <i>Zona 5</i> .....	111
<b>Figura 36</b> <i>Pasillo</i> .....	112
<b>Figura 37</b> <i>Zona exterior</i> .....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Variables Independientes</i> .....	30
<b>Tabla 2</b>	<i>Variables Dependientes</i> .....	31
<b>Tabla 3</b>	<i>Ventajas y desventajas del aire comprimido</i> .....	35
<b>Tabla 4</b>	<i>Equivalencias de unidades de medida de presión</i> .....	37
<b>Tabla 5</b>	<i>Clasificación del aire según la norma ISO 8573</i> .....	47
<b>Tabla 6</b>	<i>Aplicaciones para selección de filtros</i> .....	51
<b>Tabla 7</b>	<i>Coefficientes de simultaneidad según cantidad de equipos</i> .....	67
<b>Tabla 8</b>	<i>Características técnicas para tubos de aire comprimido</i> .....	72
<b>Tabla 9</b>	<i>Calidad de aire comprimido</i> .....	74
<b>Tabla 10</b>	<i>Caudal real de consumo por módulo</i> .....	77
<b>Tabla 11</b>	<i>Longitudes equivalentes de los accesorios de la red</i> .....	81
<b>Tabla 12</b>	<i>Características de la tubería de aluminio para aire comprimido</i> .....	83
<b>Tabla 13</b>	<i>Características de la unidad de mantenimiento</i> .....	84
<b>Tabla 14</b>	<i>Datos meteorológico- Estación M004</i> .....	85
<b>Tabla 15</b>	<i>Datos técnicos secador del secador de membrana Atlas Copco</i> .....	86
<b>Tabla 16</b>	<i>Par de apriete para racores Infinity</i> .....	87
<b>Tabla 17</b>	<i>Características principales de compresores de pistón PORTEN</i> .....	89
<b>Tabla 18</b>	<i>Codificación de los elementos de la red de aire comprimido</i> .....	92
<b>Tabla 19</b>	<i>Análisis de funcionamiento real y a plena carga</i> .....	97
<b>Tabla 20</b>	<i>Prueba de caída de presión en vacío</i> .....	98
<b>Tabla 21</b>	<i>Prueba de caída de presión en funcionamiento</i> .....	101
<b>Tabla 22</b>	<i>Simulación de caída de presión en funcionamiento</i> .....	104
<b>Tabla 23</b>	<i>Mediciones zona 1</i> .....	108
<b>Tabla 24</b>	<i>Mediciones zona 2</i> .....	109
<b>Tabla 25</b>	<i>Mediciones zona 3</i> .....	110

<b>Tabla 26</b> <i>Mediciones zona 4</i> .....	110
<b>Tabla 27</b> <i>Mediciones zona 5</i> .....	111
<b>Tabla 28</b> <i>Mediciones zona 6, pasillo</i> .....	112
<b>Tabla 29</b> <i>Mediciones zona 7, exterior del edificio</i> .....	112

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

<b>Ecuación 1</b> <i>Presión ejercida sobre una superficie</i> .....	36
<b>Ecuación 2</b> <i>Caudal</i> .....	39
<b>Ecuación 3</b> <i>Cantidad de aire para un cilindro de simple efecto</i> .....	65
<b>Ecuación 4</b> <i>Relación de compresión</i> .....	66
<b>Ecuación 5</b> <i>Cantidad de aire para un cilindro de doble efecto</i> .....	66
<b>Ecuación 6</b> <i>Factor de utilización</i> .....	67
<b>Ecuación 7</b> <i>Caudal global</i> .....	68
<b>Ecuación 8</b> <i>Diámetro interior de la tubería de aire comprimido</i> .....	71
<b>Ecuación 9</b> <i>Longitud global</i> .....	82

## Resumen

En el presente trabajo de integración curricular se diseña e implementa una red de aire comprimido para el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica, que consta de nueve tomas de aire reguladas y una no regulada, las cuales alimentan a los módulos didácticos de la marca Degem System y de Festo, Módulos Industriales de la Marca Herion, así como Módulos automáticos MPS “Sistema De Producción Modular” y AS/RS “Alimentación y recuperación de productos”; generando un consumo estimado de 19.59 [CFM] de carga global. La instalación beneficia al proceso de enseñanza aprendizaje de los estudiantes de las diferentes carreras de la Universidad. A través de la metodología descriptiva se detalla cada uno de los componentes neumáticos, obteniendo características técnicas que serán útiles para la instalación. Se emplea el método analítico para obtener la demanda real de aire comprimido con un porcentaje de proyección a futuro, orientada a la instalación de nuevos módulos didácticos industriales y automáticos; para realizar el diseño, cálculo y dimensionamiento de los componentes de la instalación; en el método experimental se efectúa la implementación, pruebas de funcionamiento, calibración y ajustes de la red de aire comprimido, garantizando una instalación de calidad, segura y confiable desde su generación hasta su utilización, cumpliendo con los objetivos propuestos.

*Palabras clave:* Aire comprimido, Neumática, Consumo de aire.

### **Abstract**

In this curricular integration work, a compressed air network is designed and implemented for the Hydraulics and Pneumatics laboratory, consisting of nine regulated and one unregulated air intakes, which feed the didactic modules of Degem System and Festo, Industrial Modules of Herion, as well as automatic modules MPS "Modular Production System" and AS/RS "Feeding and recovery of products"; generating an estimated consumption of 19.59 [CFM] of overall load. The installation benefits the teaching and learning process of the students of the different careers of the University. Through the descriptive methodology, each of the pneumatic components is detailed, obtaining technical characteristics that will be useful for the installation. The analytical method is used to obtain the real demand of compressed air with a percentage of future projection, oriented to the installation of new industrial and automatic didactic modules; to carry out the design, calculation and dimensioning of the components of the installation; in the experimental method the implementation, operation tests, calibration and adjustments of the compressed air network are carried out, guaranteeing a quality, safe and reliable installation from its generation to its use, fulfilling the proposed objectives.

*Key word:* Compressed air, Pneumatics, Air consumption.

## Capítulo I

### Marco metodológico de la investigación

#### Antecedentes investigativos

Según HESSE (2002) “El aire comprimido es, junto con la corriente eléctrica, la fuente de energía más importante en plantas industriales, talleres y en otros sectores.” (p.9). Sin embargo desde la antigüedad el aire ya permitía el transporte de energía, pero las primeras máquinas neumáticas útiles aparecieron a partir del siglo XIX.

El aire comprimido es utilizado en las fábricas para el accionamiento de componentes y herramientas neumáticas indispensables en la automatización industrial tales como martillos, clavadoras, pistolas neumáticas, destornilladores, entre otros. Estas herramientas necesitan una calidad de aire inferior a otras aplicaciones específicas como, por ejemplo, las secciones de pintura y la medicina odontológica donde la calidad del aire comprimido deberá ser seco y limpio.

De acuerdo a Castillo (2022) “El aire comprimido tiene que ser preparado y tratado previamente a su utilización. Es preciso eliminar impureza, humedad y suministrarle un lubricante, con el objetivo de evitar un desgaste prematuro de los componentes del sistema” (p.11). La correcta selección de los elementos de tratamiento de aire comprimido garantizará la calidad correcta del aire de acuerdo a la norma ISO 8573.

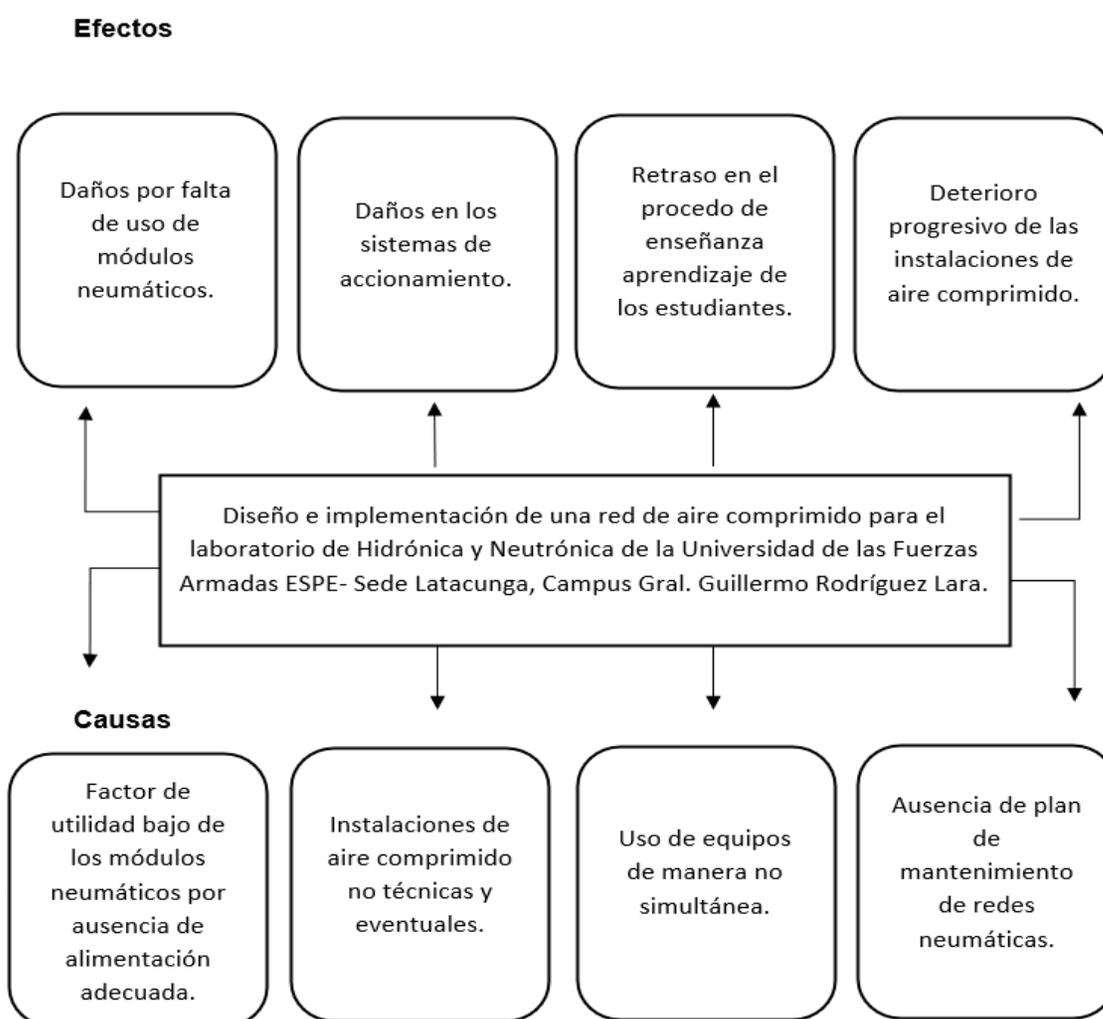
Los sistemas neumáticos, electroneumáticos y de automatización, con tendencias a la Industria 4.0, tienen diversas aplicaciones en el ámbito laboral, así como en el proceso de enseñanza aprendizaje de los futuros profesionales en las carreras de ingeniería y de tecnologías, tales como Electromecánica, Electrónica, Mecatrónica, Automotriz, etc; pues, es fundamental conocer y seleccionar dispositivos adecuados para la operación de un proceso industrial, de manera eficiente considerando las etapas desde el sistema de accionamiento, transporte y utilidades.

El correcto diseño de una red de distribución de aire comprimido y la aplicación de un plan de mantenimiento adecuado evitará el origen de costos adicionales en las instalaciones por pérdidas de presión y desgaste en las tuberías originadas por fugas o corrosión por humedad y exceso de condensados.

## Planteamiento del problema

**Figura 1**

*Árbol de planteamiento del problema*



*Nota.* El gráfico muestra las causas principales del problema y sus consecuencias o efectos.

El laboratorio de Hidrónica y Neutrónica, del Departamento de Eléctrica Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara, cuenta con módulos didácticos de la marca Degem System y de Festo, Módulos Industriales de la Marca Herion, así como Módulos automáticos MPS “Sistema De Producción Modular” y módulos Didácticos AS/RS de “Alimentación y recuperación de productos”; generando una necesidad ponderable de aire comprimido de 13.06 [CFM] reales de carga instalada.

Actualmente el Laboratorio cuenta con dos compresores que abastecen 8.6 [CFM], con una instalación y red de distribución de aire comprimido instalada de manera eventual y no técnica; provocando retraso en el proceso de enseñanza aprendizaje, dificultando el uso de equipos de manera simultánea, y provocando daños en los sistemas de accionamiento existentes. Con el desarrollo del presente proyecto, se garantizará una instalación óptima de un sistema de aire comprimido, desde su generación, distribución, tratamiento hasta su utilización; satisfaciendo factores de utilidad y de simultaneidad de todos los equipos neumáticos del laboratorio, cumpliendo con los objetivos en el proceso de enseñanza aprendizaje y garantizando la formación de futuros profesionales de excelencia.

### **Descripción resumida de proyecto**

El presente proyecto está orientado al diseño e implementación de una instalación de aire comprimido para el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede, se desarrollará el estado del arte, que estará ligado netamente a un análisis documental que tiene como objetivo recuperar y trascender el conocimiento acumulado sobre las redes de aire comprimido, llegando a una comprensión crítica, que generará nuevos paradigmas de investigación, lo que nos permitirá diseñar e implementar la instalación de una red de aire comprimido.

A partir de la recolección de información y cálculos matemáticos se determinará el caudal de la instalación para cada módulo neumático, aplicando criterios ingenieriles se aplicará un factor de simultaneidad y uso, el cual permitirá conocer el caudal real. Finalmente se considerará una ampliación de la instalación al 50% del caudal total en 5 años para determinar el caudal global.

Con el caudal global necesario se determinará la topología de la red a utilizar, así como la longitud total tomando en cuenta las longitudes equivalentes o ficticias proporcionadas por los elementos de la red de distribución como válvulas, codos, tees. Posteriormente se dimensionará el diámetro de la tubería y su material a utilizar para la instalación tomando en cuenta factores como las presiones soportadas, normativas, temperaturas y montaje.

Se seleccionará unidades de mantenimiento para cada módulo de acuerdo a las presiones de funcionamiento y se analizará la aplicación de un sistema de secado de aire de acuerdo a costos en la instalación y el impacto en el correcto funcionamiento de la red. Luego con el caudal global se seleccionará un compresor adecuado para instalaciones educativas.

Al culminar la implementación se creará un manual de operación y mantenimiento, además se realizarán pruebas de funcionamiento de la red de aire comprimido, para verificar que no exista pérdidas significativas de presión en el sistema, verificar que el ruido no afecte a los miembros de la institución educativa y analizar la cantidad de condensados en la instalación durante un periodo continuo de uso, garantizando así un sistema óptimo.

### **Justificación e importancia**

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara cuenta actualmente con un nuevo edificio de laboratorios, en el cual se encuentra el Laboratorio de Hidrónica y Neutrónica, la instalación cuenta con módulos didácticos de la marca Degem System y de Festo, Módulos Industriales de la Marca Herion, así

como Módulos automáticos MPS “Sistema De Producción Modular” y módulos Didácticos AS/RS de alimentación y recuperación de productos. Todos estos módulos son accionados neumáticamente y funcionan actualmente mediante la utilización de 2 compresores que abastecen solo 8.6 [CFM], sin embargo, la demanda aproximada para el óptimo funcionamiento del laboratorio es de 13.06 [CFM] de carga instalada, por lo cual se requiere del diseño e instalación de una red de distribución de aire comprimido para satisfacer esta demanda y su carga futura. Dentro de los requerimientos operativos de la instalación se requiere:

- El diseño mecánico de la red de aire comprimido y el recipiente de almacenamiento que abastezca las necesidades de aire del Laboratorio.
- El cálculo y selección de los componentes que forman parte de la red.

Una adecuada instalación de un sistema de aire comprimido en el Laboratorio de Hidrónica y Neutrónica garantizará el cumplimiento de los objetivos del proceso de enseñanza aprendizaje de la institución, ayudará al correcto funcionamiento de los equipos neumáticos, mejorará los factores de utilidad y simultaneidad en el uso de estos equipos. Además, contribuirá directamente a nuevos profesionales garantizando una formación de excelencia dentro de las nuevas instalaciones.

### **Alcance**

- El alcance del presente proyecto de titulación se detalla a continuación:
- Cálculo y determinación de la demanda máxima de aire comprimido
- Selección de la Unidad de accionamiento (Compresor)
- Selección del tanque de almacenamiento.
- Análisis y determinación de la utilización de una unidad de secado.
- Dimensionamiento de las tuberías.
- Cálculo y selección de las tuberías principales.
- Cálculo y selección de las tuberías secundarias.

- Selección de los accesorios de la red neumática.
- Implementación de la red de aire comprimido en el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica.
- Pruebas de funcionamiento de la instalación.
- Análisis del funcionamiento de equipos.
- Generación de un manual de operación y mantenimiento de la instalación.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

- Diseñar e implementar una red de aire comprimido para sistemas neumáticos y electroneumáticos para el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara.

### ***Objetivos Específicos***

- Calcular la demanda máxima de aire comprimido, considerando el caudal como factor primordial, el cual se estima a partir del consumo de los diferentes módulos que existen en el laboratorio
- Dimensionar el diámetro de la tubería acorde a la ubicación del compresor, para tener una trayectoria fija en la instalación.
- Implementar el diseño de la red de aire comprimido con criterios ingenieriles de alta índole, utilizando los conocimientos adquiridos en la formación e investigación académica durante la ejecución del tema y realización de pruebas de funcionamiento de la instalación.
- Desarrollar procedimientos de utilización y mantenimiento del sistema de aire comprimido.

## Metas del proyecto

- Seleccionar el compresor apropiado tomando en cuenta un aumento del 50%, al cálculo general de la demanda máxima.
- Analizar la implementación del secador de aire comprimido en el lugar de la implementación, debido a las condiciones ambientales del lugar.
- Colocar las tuberías principales en la parte superior de los módulos de Hidrónica y Neutrónica, tomando en cuenta los factores que afectan su instalación.
- Seleccionar los accesorios de la red de aire comprimido de acuerdo a una representación gráfica previamente diseñada, obteniendo el número exacto de unidades de mantenimiento, válvulas esféricas, codos, piezas en T, etc.
- Ubicar el compresor en un lugar donde no presente inconvenientes mecánicos, físicos y de funcionamiento para proporcionar facilidad de uso y servicio.
- Colocar una unidad de mantenimiento en la entrada de cada módulo de aire comprimido, el cual nos permitirá filtrar el aire para mantenerlo libre de impurezas, atrapando contaminantes como agua, polvo y aceite. además de regular constantemente la presión del aire para asegurar que los equipos reciban el suministro necesario.
- Realizar pruebas de funcionamiento de la red de aire comprimido, para verificar que no exista pérdidas de presión, analizando cada mesa trabajo, llegando a plantear conclusiones satisfactorias del proyecto, y proponer recomendaciones de uso y funcionamiento de la instalación de aire comprimido.

## Hipótesis

¿El diseño e implementación de la red de aire comprimido para sistemas neumáticos y electroneumáticos se encuentra funcionando y en óptimas condiciones en el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara?

## Variables de la investigación

### *Variables Independientes*

**Tabla 1**

*Variables Independientes*

Concepto	Categorías	Indicador	Ítems	Técnica	Instrumentos
El diseño e implementación de la red de aire comprimido	Materiales y Tecnologías de fabricación	Caudal	CFM	Descriptiva y Experimental	Software de modelamiento, implementación y normativas.
		Presión	bar		
		Diámetros	in		
		Distancia tuberías	m		
		Volumen	l		

*Nota.* En la Tabla 1 se detallan las variables independientes que se pretende investigar.

## ***Variables Dependientes***

**Tabla 2**

*Variables Dependientes*

<b>Concepto</b>	<b>Categorías</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Ítems</b>	<b>Técnica</b>	<b>Instrumentos</b>
Funcionando y		Caudal	CFM	Experimental	Medidores
en óptimas	Resultados	Presión	bar	y	presión,
condiciones		Ruido	dbA	Observación	medidores de
					Normativas

*Nota.* En la Tabla 2 se detallan las variables dependientes que se pretende investigar.

## **Metodología de desarrollo del proyecto**

### ***Método descriptivo***

Proporciona una lista detallada de cada uno de los componentes de la red de aire comprimido, obteniendo características técnicas y de funcionamiento que serán útiles para la instalación.

### ***Método analítico***

Se obtendrá la demanda real de aire comprimido del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica, con un porcentaje de proyección a futuro, orientada a la instalación de nuevos módulos didácticos, módulos industriales y módulos automáticos, para posteriormente realizar el diseño, cálculo y dimensionamiento de los componentes de la instalación.

***Método experimental***

Al implementar la red de aire comprimido se realizan pruebas de funcionamiento, calibración y ajuste, garantizando una instalación de calidad, segura y confiable desde su generación hasta su utilización, abasteciendo de manera óptima la demanda proyectada, cumpliendo con los objetivos propuestos del proyecto.

***Método documental-bibliográfico***

Al recurrir a la investigación científica nos basaremos directamente en fuentes bibliográficas como libros, revistas, etc. Que nos permitirá llegar eficientemente al diseño e implementación de una red de aire comprimido.

## Capítulo II

### Marco teórico

#### **Evolución histórica del aire comprimido**

En la antigüedad, las primeras formas de aire comprimido no procedían de máquinas complejas. Los seres humanos utilizaban sus pulmones para soplar aire sobre brasas calientes, avivando las llamas de un fuego creciente, que era una parte esencial de las primeras formas de civilización (Huerta, 2018). El fuego desempeñaba un papel importante en el trabajo cualificado, pero crear un infierno lo suficientemente caliente como para fundir y moldear los metales preciosos de la época se convirtió en un reto que necesitaba una fuente de aire comprimido mucho más potente que la que podían suministrar los pulmones humanos.

Además, los artesanos crearon dispositivos de baja presión que funcionaban con las manos y los pies, y con el tiempo incluso con la rueda hidráulica, para crear un fuego lo suficientemente caliente como para fundir los primeros metales (Mundo compresor, 2018). Los famosos fuelles manuales de la antigüedad ayudaban a fundir y moldear cobre, oro, plomo y estaño, pero aún se necesitaban sistemas de aire comprimido más potentes para lograr las proezas que llegaron con la revolución industrial.

Según Severns y Degler (2021), uno de los primeros compresores de aire que se utilizaron para algo distinto a la gestión del fuego aparece alrededor de 1762. Funcionaba con una rueda hidráulica y producía sólo 14 libras por pulgada cuadrada [psi]. En comparación, los grandes compresores de aire industriales de hoy en día alcanzan hasta un máximo de 220 más o menos.

Tras el desarrollo de algunos de los primeros compresores mecánicos en el siglo XVII, que aún utilizaban mecanismos tradicionales de pistón y cilindro que se remontaban a la época de los romanos, llegaron los sistemas de compresores de tornillo (Mundo compresor, 2018). A medida que los sistemas mejoraron y evolucionaron con motores más potentes y el uso de la

electricidad, el aire comprimido se consolidó como un elemento básico esencial en la fabricación y en los avances tecnológicos del siglo XX.

Desde entonces, los sistemas de aire comprimido se han vuelto más complejos. Ahora son componentes esenciales en el mundo industrial moderno. Hoy en día, todo el mundo, desde los agricultores que trabajan en el vasto campo rural hasta las personas que construyen los automóviles que se conduce cada día, utiliza sistemas de aire comprimido.

El aire sigue siendo uno de los recursos más utilizados y disponibles en las empresas modernas, pero su producción requiere una gran cantidad de energía (González & Del Río, 2022). Al analizar los compresores de aire por sectores y cómo se utilizan los sistemas, comprender sus ventajas puede ayudar a tomar una mejor decisión sobre qué tipo de compresor es el adecuado para las necesidades de su empresa. Los sistemas de aire comprimido van desde unidades más pequeñas y portátiles hasta equipos industriales a gran escala que pueden suministrar aire limpio a toda una instalación.

### **Ventajas y desventajas del aire comprimido**

La Tabla 3 muestra las principales ventajas y desventajas de los sistemas de aire comprimido:

**Tabla 3***Ventajas y desventajas del aire comprimido*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La seguridad y comodidad es una de las mayores ventajas.</li> <li>• El compresor de aire funciona silenciosamente.</li> <li>• Aumenta la productividad</li> <li>• El compresor de aire ahorra energía</li> <li>• Requiere poco mantenimiento</li> <li>• El potencial de descarga eléctrica se reduce considerablemente.</li> <li>• Normalmente, las herramientas neumáticas pesan menos que las eléctricas y son más ergonómicas.</li> <li>• El aire comprimido tiene más flexibilidad que las herramientas eléctricas porque el compresor puede hacerse móvil.</li> <li>• Puede regularse y modificarse para múltiples puntos de uso.</li> <li>• Los sistemas de distribución son más fáciles y menos costosos de instalar.</li> <li>• Menos mantenimiento y tiempo de inactividad que las herramientas hidráulicas.</li> <li>• Las fugas del sistema no contaminan el lugar de trabajo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provoca la proyección de residuos</li> <li>• El compresor de aire puede tener problemas de presión</li> <li>• Puede ser perjudicial para la salud</li> <li>• El compresor de aire libera emisiones calientes</li> <li>• Necesita de una preparación en la eliminación de impurezas para su uso</li> <li>• Es limitado la velocidad de los elementos de trabajo regulares</li> <li>• Esfuerzo de labor limitado</li> <li>• Alto ruido tras el escape de aire</li> <li>• Costoso ya que la energía es cara.</li> <li>• Las fugas, mal mantenimiento, mala planificación o mal control, se puede derrochar aún más energía</li> </ul>

*Nota.* La tabla detalla ventajas y desventajas del aire comprimido. Tomado de HESSE (2002).

## Variables físicas

### *Presión*

Al hablar de presión se hace referencia al cociente entre la fuerza aplicada a una superficie y la superficie de la misma por un fluido, así:

#### **Ecuación 1**

*Presión ejercida sobre una superficie*

$$P = \frac{F[Kg]}{S(cm^2)}$$

Donde:

$P$ : Presión [Kg/cm<sup>2</sup>]

$F$ : Fuerza [Kg]

$S$ : Superficie [cm<sup>2</sup>]

A la presión además se la diferencia como:

- Presión atmosférica: Hace referencia al peso que ejerce una columna de aire que se encuentra entre el límite de la atmosfera y una superficie.
- Presión barométrica: Se refiere al valor de la presión atmosférica pero medida sobre el nivel del mar es cualquier punto.
- Presión absoluta: Se obtiene al dividir la toda la fuerza aplicada en una superficie sobre esta misma superficie.
- Presión relativa: Es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica, en neumática se trabaja con presión relativa.

En neumática las principales unidades de medida más utilizadas son los bar, atmosferas o Kg/cm<sup>2</sup>, las conversiones y equivalencias se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4***Equivalencias de unidades de medida de presión*

<b>Equivalencias</b>	1 [bar]	1 [atmósfera]	1 [Kg/cm <sup>2</sup> ]
1 [bar]	1	0.987	1.02
1 [atmósfera]	1.013	1	1.003
1 [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.981	0.968	1

*Nota.* En la tabla se muestran las equivalencias y conversiones para tres unidades de medida utilizadas para aire comprimido. Tomado de HESSE (2002)

### **Compresibilidad**

El aire comprimido está compuesto por el mismo aire que se respira, pero comprimido en un tamaño más pequeño y a baja presión. Cuando se toma el aire atmosférico y se fuerza físicamente para reducir el volumen, las moléculas ocupan menos espacio y ahí el aire se comprime (Barrera, 2018).

Los ingredientes del aire como el nitrógeno, oxígeno vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases no cambian cuando se comprime, sino la cantidad de espacio que ocupan esas moléculas.

Para Barrera (2018) el aire se comprime en dos sencillos pasos:

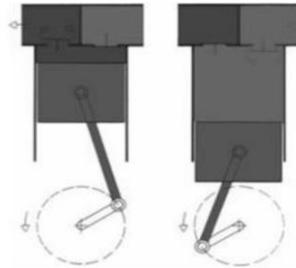
- Paso 1: El aire queda atrapado en un cilindro, depósito o recipiente similar.
- Paso 2: El espacio del depósito se reduce, lo que hace que las moléculas de aire se junten más.

El aire ahora comprimido permanece atrapado en este estado más pequeño, esperando a expandirse de nuevo hasta que esté listo para su uso. El acto de comprimir aire es más fácil

de imaginar con un compresor de aire alternativo, en el que un pistón empuja el aire hacia abajo en un cilindro.

## Figura 2

### *Compresión del aire*



*Nota.* La figura muestra los dos tipos de pasos para la compresión del aire. Tomado de Barrera (2018).

De acuerdo con Leal y Morales (2021) la compresión del aire se explica mediante tres leyes científicas:

- La Ley de Boyle explica que, si el volumen de aire en un cilindro se reduce a la mitad durante el proceso de compresión, la presión dentro del cilindro se duplica.
- La Ley de Charles menciona que el volumen de aire varía de acuerdo con la proporción continua a la temperatura.
- La Primera Ley de la Termodinámica nos dice que un aumento de la presión equivale a un aumento del calor y que la compresión del aire genera un aumento proporcional del calor.

## **Caudal**

El caudal para los sistemas neumáticos se refiere a la cantidad de aire comprimido que es utilizado por los actuadores y los equipos conectados a la red de suministro. En otras palabras, es la cantidad de aire que es suministrado por el compresor por unidad de tiempo y que es medido como volumen.

## Ecuación 2

*Caudal*

$$Q = A * V$$

Donde:

$Q$ : Caudal [ $m^3/s$ ]

$A$ : Área [ $m^2$ ]

$V$ : Velocidad [ $m/s$ ]

También el caudal es la capacidad de un compresor de aire para realizar una tarea de forma continua. En EE.UU., el caudal suele medirse en pies cúbicos por minuto [CFM] a una presión específica. La cantidad de caudal depende del tiempo necesario para completar la tarea (Tello & Vásquez, 2020).

## **Flujo**

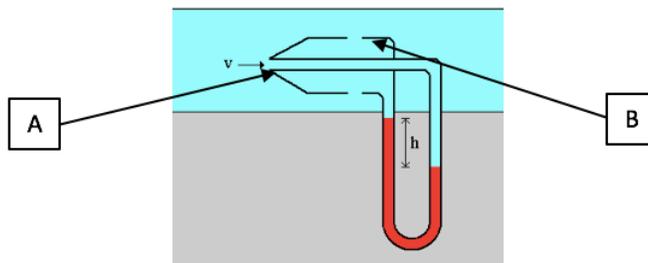
El aire comprimido al ser un aire que ha sido expuesto a un efecto de compresión mecánica o dinámica, da como resultado que la presión sea mayor a la presión atmosférica. Se habla de flujo volumétrico aquel caudal que es la cantidad de fluido que circula a través de una sección (Díaz, 2018).

Es decir, es el movimiento de aire entre dos puntos, siendo el resultado de una diferencia notoria de presión entre ellos, de esta manera el flujo puede ser de mayor a menor presión. Por tanto, es aquella cantidad de aire que puede ser un líquido o gas que pasa por un cierto lugar en un lapso de tiempo, como se muestra en la Figura 3.

En donde: (A) Entrada de aire, (B) Orificios de salida a presión estática, (v) Aire a una velocidad inicial, (h) diferencia de nivel.

### Figura 3

#### *Flujo de aire comprimido*



*Nota.* La figura muestra el flujo de aire comprimido a través de un tubo de Pitot. Tomado de S&P (2018).

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

El aire en su estado natural es una mezcla entre aire seco y vapor de agua, la humedad mide la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera. La temperatura, la presión y la humedad relativa del aire desempeñan papeles interdependientes a la hora de determinar cuánta agua hay en forma de vapor o de líquido.

A manera de ejemplo, Novoa (2021) propone que un volumen de aire de 1 [m<sup>3</sup>] antes de la compresión si está a 77 grados Fahrenheit con una humedad relativa del 60 por ciento bajo 1 [bar] de presión, la capacidad de retención de agua es de 23 [g] y ese contenido real de agua es de 13,8 [g]. Como la capacidad es mayor que el contenido de agua, no hay condensación en el sistema.

#### ***Punto de condensación***

El punto de condensación del aire comprimido puede definirse como la temperatura a la que el vapor de agua suspendido en el aire puede empezar a condensarse en forma líquida al mismo ritmo que se evapora. Esta temperatura fija es el punto en el que el aire está totalmente

saturado de agua y ya no puede retener más agua vaporizada, salvo que se condense parte del vapor que contiene (Creus, 2012).

La temperatura del punto de condensación del aire comprimido es la temperatura a la que el agua empieza a condensarse del aire en forma líquida. Esta temperatura varía según el sistema de compresión y suele medirse entre 50°F y 94°F.

Se pueden instalar sensores específicos de humedad del aire comprimido para supervisar las temperaturas del punto de condensación del aire de los instrumentos y alertar a los operarios cuando supera un nivel preprogramado. Para Hess (2002) el punto de condensación es la temperatura a la que debe enfriarse el aire a presión constante para alcanzar una humedad relativa del 100%. En este punto, el aire no puede retener más agua en forma de gas.

El uso de un sistema de control del punto de condensación a presión le permite estar seguro de que está manteniendo de forma fiable el nivel de humedad deseado en un sistema de aire comprimido. La calidad del aire que se utiliza es de vital importancia para el resultado final del proceso.

### **Producción del aire comprimido**

El aire comprimido se produce mediante compresores, el compresor es un dispositivo, que aumenta la presión del medio de trabajo por encima de la presión inicial que se dice que es la presión atmosférica (Hess, 2002).

### ***Principio de funcionamiento del compresor***

Los compresores de aire empiezan aspirando aire a través de una válvula de entrada que tiene instalado un filtro para evitar el ingreso de partículas, luego comprime el aire hasta alcanzar el volumen necesario y finalmente se libera el aire ya presurizado a través de una válvula de descarga en un depósito de almacenamiento. El proceso de compresión suele estar accionado por un motor eléctrico (Hess, 2002).

En general, el funcionamiento de un compresor de aire requiere un cilindro de bombeo, un pistón y un cigüeñal para transferir energía para una amplia variedad de tareas. Estos componentes básicos pueden ayudar a suministrar aire para llenar objetos como neumáticos.

Para Creus (2012) los compresores son más compactos y ligeros que otras fuentes de energía centralizadas. También son duraderos, requieren menos mantenimiento y son más fáciles de mover que otra maquinaria anticuada. Además, todos los compresores de aire realizan la misma función básica: aumentan la presión y reducen el volumen de un gas, como el aire.

### ***Tipos de compresores***

Según la definición y las características de construcción del compresor, Ávila (2021) afirma que los compresores pueden dividirse en dos grupos:

- Compresores de desplazamiento positivo
- Compresores dinámicos

**Compresores de desplazamiento positivo.** En los compresores de desplazamiento positivo el aumento de presión se produce por succión y prensado del volumen de gas en forma de porciones sucesivas del elemento en parte accionado (Calomarde, 2020). La compresión del aire se realiza en el volumen encerrado debido al tipo de movimiento que se ejecuta por el elemento de desplazamiento, los compresores de desplazamiento positivo se pueden dividir en:

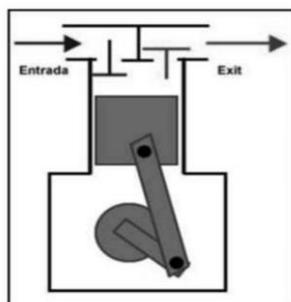
- Compresores de movimiento deslizante (pistón)
- Compresores de movimiento rotativo (tornillo)

**Compresor de Pistón.** Es uno de los grupos más comunes de los compresores utilizados para comprimir el aire en las instalaciones industriales. Se dedican a producir las presiones de salida en el rango de 0,1 [MPa] (1 [bar]) hasta más de una docena de [MPa] (decenas de [bar]) (Kuan & Ooi, 2021).

El elemento de movilidad de estos compresores es el pistón accionado que realiza el movimiento de deslizamiento retorno y gracias a él aspira el aire atmosférico, lo comprime y luego lo envía a la zona de estampación. La Figura 4 muestra la construcción del compresor de pistón:

#### Figura 4

*Compresión por pistón*



*Nota.* La figura muestra la construcción de la compresión del pistón. Tomado de Barrera (2018).

**Compresor de tornillo.** Los compresores de tornillo rotativo son dispositivos, que se dedican a la producción de aire comprimido en los dos ejes giratorios, los rodillos tienen un perfil con tornillos y son asimétricos uno respecto al otro (López, 2022). El principio de funcionamiento se basa en la formación de las cámaras interiores, donde la compresión del aire entre los dos rotores tiene forma de tornillo. El aire de la cámara se desplaza desde el lado de aspiración hasta el canal de descarga.

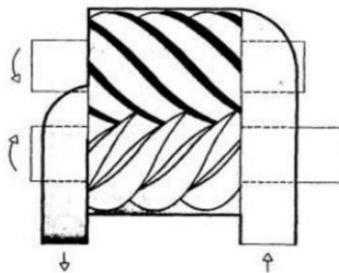
Las principales ventajas de los compresores de tornillo de acuerdo con Morales (2019) son:

- El alto rendimiento
- Ausencia de pulsaciones de caudal y presión
- Capacidad para trabajar en 24 horas
- Caudal y presiones constantes a la salida
- Recuperación de energía térmica
- Funcionamiento silencioso
- Control total sobre los parámetros y el tiempo de trabajo
- Bajo consumo de energía

De esta manera, la siguiente figura muestra el principio de un compresor de tornillo:

### Figura 5

#### *Compresor de tornillo*



*Nota.* La figura muestra la construcción de la compresión de tornillo. Tomado de Barrera (2018).

**Compresores dinámicos.** Los compresores dinámicos transmiten energía al gas mediante la velocidad o la fuerza centrífuga y la convierten en energía de presión, el tipo más común es el compresor centrífugo o de paletas (Barrera, 2018). El gas aspirado entra axialmente en el ojo de un rotor que tiene álabes curvados, y es expulsado tangencialmente desde la circunferencia de los álabes.

La energía que recibe el gas que pasa por una máquina de este tipo depende de la velocidad y la densidad del gas. Dado que la densidad ya está fijada por las condiciones de

trabajo, el rendimiento de diseño de un compresor centrífugo vendrá determinado por la velocidad de la punta del rotor.

Los compresores dinámicos son máquinas rotativas de flujo continuo en las que el elemento que gira rápidamente acelera el aire a su paso por el elemento, convirtiendo la cabeza de velocidad en presión, en parte en el elemento giratorio y en parte en difusores estacionarios (Salazar, 2001). La capacidad de un compresor dinámico varía considerablemente con la presión de trabajo.

## **Tratamiento y componentes del aire comprimido**

### ***Generalidades***

Cuando se habla de compresores de aire, el tratamiento del aire comprimido es un método que deshumidifica y limpia el aire antes de que entre en la red de aire. Este proceso suele implicar el uso de un secador de aire y un filtro de aire más allá del filtro de aire que se encuentra en un compresor de aire (Toasa, Diseño e implementación de la red de aire comprimido para el laboratorio de Automatización y Neumática en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Mecánica- ESPOCH, 2014). Un sistema eficaz de tratamiento del aire comprimido reduce el punto de rocío del aire y elimina las partículas que pueden afectar negativamente al compresor de aire y la red de distribución.

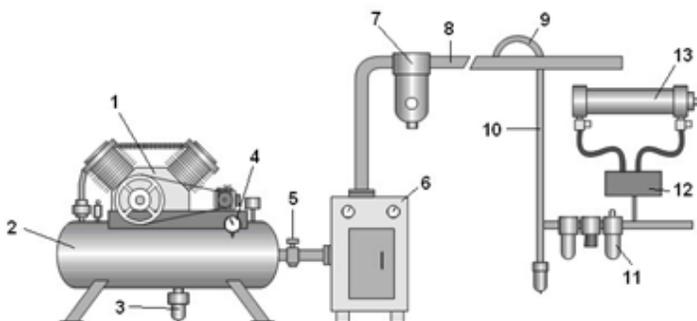
Al invertir en un compresor de aire y un sistema de aire comprimido, el tratamiento del aire comprimido es una opción inteligente para proteger su sistema ya que no sólo permite que el sistema funcione de forma más eficiente con la calidad de aire que necesita la aplicación, sino que también prolonga la vida útil del sistema y sus componentes al reducir la oxidación y la corrosión que puede provocar el aire contaminado con humedad y suciedad.

Los sistemas de aire comprimido suelen constar de los siguientes componentes mostrados en la Figura 6:

Dónde: (1) Compresor, (2) Depósito, (3) Válvula purga condensados, (4) Manómetro, (5) Válvula control, (6) Unidad de acondicionamiento, (7) Filtro- Purgador, (8) Línea principal, (9) Bajante, (10) Línea secundaria, (11) Unidad FRL, (12) Válvulas de control, (13) Actuador.

### Figura 6

#### *Componentes del aire comprimido*



*Nota.* La figura muestra los componentes de una instalación de aire comprimido. Tomado de María Creus (2012).

#### **Calidad del aire comprimido**

El aire comprimido se utiliza en varios procesos en los que no se puede tolerar la presencia de impurezas, como son los procesos de fabricación de alimentos que utilizan aire comprimido no superan las pruebas de inspección sanitaria y de seguridad si se detectan impurezas que contaminen los productos acabados (Pardavé, 2021).

Para garantizar que la producción a escala industrial no suponga un riesgo para la salud de los consumidores finales, las autoridades reguladoras exigen a los fabricantes que cumplan estrictas normas de calidad del aire comprimido.

Para Menéndez (2006) la norma ISO 8573 informa sobre calidad del aire comprimido, que puede utilizarse para analizar teniendo presente tres contaminantes principales: agua,

partículas sólidas y aceite. Estas directrices ISO es eficaz y rentable para determinar la calidad del aire comprimido, cuya clasificación se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Clasificación del aire según la norma ISO 8573*

<b>Clase</b>	<b>Tamaño max de las partículas (µm)</b>	<b>Densidad max de las partículas (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Punto max de condensación bajo presión (°C)</b>	<b>Contenido max de aceite (mg/m<sup>3</sup>)</b>
1	0.1	0.1	-70	0.01
2	1	1	-40	0.1
3	5	5	-20	1
4	15	8	3	5
5	40	10	7	25
6	-	-	10	-
7	-	-	Sin definir	-

*Nota.* En la tabla se muestran las 7 clases de aire según la norma ISO 8573. Tomado de HESSE (2002).

Dependiendo del tipo de aplicación que se realice la calidad del aire comprimido varía y sus características también, con esta finalidad la Figura 7 muestra las características y niveles de limpieza típicos para varias aplicaciones.

## Figura 7

### Características del aire según su aplicación

Aplicaciones	Cuerpos sólidos ( $\mu\text{m}$ )	Punto de condensación del agua (0 °C)	Contenido máx. de aceite ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	Clase de filtración recomendada
Minería	40	–	25	40 $\mu\text{m}$
Lavandería	40	+10	5	40 $\mu\text{m}$
Máquinas soldadoras	40	+10	25	40 $\mu\text{m}$
Máquinas herramienta	40	+3	25	40 $\mu\text{m}$
Cilindros neumáticos	40	+3	25	40 $\mu\text{m}$
Válvulas neumáticas	40 o bien 50	+3	25	40 o bien 50 $\mu\text{m}$
Máquinas de embalaje	40	+3	1	5 $\mu\text{m}$ – 1 $\mu\text{m}$
Reguladores finos de presión	5	+3	1	5 $\mu\text{m}$ – 1 $\mu\text{m}$
Aire de medición	1	+3	1	5 $\mu\text{m}$ – 1 $\mu\text{m}$
Aire en almacén	1	–20	1	5 $\mu\text{m}$ – 1 $\mu\text{m}$
Aire para aplicación de pintura	1	+3	0,1	5 $\mu\text{m}$ – 1 $\mu\text{m}$
Técnica de detectores	1	–20 o bien –40	0,1	5 $\mu\text{m}$ – 1 $\mu\text{m}$
Aire puro para respirar	0,01	–	–	–0.01 $\mu\text{m}$

*Nota.* La figura muestra las características del aire según su aplicación, tipos de impurezas y clase de filtración recomendada. Tomado de HESSE (2002).

### Filtración

**Principio de Funcionamiento del Filtro.** Un filtro de aire comprimido o filtro de línea de aire tiene como finalidad filtrar impurezas del aire atmosférico, que pueden ocasionar daños a los equipos neumáticos como el aceite, humedad y polvo, lo que permite un uso viable para las instalaciones de aire comprimido HESSE (2002).

Al igual que los secadores de aire, son una parte crucial del proceso de tratamiento del aire para garantizar que su aire comprimido esté limpio y sea seguro de usar, y para aumentar la vida útil de sus equipos.

**Clasificación de los filtros.** Para asegurarse del tipo correcto de filtro de aire comprimido, primero se necesita saber qué tipos de filtros de aire comprimido existen y qué principios de funcionamiento utilizan. Es así como, HESSE (2002) muestran la siguiente clasificación:

- Filtros de aire de partículas: eliminan el polvo y otras partículas nocivas del aire comprimido. Al igual que el secador de aire de membrana, el filtro de partículas utiliza una membrana que solo deja pasar el aire y bloquea otros contaminantes como el polvo, el polen y la suciedad.
- Filtros de aire de carbón activo: suelen denominarse filtros de eliminación de vapores, lo que describe perfectamente cómo se utiliza el carbón para atraer los contaminantes gaseosos e inmovilizarlos. El carbón tiene una gran superficie, lo que lo convierte en un tipo de filtro duradero.
- Filtros de aire coalescentes: eliminan del aire líquidos como agua, aerosoles, lubricantes y otras partículas de aceite. Coalescen los aerosoles en gotas gracias a las caídas de presión y al principio de funcionamiento de recorrido tortuoso.
- Filtro ciclónico: este filtro obliga pasar el aire por una chapa metálica y realizar un movimiento rotatorio reteniendo las partículas sólidas y el agua en el interior del depósito.

La clasificación anterior se basa principalmente en el principio funcional del filtro sin embargo de acuerdo a la calidad del filtrado STEFAN (2002) muestra la siguiente clasificación:

- Filtro: Retiene partículas de entre 40 [ $\mu\text{m}$ ] y 5 [ $\mu\text{m}$ ].
- Microfiltro: Retiene partículas superiores a 0.1 [ $\mu\text{m}$ ].
- Filtro submicrónico: Retiene partículas superiores a 0.01 [ $\mu\text{m}$ ] pero antes el aire debe pasar por filtros de 5 [ $\mu\text{m}$ ].

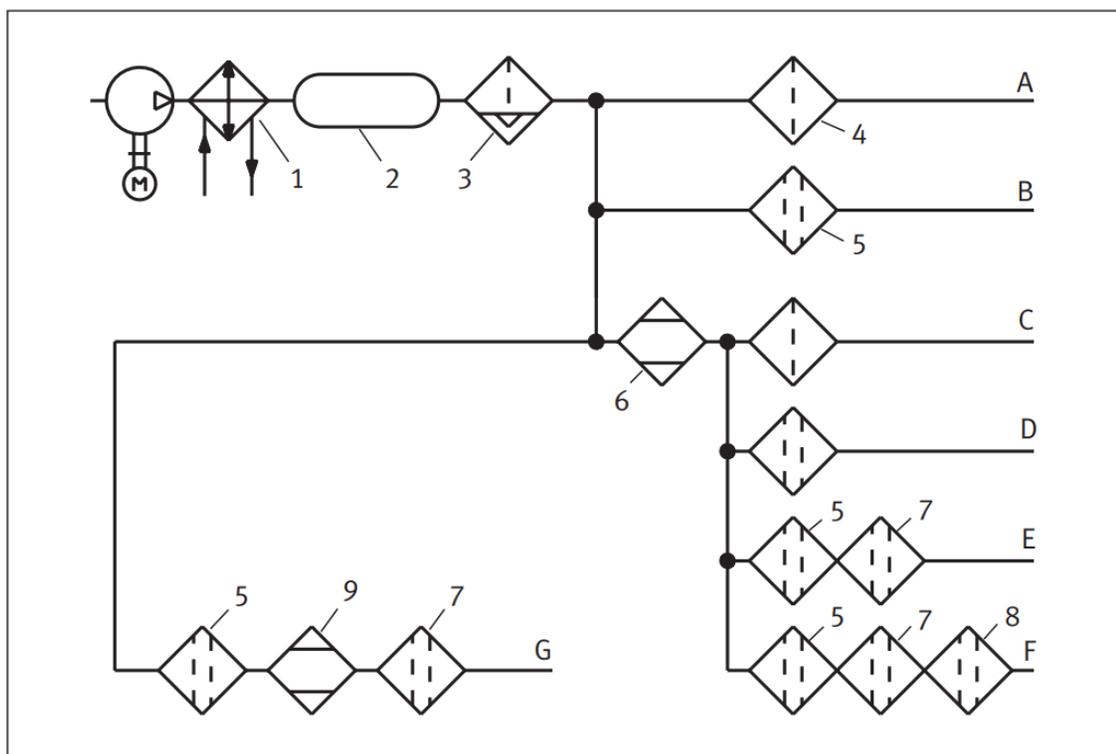
- Filtro de carbón activo: Retiene partículas a partir de 0.003 [ $\mu\text{m}$ ].

**Selección de los filtros.** La forma correcta de elegir correctamente un filtro es de acuerdo a la aplicación en la cual será utilizado el aire comprimido y según este criterio se deberá realizar una combinación de varios filtros como se muestra en la Figura 8.

En donde: (1) Unidad de refrigeración, (2) Acumulador, (3) Filtro principal, (4) Filtro estándar, (5) Microfiltro, (6) Secador por frío, (7) Filtro submicrónico, (8) Filtro de carbón activo, (9) Secador por absorción.

### Figura 8

*Combinaciones de filtros según su aplicación*



*Nota.* La figura muestra las combinaciones de filtros utilizados según su aplicación. Tomado de HESSE (2002).

Para una correcta selección la Figura 8 se combina con la Tabla 6 donde se detallan las aplicaciones más comunes utilizadas para aire comprimido y el grado de filtración necesario.

**Tabla 6***Aplicaciones para selección de filtros*

<b>Clase</b>	<b>Tipo de filtro</b>	<b>Campo de aplicación</b>	<b>Función principal</b>
A	Para ligeras impurezas	Maquinaria y herramientas de taller.	Partículas > 5 [µm] Aceite > 99% Humedad < 99%
B	Eliminación de polvo y aceite.	Actuadores neumáticos y equipo industrial	Partículas > 0.3 [µm] Aceite > 99.9% Humedad > 99%
C	Eliminación de la humedad	Similar de "A" pero en condiciones de temperatura mayor.	Partículas > 5 [µm] Aceite > 99.9% Condensación -17[°C]
D	Para polvo, aceite y humedad.	Instrumentación, pintura y sistemas de inyección.	Partículas > 0.3 [µm] Aceite > 99.9 % Condensación -17[°C]
E	Para aire casi sin humedad, aceite y humedad	Pintura electrostática, limpieza y secado de electrónicos.	Partículas > 0.01 [µm] Aceite > 99.9999 % Condensación -17[°C]
F	Para aire extremadamente limpio	Industria alimentaria y salud.	Partículas > 0.01 [µm] Aceite > 99.9999 % Condensación -17[°C]
G	Para un bajo punto de condensación.	Almacenamiento de medicinas, e instrumentación marítima.	Partículas > 0.01 [µm] Aceite > 99.9999 % Condensación -30[°C]

*Nota.* En la tabla se muestran las 7 clases de aplicaciones principales utilizadas para la correcta selección de filtros. Tomado de HESSE (2002).

### **Regulación de presión**

Un regulador de presión (también válvula reductora de presión) garantiza que la presión del fluido nunca supere un valor preestablecido. Y esto es independiente de lo alto que esté en

la entrada de la válvula. Los componentes están disponibles tanto para líquidos como para gases y se utilizan en muchos ámbitos de la tecnología (Naranjo, 2020).

De este modo, para Gómez (2022) se protegen los racores y otros componentes de posibles daños y se garantiza un funcionamiento cómodo del sistema. Por ejemplo, hay menos ruido de flujo perturbador cuando un reductor de presión reduce de forma fiable la presión del medio.

**Principio de Funcionamiento del Regulador.** El principio elemental del regulador es que la presión se mantenga constante, sin importar que la presión de ingreso pueda fluctuar. La presión de entrada del regulador aumenta y ejerce presión en el disco de sellado. Al contrario del regulador de contrapresión, el aire en algunos casos circulará por la abertura de salida (Moscoso & Ordóñez, 2022).

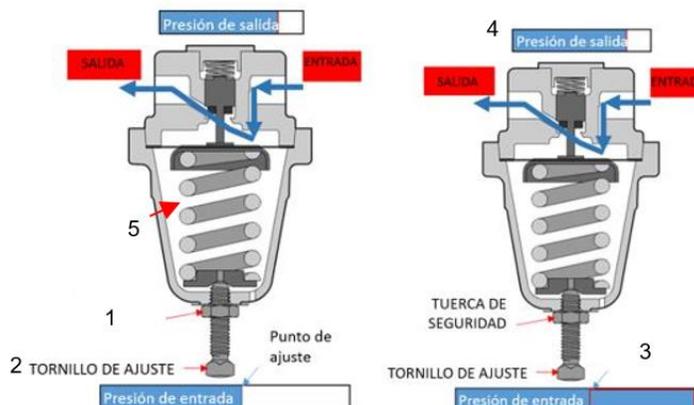
Sin embargo, para Camayo (2021) el paso está restringido, pero no completamente bloqueado; por lo tanto, normalmente está abierto. Aquí, el ajuste del tornillo determina el grado de restricción y la cantidad de aire que puede pasar en un tiempo determinado, reduciendo o aumentando la presión de escape.

Si el regulador está mal ajustado o defectuoso, el componente controlado no funciona como requiere la aplicación de aire comprimido. Lo que puede llegar hacer muy costoso. El funcionamiento de un regulador de presión se detalla en la Figura 9. (SULLAIR, 2022).

Donde tenemos: (1) Tuerca de seguridad, (2) Tornillo de ajuste, (3) Punto de ajuste, (4) Presión de entrada y salida, (5) Muelle.

## Figura 9

### Regulación de presión



*Nota.* La figura muestra la regulación de presión del lubricador. Tomado de SULLAIR (2022).

## Clasificación de los Reguladores

Existen dos tipos de reguladores de presión:

### Figura 10

#### Clasificación de los reguladores de presión.

**Regulador de contra presión:** Con punto de ajuste el muelle aumenta la tensión con la presión originada, lo cual permitira que exista un sellado en el interior del regulador.

**Regulador de presión de control:** Con el tornillo de ajuste se mantienen constante la presión en la salida, sin importar los factores que influyan en la presión de la entrada.

*Nota.* La figura muestra la clasificación de los reguladores de presión. Tomado de SULLAIR (2022).

## Lubricación

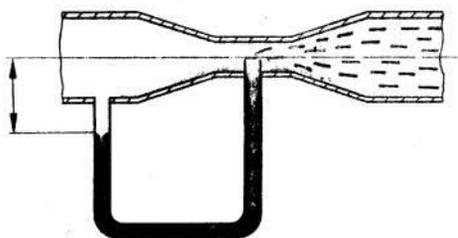
Según el ámbito de aplicación, los consumidores de aire comprimido requieren una lubricación con aceite que los proteja contra la corrosión y, al mismo tiempo, reduzca la fricción

y el desgaste. Los lubricadores enriquecen el aire comprimido con la niebla de aceite más fina y garantizan así la lubricación fiable de los consumidores (Balladares & Cota, 2018).

**Principio de Funcionamiento del lubricador.** El lubricador que se muestra a continuación funciona según el principio de Venturi.

### Figura 11

*Funcionamiento del lubricador*



*Nota.* La figura muestra el funcionamiento del lubricador. Tomado de Colombero (2013).

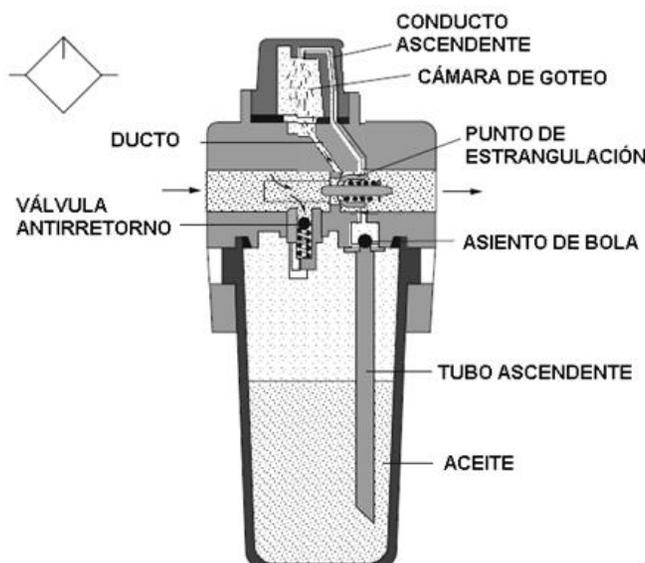
El aire comprimido fluye a través del lubricador desde la entrada hasta la salida debido al estrechamiento de la sección transversal de la válvula, se produce una pérdida de presión. Se crea un vacío que es un efecto de succión en el conducto y en la bandeja recoge gotas (Bezós, Cerdá, & Rodríguez, 2022).

Para Vera (2018) las gotas de aceite son aspiradas a través del conducto y el tubo ascendente. Pasan por la bandeja de goteo y el conducto al aire comprimido, que se dirige a la salida. Las gotas de aceite son atomizadas por el aire comprimido y, en este estado, llegan al consumidor.

La sección transversal del flujo varía en función de la cantidad de aire que pasa y de la caída de presión, es decir, de la cantidad de aceite que puede ajustarse aún más en la parte superior del tubo ascendente mediante un tornillo. Una cierta cantidad de aceite ejerce presión sobre el aceite del depósito a través de la válvula de control.

## Figura 12

### Partes del lubricador



*Nota.* La figura muestra las partes del lubricador. Tomado de Colombero (2013).

**Clasificación de los lubricadores.** Existen dos tipos de lubricantes de uso general: los lubricantes en aerosol y los lubricantes para inyectores. Los más utilizados son los lubricantes en aerosol, que fueron los primeros dispositivos que se aplicaron automáticamente a los conductos de aire (Domínguez & Ferrer, 2020). Estos lubricantes se dividen en dos grupos, los cuales son:

- Niebla de aceite
- Micro-niebla

Lubricadores por neblina de aceite: normalmente, las partículas de aceite generadas son bastante grandes y pueden ser transportadas por el aire a distancias relativamente cortas. Por lo general, el lubricador por neblina de aceite no se ubica a más de 9 m del equipo que se va a lubricar. Las partículas gruesas están más influenciadas por la gravedad, por lo que los nebulizadores no deben utilizarse para lubricar equipos a un nivel superior al del nebulizador (Vásquez, 2016).

Lubricador de Micro-niebla: utiliza un generador de niebla especial para atomizar sólo una parte del aceite. La niebla se compone sólo de partículas ligeras de menos de 2 micras, no se ve afectada por la gravedad de la misma manera y puede transportarse no sólo a niveles más altos, sino también a distancias más largas a través de líneas de suministro más complejas. El lubricador de micro niebla también puede proporcionar la buena distribución que proporcionan las salidas y es ideal para circuitos de control de válvulas.

### **Secado**

**Principio de Funcionamiento del Secador.** Los secadores de aire comprimido pertenecen a la categoría de secadores de aire seco. Utilizan aire comprimido disponible que se presuriza hasta la presión atmosférica, donde se crea una temperatura del aire óptima para el proceso con un punto de rocío bajo. Este aire se calienta en la secadora a la temperatura requerida (Sánchez & Torres, 2020).

El requisito previo para este sistema es que el aire comprimido esté seco y exento de aceite y agua. El principio básico de los secadores de aire comprimido es que la expansión del aire comprimido provoca la reducción del punto de rocío. Estos sistemas pueden alcanzar un punto de rocío de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  o inferior, en función del punto de rocío inicial del aire comprimido (Procil, 2020).

Una de las primeras normas publicadas fue la S7 de la Sociedad de Instrumentos de América [SIA] define el aire seco como aquel que tiene un punto de rocío a presión  $18^{\circ}\text{F}$  /  $10^{\circ}\text{C}$  por debajo de la temperatura más baja a la que se encontraría el sistema, pero no superior a  $35^{\circ}\text{F}$ .

**Clasificación de los Secadores.** De acuerdo con Domínguez y Ferrer (2018) la clasificación de secadores de aire comprimido es:

**Secadores refrigerativos.** De todos los secadores de aire comprimido, los secadores frigoríficos son el tipo más popular y utilizado. Como el nombre indica, este tipo de secador funciona de forma similar a un frigorífico doméstico, en donde aplica un proceso de enfriamiento que impide la formación de humedad. La principal diferencia radica en los artículos que se enfrían (Novoa, 2021). Mientras que un frigorífico enfría y almacena alimentos y bebidas perecederos, un secador frigorífico mantiene la calidad del aire en el sistema de aire comprimido.

En un secador frigorífico, el aire comprimido se enfría a unos 35 grados Fahrenheit (1, 666° Celsius). A medida que el aire pasa por la válvula de entrada, se elimina y expulsa la humedad y el aire recién secado se calienta con el aire entrante. Al final de cada ciclo, el aire comprimido producido tiene un punto de rocío de entre 35 y 40 grados Fahrenheit. En general, el proceso de liofilización crea un entorno de trabajo de baja humedad, que elimina la contaminación y los efectos corrosivos de la humedad.

### Figura 13

*Secadores refrigerativos*



*Nota.* La figura muestra un secador refrigerativo. Tomado de EACSA (2017).

**Secadores desecantes.** Los secadores que utilizan desecantes para secar el aire comprimido manejan un proceso conocido como adsorción, que es ligeramente diferente de la absorción (Gómez & López, 2020). La diferencia puede describirse del siguiente modo:

- Adsorción: La humedad se adhiere al desecante sin disolverlo
- Absorción: La humedad es absorbida por el desecante

Cuando se habla de secadores, la palabra desecante no sólo se refiere a un tipo, sino también a la categoría de secadores individuales, también conocidos como secadores de adsorción y secadores de regeneración. Los secadores desecantes deben el nombre al desecante higroscópico que contienen.

En las secadoras regenerativas, que no utilizan calor, no hay elementos calefactores internos ni externos. A 100 psi, un secador de este tipo suele tener un punto de rocío de menos 40 grados Fahrenheit, aunque a veces el punto de rocío puede descender hasta menos 100 grados (EACSA, 2017).

#### **Figura 14**

*Secadores desecantes*



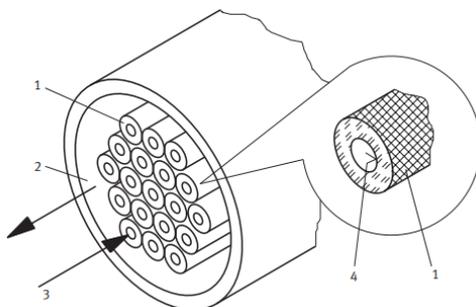
*Nota.* La figura muestra un secador desecante. Tomado de EACSA (2017).

**Secadores de membrana.** Este tipo de secadores están formados por un conjunto de fibras huecas que son permeables al vapor que circula en el aire. Su principal función es crear una diferencia de presión parcial entre el aire húmedo en el secador y el flujo que lo atraviesa en sentido contrario (HESSE, 2002). Las partes principales de un secador de membrana se lo puede observar en la Figura 15.

Donde: (1) Fibra Hueca, (2) Aire de enjuague, (3) Entrada de aire húmedo, (4) Membrana.

### Figura 15

*Secador de membrana*



*Nota.* La figura muestra un secador de membrana. Tomado de HEESE (2002).

**Criterios para la implementación de secadores en instalaciones.** Los principales criterios a tomar en cuenta para la implementación de un secador son:

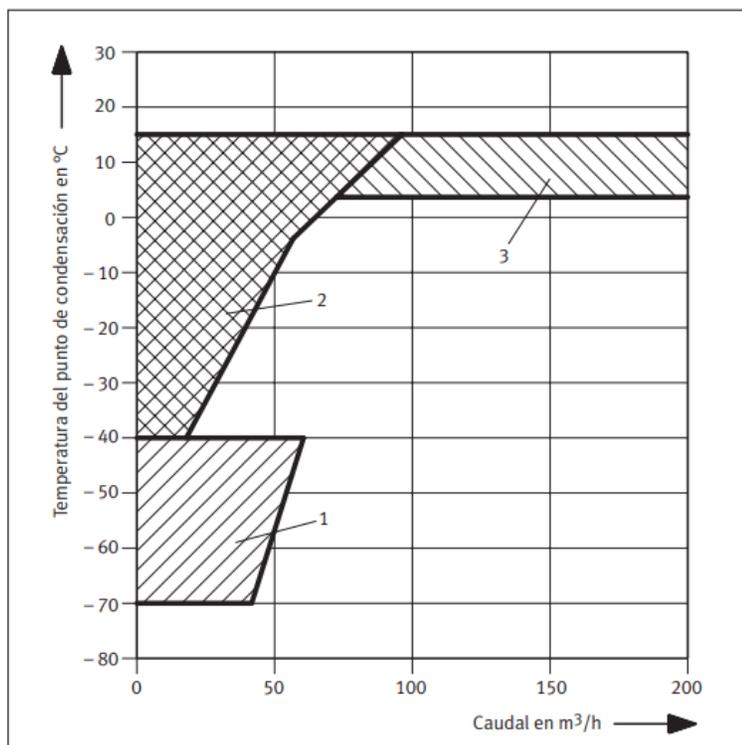
- Calidad del aire para la instalación.
- Costos de adquisición y mantenimiento
- Condiciones ambientales

HEESE (2002) propone la Figura 16 para una correcta selección de un secador de aire para una instalación de aire comprimido en donde se realiza una selección de acuerdo a la temperatura del punto de condensación en [°C], y el caudal de la red en [m<sup>3</sup>/h].

Donde: (1) Secador de por absorción, (2) Secador de membrana, (3) Secador refrigerativo.

**Figura 16**

*Nomograma para selección de un secador*



*Nota.* La figura muestra un nomograma para la selección de secadores. Tomado de HEESE (2002).

### **Distribución del aire comprimido**

El sistema de distribución de aire está diseñado para proporcionar un suministro ininterrumpido de aire comprimido exactamente se lo necesita. Una buena red de distribución de aire transporta el aire comprimido desde la fuente hasta el punto de uso en condiciones óptimas: con la mínima pérdida de presión, el máximo caudal y la máxima calidad del aire (Herrera, 2019).

El compresor aspira aire de la atmósfera y lo comprime en un recipiente, apagándose automáticamente cuando la presión del aire alcanza el límite diseñado.

En este sentido, el aire comprimido se distribuye a través de redes de tuberías con diferentes topologías. Se recomiendan estructuras en anillo o topologías malladas en función de los requisitos, por ejemplo, en edificios o con distintos perfiles de uso (Cerdá, 2018). En términos de seguridad, la distribución debe cumplir las normas de seguridad operativa aplicables, las directrices sobre equipos y las normas técnicas de construcción de tuberías. También debe cuidarse la eficiencia económica documentando el dimensionamiento y los análisis de riesgos.

### ***Tipos de circuitos***

La red transporta el aire comprimido desde el compresor hasta el consumidor. El dimensionado de la red de aire comprimido es muy importante, ya que influye mucho en la fiabilidad del suministro (Daza & Sánchez, 2021). Para ello, se tiene dos tipos de circuitos o redes:

**Red en circuito abierto.** Este tipo de red consta de una línea principal de la que se ramifican líneas secundarias y alternas. La baja inversión inicial que requiere esta red es su primordial ventaja (Asencio, 2018). Además, se pueden instalar pendientes para drenar el condensado.

El principal inconveniente de este tipo de red es el mantenimiento ya que, durante las reparaciones, el suministro de aire puede interrumpirse por debajo del punto de corte, lo que implica paradas de producción

**Red en circuito cerrado.** En este tipo de red, las líneas principales forman un anillo logrando una presión casi uniforme en toda la toma o bajantes. Además, esto facilita enormemente el trabajo de mantenimiento, ya que los componentes individuales pueden aislarse sin afectar la producción (Asencio, 2018).

Sin embargo, la falta de una dirección permanente del flujo es un gran inconveniente de esta red, debido que la dirección del flujo en un punto dado de la red está dependiente de la demanda específica, por lo que el flujo de aire se transformará en función del uso.

### ***Tubería de circuito principal***

Antes de instalar las salidas o entradas de aire comprimido en la red, se debe comprobar que los diámetros de las tuberías son suficientes para manejar el aire adicional que se necesita en el sistema (Gómez & López, 2020).

Son necesarias las tomas de corriente para conectar a las líneas de suministro. El flujo que las atraviesa conecta con los elementos, que se alimentan exclusivamente a través de esta tubería (Creus, 2012). El diseño también debe tener en cuenta posibles ampliaciones futuras donde la velocidad del aire no debe superar los 8 m/s.

**Inclinación de la red.** La línea principal debe tener una buena inclinación para evitar problemas al ampliar la red, con una ligera pendiente del 1% hasta el 2% en la dirección del flujo de aire para acomodar el drenaje de condensado (Cerdá, 2018).

### ***Bajantes o circuito secundario***

El número de aparatos alimentados por una tubería de servicio no debe ser superior a tres. Para evitar atascos, las conexiones de tuberías de servicio o bajantes deben ser con mangueras de más de ½" pulgada de diámetro. Al tratarse normalmente de secciones pequeñas, las pérdidas son bajas y, por tanto, las velocidades del aire en las mangueras pueden llegar a 15 [m/s] (Pincay, 2019).

**Curvatura.** Las bajantes o circuitos secundarios deben evitar lo máximo posible la acumulación de condensados en su toma de presión, es por ello que para evitar este problema se usa tomas en forma de cuellos de cisne, estos consisten en bajantes con una curvatura hacia la parte superior evitando el uso de codos.

### **Actuadores Neumáticos**

Los actuadores neumáticos son dispositivos que convierten la energía del aire o gas comprimido en un movimiento mecánico que regula uno o más elementos de control final (Moge & Pablo, 2020). Asimismo, convierten la energía del aire o gas comprimido en un movimiento mecánico que regula uno o más elementos de control final. Se utilizan como forma de control de automatización para reducir la interacción humana obligatoria con los mecanismos internos de un sistema, lo que resulta especialmente beneficioso para la modulación automática y las paradas de emergencia.

Para Almeida (2019) el movimiento de un actuador neumático puede ser lineal o rotativo, dependiendo del diseño del dispositivo. Los actuadores prototípicos utilizan una fuerza de compresión externa, como aire o gas comprimido, para desplazar un pistón por el interior de un cilindro hueco y generar presión.

### ***Actuadores lineales***

Los diseños lineales son actuadores donde se generan un par en lugar de un movimiento lineal. Esto puede lograrse transfiriendo el movimiento lineal de un pistón a un componente giratorio, o viceversa (González, 2018). Los actuadores lineales neumáticos están diseñados para convertir el aire comprimido en un movimiento lineal, normalmente con un vástago que se extiende y se retrae, pero también pueden diseñarse con un carro que se desplaza sobre el tubo del cilindro o la guía.

### ***Actuadores de movimiento rotativo***

Un actuador neumático de fracción de vuelta consta de una o varias cámaras de aire con una membrana de pistón o fuelle. Dependiendo del diseño, la presión del aire fuerza el movimiento del pistón o la membrana genera un movimiento lineal o giratorio (Bayas, 2020). Si el movimiento producido es lineal, convierte internamente el movimiento lineal en un movimiento giratorio. Los actuadores neumáticos son fiables, proporcionan fuerzas elevadas en relación con el tamaño y pueden utilizarse en atmósferas explosivas. Normalmente, se utiliza un actuador rotativo para accionar una válvula rotativa.

### **Dimensionamiento de la red**

El dimensionamiento de una red de distribución de aire comprimido está compuesto por una serie de pasos que aseguran el correcto funcionamiento de la misma, minimizando las caídas de presión en la red y la asegurando una correcta selección de materiales de acuerdo al tipo de aplicación en la cual será usado el aire comprimido.

### ***Presión de funcionamiento***

En una red de distribución de aire comprimido se puede diferenciar 2 tipos de presiones: la presión de funcionamiento la cual es utilizada por los elementos en cada puesto de trabajo y la presión de servicio la cual es suministrada por el compresor. (Toasa, Diseño e implementación de la red de aire comprimido para el laboratorio de Automatización y Neumática en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Mecánica- ESPOCH, 2014). De acuerdo al valor de presión tres tipos:

- Baja presión: Desde la presión atmosférica hasta 2 veces su valor.
- Mediana presión: Desde los 90 [psi] hasta [205] psi.
- Alta presión: Desde 205 [psi] hasta los 600 [psi].

### ***Caídas de presión en la red***

Las caídas o pérdidas de presión son un problema frecuente en una instalación, estas comienzan a presentarse desde la etapa de generación, luego en la etapa de preparación de aire (secado, filtros, lubricadores) y finalmente aumentan considerablemente por acción de los accesorios de la red (válvulas, codos, tees). Las pérdidas de presión aceptables deberán ser de máximo el 10% de la presión de servicio, sin embargo, lo ideal debería ser una pérdida de presión del 5%.

### ***Caudal de consumo de la instalación***

El caudal de consumo de una instalación de aire comprimido está dado por la cantidad de equipos que se necesitan suministrar y el caudal de cada uno de acuerdo al fabricante. Los principales consumidores de los equipos neumáticos son los cilindros de simple y doble efecto, además de los motores neumáticos utilizados para los procesos de automatización. Los motores neumáticos en su placa de datos se detallan el caudal de consumo recomendado, pero en muchos cilindros neumáticos esta información no es asequible, es por ello que la Ecuación 3 permite determinar el caudal de consumo para un cilindro de simple efecto.

### **Ecuación 3**

*Cantidad de aire para un cilindro de simple efecto*

$$\dot{V} = s * n * \frac{D^2 * \pi}{4} * \text{Relación de compresión} * \left(\frac{1}{1000}\right) \left(\frac{l}{\text{min}}\right)$$

Donde:

$\dot{V}$ : Cantidad de aire [l/min]

$s$ : Longitud de carrera [cm]

$n$ : Ciclos por minuto

$D$ : Diámetro del émbolo [cm]

La relación de compresión está determinada por la Ecuación 4

#### **Ecuación 4**

*Relación de compresión*

$$R_c = \frac{101.3 + P}{101.3} \text{ (kPa)}$$

Donde:

$R_c$ : Relación de compresión

$P$ : Presión de Trabajo [kPa]

Para la calcular el consumo de un cilindro de doble efecto se utiliza la Ecuación 5

#### **Ecuación 5**

*Cantidad de aire para un cilindro de doble efecto*

$$\dot{V} = \left[ s * \frac{D^2 * \pi}{4} + s * \frac{(D^2 - d^2) * \pi}{4} \right] * n * \text{Relación de compresión} * \left( \frac{1}{1000} \right) \left( \frac{l}{\text{min}} \right)$$

Donde:

$\dot{V}$ : Cantidad de aire [l/min]

$s$ : Longitud de carrera [cm]

$n$ : Ciclos por minuto

$D$ : Diámetro del émbolo [cm]

$d$ : Diámetro del vástago [cm]

Luego de haber determinado el caudal de consumo individual de cada elemento se deberá multiplicar por un factor de uso y de simultaneidad para asegurar que la instalación no sea sobredimensionada y se desperdicie energía en la generación.

El factor de simultaneidad es un factor estadístico usado para determinar la probabilidad de que varios equipos funcionen de manera simultánea, este valor se puede determinar fácilmente con la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Coefficientes de simultaneidad según cantidad de equipos*

Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad	Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad
1	1	9	0.73
2	0.94	10	0.71
3	0.89	11	0.69
4	0.86	12	0.68
5	0.83	13	0.67
6	0.8	14	0.66
7	0.77	15	0.65
8	0.75	16	0.2

*Nota.* En la tabla se muestran los valores estadísticos de coeficientes de simultaneidad usados para equipos neumáticos. Tomado de HESSE (2002).

El factor de utilización o factor uso es determinado mediante la Ecuación 6, el cual permite determinar una diferencia entre los equipos usados de forma continua y los usados ocasionalmente.

### **Ecuación 6**

*Factor de utilización*

$$Fu = \frac{Tu}{Tr}$$

Donde:

*Fu*: Factor de utilización

*Tu*: Tiempo referencial [min]

*Tr*: Tiempo de uso [min]

Finalmente, para determinar el caudal total de la red es necesario la adición de un caudal proyectado a un mínimo de 5 años para futuras expansiones y adiciones a la instalación, este caudal final se puede calcular con la Ecuación 7.

### **Ecuación 7**

*Caudal global*

$$Q_G = Q + Q_P$$

Donde:

$Q_G$ : Caudal global de aire comprimido [CFM]

$Q_R$ : Caudal real [CFM]

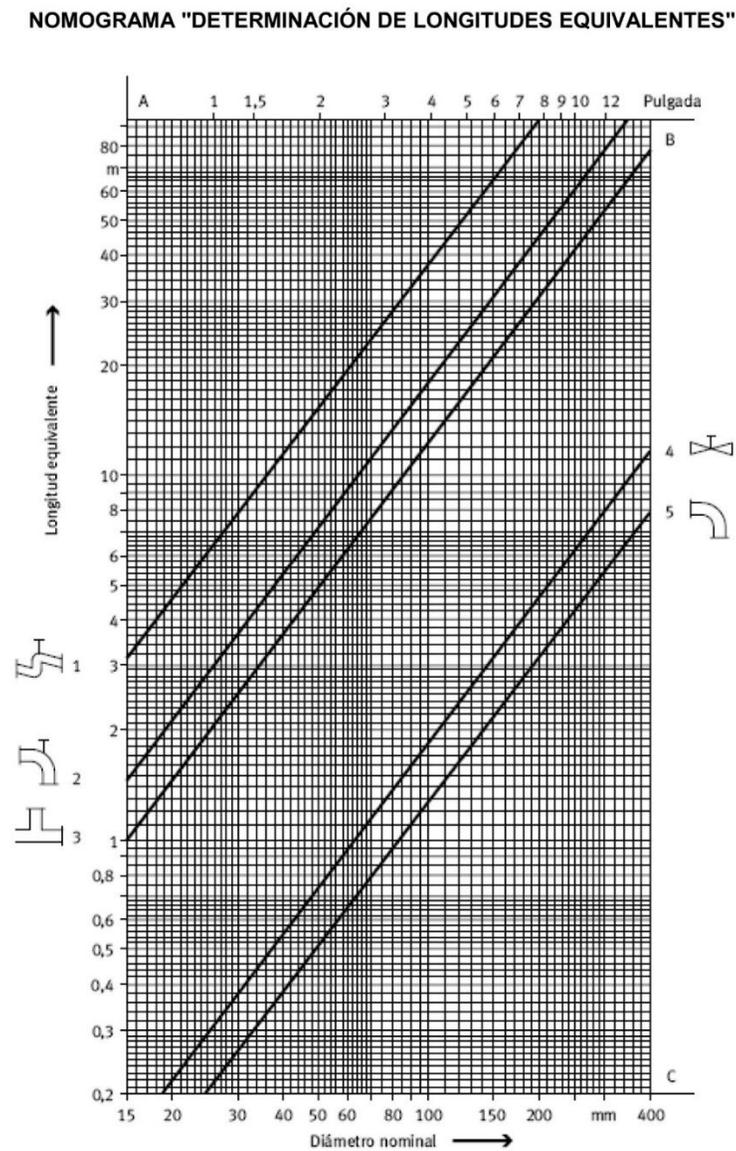
$Q_P$ : Caudal proyectado a 5 años.

### ***Longitud de la red***

La longitud de la red está directamente relacionada con el tipo de red seleccionado y las pérdidas de presión en la misma, una red en circuito cerrado necesitará una mayor longitud, pero ayudará a minimizar las caídas de presión, a diferencia de una red en circuito abierto cuya longitud será mucho menor. Sin embargo, la longitud de la tubería no es suficiente para realizar el análisis de la longitud final, se deberá tomar en cuenta la influencia de los accesorios de la red como: válvulas, codos, tees y reducciones. Estos elementos aportan longitudes equivalentes a la instalación, también llamados longitudes ficticias por la resistencia al paso que ofrecen, la determinación de estas longitudes se los puede encontrar en la Figura 17.

Figura 17

Nomograma de longitudes equivalentes para accesorios



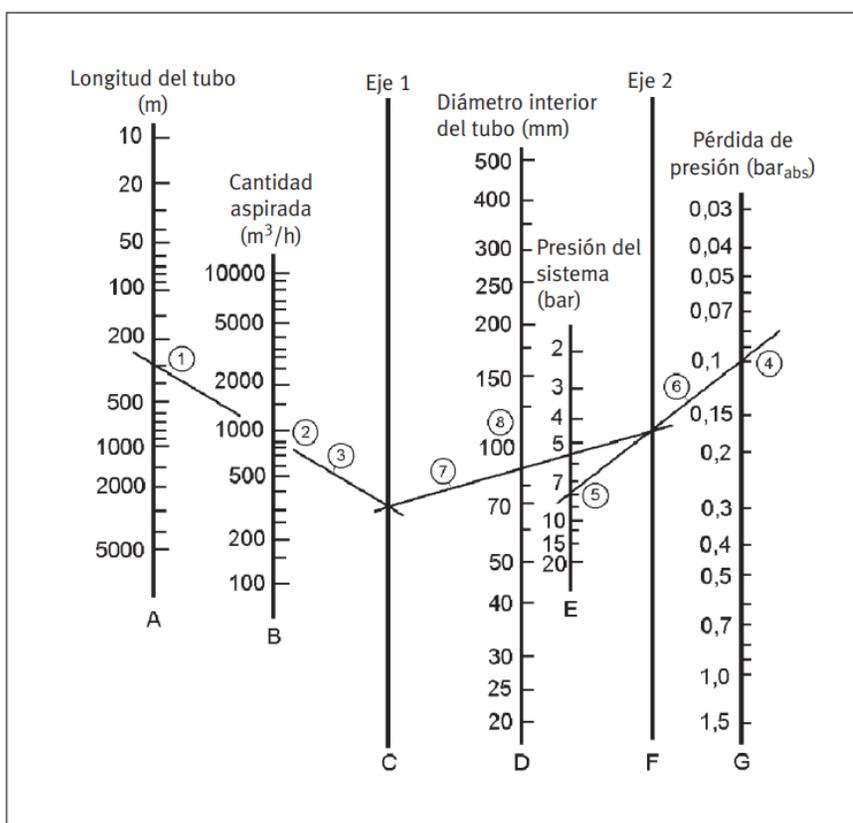
*Nota.* La figura muestra las longitudes equivalentes o ficticias para 4 accesorios en una red de aire comprimido. Tomado de HESSE (2002).

### Diámetro para la tubería

El diámetro de la tubería se lo puede encontrar con la Ecuación 8 sin embargo también se pueden utilizar nomogramas como el de la Figura 18, en el cual mediante la longitud total del tubo (1), la pérdida de presión en la red (4), el caudal (2) y la presión del sistema (5) se puede trazar líneas oblicuas (3), (6) y (7) para encontrar el diámetro interno de la tubería (8).

### Figura 18

Nomograma para determinar tuberías de aire comprimido



*Nota.* La figura muestra el nomograma utilizado para determinar el diámetro de tuberías de aire comprimido. Tomado de HESSE (2002).

La Ecuación 8 también es utilizada para la determinación del diámetro de la tubería y utiliza los mismos datos presentados en el nomograma de la Figura 18.

**Ecuación 8**

*Diámetro interior de la tubería de aire comprimido*

$$d = \sqrt[5]{(1.6 * 10^3) * V^{1.85} * \frac{L_T}{\Delta P * P_1}}$$

Donde:

$d$ : Diámetro interior de la tubería [m]

$L_T$ : Longitud total [m]

$\Delta P$ : Variación de presión [Pa]

$P$ : Presión de Trabajo [Pa]

$V$ : Caudal global [m<sup>3</sup>/s]

***Materiales para tubería de aire comprimido***

Para la selección del material de las tuberías hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Costos del material
- Dimensión
- Calidad del aire comprimido
- Montaje
- Rigidez de los materiales

Según los factores anteriores se pueden utilizar 5 tipos de materiales recomendados para aire comprimido cuyas características se detallan en la Tabla 8.

**Tabla 8***Características técnicas para tubos de aire comprimido*

<b>Material de la tubería</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Presiones</b>	<b>Uniones</b>
Acero sin costura	10,2 hasta 558,8 [mm]	12,5 hasta 25 [bar]	Soldadura
Roscado	1/8 hasta 6 [in]	10 hasta 80 [bar]	Racores, soldadura
Acero inoxidable	6 hasta 273 [mm]	Hasta 80 [bar] y en parte presión superior	Soldadura
Cobre	6 hasta 22 [mm] suave 6 hasta 54 [mm] duro 54 hasta 131 [mm] duro	Según ejecución 16 hasta 140 [bar]	Roscas, soldadura, racores
Aluminio	12 hasta 40 [mm]	14 [bar]	Racores enchufables reutilizables
Material sintético	12 hasta 63 [mm]	14 [bar]	Racores enchufables reutilizables

*Nota.* En la tabla se muestran las principales características técnicas para 5 tipos de tubos utilizados para aire comprimido. Tomado de HESSE (2002).

## Capítulo III

### Diseño de la red de aire comprimido

#### Ubicación

La Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE- Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara, está ubicada en la Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia Belisario Quevedo, Barrio el Forastero, sus coordenadas geográficas corresponden a. El laboratorio de Hidrónica y Neutrónica se ubica en la zona este del centro del campus a una altura de 2820 msnm.

#### Figura 19

*Ubicación del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica*



*Nota.* El gráfico representa la ubicación del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica con respecto al centro del campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara. Fuente: Google Earth.

## Determinación de la Calidad del aire para la instalación

La red de aire comprimido está destinada para el uso de módulos neumáticos didácticos y semiindustriales, cuyos principales elementos son cilindros y válvulas neumáticas. De acuerdo a la Figura 7 y la Tabla 5 se determina la calidad de aire que será necesaria para satisfacer la demanda de estos equipos. De acuerdo al capítulo anterior se crea la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Calidad de aire comprimido*

<b>Características</b>	<b>Aire cilindros</b>	<b>Aire válvulas</b>
Cuerpos Sólidos	40 [ $\mu\text{m}$ ]	40 [ $\mu\text{m}$ ] o bien 50 [ $\mu\text{m}$ ]
Punto de condensación del agua	+3[°C]	+3[°C]
Contenido máx. de aceite	25 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	[25 $\text{mg}/\text{m}^3$ ]

*Nota.* En la tabla se muestra los valores de calidad de aire comprimido para cilindros y válvulas neumáticas.

De acuerdo a la Tabla 9 se determina que la instalación aceptará una media de cuerpos sólidos no mayores a 40 [ $\mu\text{m}$ ], con un punto máximo de condensación de +3 [°C] y un contenido máximo de aceite de 25 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ], por tal motivo se determina que la calidad de aire será de un valor de 5.

## Presión de la Red

El laboratorio de Hidrónica y Neutrónica cuenta principalmente con módulos neumáticos didácticos y semiindustriales, utilizados para el aprendizaje de procesos de Automatización y Producción, entre los cuales se encuentran tres marcas:

- DEGEM SYSTEM
- HERION
- FESTO

Estos módulos utilizan actuadores lineales y rotativos que trabajan a una presión de hasta los 6 [bar] o 90 [psi] aproximadamente, los reguladores de presión deberán trabajar por lo menos con un excedente de 1 [bar], por lo tanto la presión necesaria en toda la red de distribución deberá ser de 7 [bar] o 102 [psi] aproximadamente, la cual según el capítulo anterior es considerada mediana presión para que los equipos trabajen normalmente y se compense las caídas de presión que pueda existir en la red por los accesorios u otros factores.

### **Cálculo del caudal de consumo de aire comprimido de la instalación**

Para la determinación del caudal de consumo se identificaron y enlistaron los diferentes módulos neumáticos que cuenta el laboratorio para el uso del cuerpo estudiantil. En dichos módulos se determina los actuadores neumáticos principales tales como; cilindros de simple y doble efecto, motores neumáticos y otros accesorios.

El caudal consumido por cilindro de simple efecto se calcula mediante la Ecuación 3 y la Ecuación 4. A continuación, se calcula el caudal consumido por un cilindro de simple efecto del módulo DEGEM SYSTEM PN-2140, HUMPHREY CY1-49003, del cual sus datos son:

$$s = 3.76 \text{ [cm]}$$

$$n = 10 \text{ [cpm]}$$

$$D = 1.4379 \text{ [cm]}$$

$$P = 7 \text{ bares} = 700 \text{ [kPa]}$$

- Relación de compresión

$$R_c = \frac{101.3 + 700 \text{ kPa}}{101}$$

$$R_c = 7.9101$$

- Cantidad de aire

$$\dot{V} = 3.76 \text{ cm} * 10 \text{ min} * \frac{(1.4379 \text{ cm})^2 * \pi}{4} * 7.9101 * \frac{1}{1000}$$

$$\dot{V} = 0.482966 \text{ [l/min]}$$

Para la determinación del caudal consumido para un cilindro de doble efecto se utiliza la Ecuación 5 y la Ecuación 4. A continuación, se calcula el caudal consumido por un cilindro de doble efecto del módulo neumático DEGEM SYSTEM PN-2120, HUMPHREY CY2-49003, del cual sus datos son:

$$s = 7.52 \text{ [cm]}$$

$$n = 10 \text{ [cpm]}$$

$$D = 1.4379 \text{ [cm]}$$

$$d = 0.4769 \text{ [cm]}$$

$$P = 7 \text{ bares} = 700 \text{ [kPa]}$$

- Relación de compresión

$$Rc = \frac{101.3 + 700 \text{ kPa}}{101}$$

$$Rc = 7.9101$$

- Cantidad de aire

$$\dot{V} = \left[ 7.52 \text{ cm} * \frac{(1.4379 \text{ cm})^2 * \pi}{4} + 7.52 \text{ cm} * \frac{[(1.4379 \text{ cm})^2 - (0.4769 \text{ cm})^2] * \pi}{4} \right] * 10 \text{ min} * 7.9101$$

$$* \frac{1}{1000}$$

$$\dot{V} = 1.8256 \text{ [l/min]}$$

Cada módulo dependiendo de la marca tendrá dimensiones diferentes para sus actuadores, el cálculo de la cantidad de aire para todos los actuadores se detalla en el Anexo A, para la determinación de la cantidad de aire necesaria de los motores neumáticos se lo obtuvo directamente de su placa de datos.

Una vez calculada la cantidad de aire individual en el Anexo B se procede a contabilizar los actuadores totales y dependiendo del módulo y su número de actuadores se implementa un factor de uso y simultaneidad para obtener el consumo real, que se resumen en la Tabla 10.

**Tabla 10***Caudal real de consumo por módulo*

MARCA	MÓDULO	SERIE	CANTIDAD	CAUDAL (l/min)
DEGEM SYSTEM	PN-2140	CY1 MI-49003 (Basic Pneumatics)	3	24,06854835
	PN-2120	CY2 MI-49003 (Basic Pneumatics)	3	3,83382808
		CY3 MI-49003 (Basic Pneumatics)	3	0,9128167714
	PN-2330	CY1 MI-49003 (Basic Pneumatics)	3	1,380486902
		CY2 MI-49003 (Basic Pneumatics)	3	5,088705281
		CY3 MI-49003 (Basic Pneumatics)	3	3,452476999
	PN-2220	ADVANCE PNEUMATICS	3	8,001
	PN-2230	ADVANCE PNEUMATICS	3	0,4137
HERION	6251147	CILINDRO DOBLE EFECTO 6251147	1	9,588648093
	6251146	CILINDRO SIMPLE EFECTO 6251146	1	2,135827569
FESTO MPS	Transporte y discriminación de discos	AIRTAC MI16X100-S- CA	1	0,232
		AIRTAC MI16X50-S-CA	1	0,232
		AIRTAC DSR	1	1,524
	Verificación y escariado de piezas mecánicas	AIRTAC RMS F – 16*300-LB-T	1	2,290229749
		AIRTAC HFZ 16R	1	0,5928355133
		AIRTAC SDAS 20*50	1	1,267379744

MARCA	MÓDULO	SERIE	CANTIDAD	CAUDAL (l/min)
		AIRTAC AIR MI 25*50-S-SA	1	1,428908535
		AIRTAC AIR ACK-25*90	1	88
		AIRTAC 327 LS	1	144
	Almacenamiento/recuperación (as/rs)	FESTO DGPL-32-520-PPV-A-KF-B	1	1,323243855
		FESTO DGPL-32-520-PPV-A-KF-B	1	1,323243855
		CHINT 32 BORE	1	2,460406543
	Sistema de clasificación	AIRTAC MI 25*25	1	0,7144542676
		AIRTAC MI 25*25	1	0,7144542676
	TP-201	FESTO 152887	1	30,81472319
	TP-202	FESTO 152888	1	9,542623954
FESTO		FESTO 152501	1	16,12703448
	TP 111	FESTO 152912	1	8,387071838
TOTAL				369,8506478

*Nota.* En la tabla se muestran los valores de caudal de consumo reales por cada módulo implementado un factor de uso y de simultaneidad.

Así el caudal real será de 369,8506478 [l/min] o 13,06115237 [CFM], pero la instalación requiere la implementación de un caudal proyectado en 5 años del 50 % del consumo actual, de esta manera se calcula un incremento 6.5305 [CFM], con estos dos caudales se determina el caudal global de la instalación mediante la Ecuación 7.

- Caudal real

$$Q_R = 13,06115237 \text{ [CFM]}$$

- Caudal proyectado en la instalación a 50 %

$$Q_P = 6.530576185[CFM]$$

- Caudal global de aire comprimido

$$Q_G = 13,06115237CFM + 6.530576185 [CFM]$$

$$Q_G = 19.5917 CFM = 33.2865 [m^3/h]$$

Por lo tanto, el caudal global para la instalación será de 19.5917 [CFM].

### **Trazado de la red**

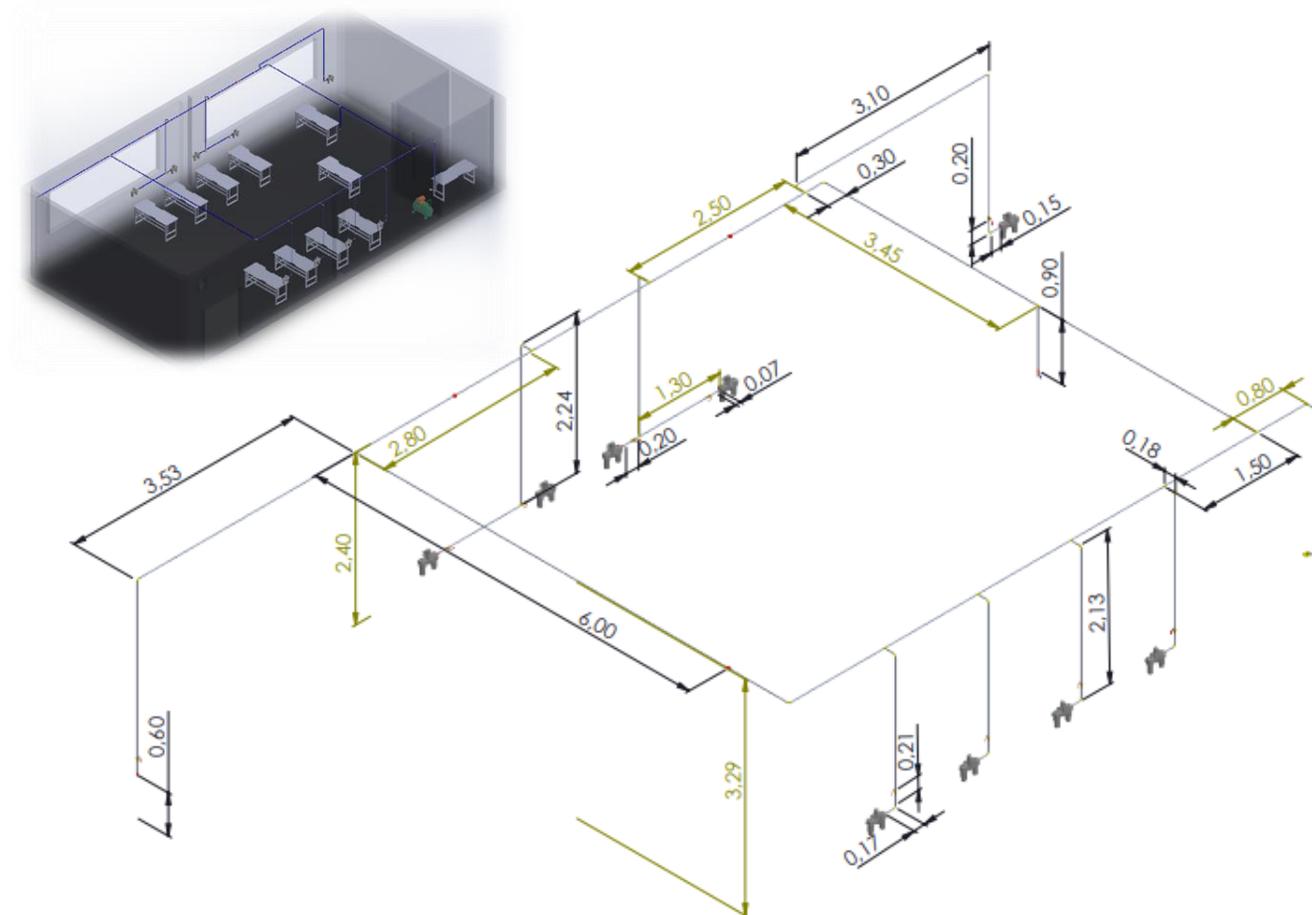
El trazado de la red que se eligió para el laboratorio fue la topología en anillo cerrado, esta permitirá que las pérdidas de presión disminuyan al momento de su utilización. La red constará con un total de 9 salidas reguladas con su unidad de mantenimiento correspondiente y una salida no regulada ubicada en el centro del laboratorio, además de la ubicación de una purga de fin de línea en la esquina opuesta del compresor. El diseño se lo realizó tomando en cuenta la ubicación de las vigas dentro del laboratorio que facilitan la sujeción de las tuberías para formar el anillo e implementar al momento de la instalación una inclinación del 2% que mejorará el direccionamiento de los condensados hacia la purga manual, Plano A y Plano B.

### **Longitud de la tubería**

Una vez que se ha determinado la topología de la red y se ha determinado la ubicación de las tomas de aire, se determina a continuación la longitud aproximada de la instalación, para ello se realiza un modelo en 3 dimensiones con el Software Solid Works con las medidas reales de las instalaciones, en la Figura 20 se muestra este diseño.

**Figura 20**

*Diseño 3D del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica*



*Nota.* EL gráfico representa una vista en 3 dimensiones de la instalación de la red de aire comprimido dentro del laboratorio en anillo cerrado.

Cada una de las bajantes se encuentra a una distancia de 1.20 [m] desde el piso del laboratorio para asegurar una correcta manipulación de las tomas reguladas, a excepción de las 2 bajantes que se encuentran por debajo de la ventana, las cuales se encuentran a una distancia desde el suelo de 90 [cm] ya que a [1.20 m] estas estarían sobre el borde inferior de las dos ventanas principales y obstaculizarían las mismas. La bajante no regulada tiene una longitud de 90 [cm] desde la parte superior de la tubería, para no obstaculizar el uso del laboratorio, en el Plano C y Plano D se detallan las longitudes del diseño, obteniendo una longitud de tubería aproximada de 60.49 [m].

## Diámetro de tubería

Para la determinación del diámetro de la tubería y que el caudal pueda satisfacer los requerimientos de nuestra instalación se tomará en cuenta el caudal global de consumo, la longitud de la tubería, la presión de trabajo y una variación de presión de 10 [kPa]. Existen varios métodos para la determinación del diámetro, como el nomograma de la Figura 16 detallado en el capítulo anterior, además de la Ecuación 8 que permite determinar el diámetro de manera exacta utilizando las variables antes mencionadas.

$$d = \sqrt[5]{(1.6 * 10^3) * (0.00916 \frac{m^3}{s})^{1.85} * \frac{60.49 m}{10000 Pa * 800000 Pa}}$$

$$d = 0.01829 m = 18.29 [mm]$$

En este caso el diámetro interno será de 18.29 [mm], pero este es un diámetro provisional, ya que la influencia de los distintos tipos de accesorios en la red de distribución aumenta a la longitud inicial una longitud ficticia que se deberá tomar en cuenta para realizar un recálculo del diámetro de acuerdo a la Figura 17, los elementos y sus longitudes se detallan en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Longitudes equivalentes de los accesorios de la red*

Item	Elemento	Cantidad	Longitud equivalente (m)	Longitud Total (m)
1	Válvula esférica	12	0.22	2.64
2	Desviación T	12	1.45	17.4
3	Codo 90°	18	0.2	3.6
TOTAL				23.64

*Nota.* En la tabla se muestran los valores de longitudes equivalentes para los accesorios principales de la red de distribución.

Ahora con la longitud total equivalente de los accesorios de la red de 23.64 [m] se determinará la longitud global de la instalación.

### Ecuación 9

*Longitud global*

$$L_G = L_T + L_{Ac}$$

Donde:

$L_G$ : Longitud global de la instalación [m]

$L_T$ : Longitud total [m]

$L_{Ac}$ : Longitud suplementaria de los accesorios [m]

$$L_G = 60.49 \text{ m} + 23.64 \text{ m} = 84.13 \text{ [m]}$$

Con el resultado de 84.13 [m] se realiza a continuación un recálculo para la determinación del diámetro final de la instalación.

$$d = \sqrt[5]{(1.6 * 10^3) * (0.00916 \frac{m^3}{s})^{1.85} * \frac{84.13 \text{ m}}{10000 \text{ Pa} * 800000 \text{ Pa}}}$$

$$d = 0.01954 \text{ m} = 19.54 \text{ [mm]}$$

Se determina por lo tanto un diámetro de tubería de 19.54 [mm], sin embargo, en el mercado el valor más cercano es de 20 [mm]. Se utilizará el mismo valor del diámetro para la tubería principal y las tuberías de las bajantes, ya que es el mínimo valor de diámetro de tuberías existentes en el mercado para aire comprimido.

### Material de la tubería

La tubería para aire comprimido puede ser de distintos materiales como se mencionó en el capítulo anterior, para su selección se debe tomar en cuenta muchos factores como el costo, presión de trabajo, temperatura de funcionamiento, facilidad en el montaje y la norma aplicable.

Según la Norma INEN 440 las tuberías para aire comprimido deberán ser identificadas de color azul, es por ello que se seleccionó tubería de aluminio especializada para aire

comprimido de la marca INFINITY de 20 [mm], ya que esta tubería permite el montaje de la red con accesorios especializados sin la necesidad de realizar roscados en sus extremos facilitando la instalación y desmontaje por futuros mantenimientos, las características principales de la tubería se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Características de la tubería de aluminio para aire comprimido*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Diámetro	20 [mm]
Longitud	6 [m]
Presión Máxima	16 [bar]/ 232 [psi]
Temperatura de Funcionamiento	-20 [°C]/ +80 [°C]
Par de Apriete	3 [Nm]

Nota. La tabla muestra las características principales de la tubería de aluminio seleccionada para la red de distribución de aire comprimido.

### **Unidades de mantenimiento**

Para la selección de las unidades de mantenimiento será necesario tomar en cuenta la presión de trabajo de 7 [bar], el caudal de la red 19.59 [CFM], y la aplicación en la cual será utilizada el aire comprimido. De acuerdo a la Tabla 6 y Figura 8 se selecciona una unidad con un filtro estándar ya que cada módulo que será alimentado ya posee un micro filtro adicional al cual se conectará la red principal. Además de la ubicación de un filtro principal a la salida del compresor con la finalidad de retener la mayor cantidad de agua de la instalación.

Finalmente se ha seleccionado una unidad de mantenimiento cuyas características se muestran en la Tabla 13.

**Tabla 13**

Características de la unidad de mantenimiento

<b>Característica</b>	<b>Valor FRL</b>	<b>Valor filtro</b>
Presión Máxima	10 [bar]]	10 [bar]]
Temperatura de Funcionamiento	5 [°C]/ 60 [°C]	60 [°C]
Tipo de filtro	Estándar	Principal

*Nota.* La tabla muestra las características principales de la unidad de mantenimiento de la marca utilizada en las 9 salidas reguladas de la instalación.

#### **Análisis de selección de secador**

Para la selección del secador se tomará como datos el caudal global de la instalación de 19.5917 [CFM] o 33.28 [m<sup>3</sup>/h], además del punto de rocío de la localidad. El punto de rocío se lo obtuvo mediante la Aplicación Web del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en su estación meteorológica M004 ubicada en Rumipamba- Salcedo, se ocupará los datos proporcionados por esta estación por ser la más cercana al campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14**

Datos meteorológico- Estación M004

<b>Datos meteorológicos- Estación M0004</b>	
Código	M0004
Provincia	Cotopaxi
Cantón	Salcedo- Rumipamba
Altitud	2685.00 [msnm]
Latitud	-1.020000
Longitud	-78.594600
Precipitación promedio anual	719.2 [mm]
Temperatura media anual	14 [°C]
Humedad relativa media anual	75 [%]
Punto de rocío media anual	9.3 [°C]

*Nota.* La tabla muestra los datos meteorológicos de la estación M004 Salcedo- Rumipamba.

Tomado de INAMHI (2022).

Una vez conocido el punto de rocío de 9.3 [°C] y utilizando el nomograma de la Figura 16 se determina que el secador de membrana es el adecuado para la red de aire comprimido, sin embargo, un secador de aire comprimido será necesario siempre y cuando la calidad del aire lo requiera, la Tabla 9 determinó que la calidad de aire necesaria para nuestra instalación será de 5 por lo tanto no es necesario la implementación de este accesorio, además que la implementación de este dispositivo aumentará considerablemente los costos de instalación, sin embargo para futuras aplicaciones en donde los equipos del laboratorio necesiten que la calidad del aire sea entre 1 y 3 se deberá implementar un secador de membrana con las características de la Tabla 15.

**Tabla 15**

Datos técnicos secador del secador de membrana Atlas Copco

<b>Datos técnicos secador de Membrana</b>	
Marca	Atlas Copco
Código	SD 3P7
Presión	10 [bar]
Caudal	25.4 [CFM]
Purga	11 [%]
Caída de presión	2.5 [psi]
Conexión	G ½
Peso con filtro	1.7 [kg]
Peso sin filtro	4.0 [kg]
Filtro	DD9-PD9

*Nota.* La tabla muestra los datos técnicos del secador SD 3P7 para futuras implementaciones.

Tomado de Atlas (2023).

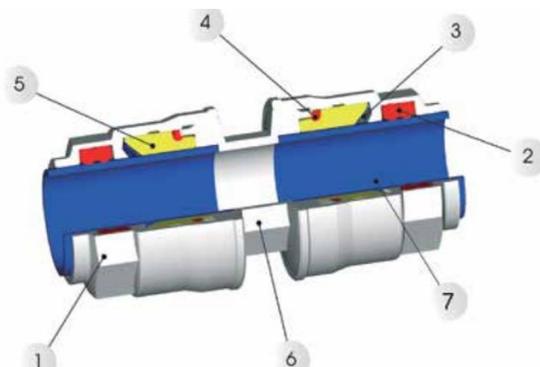
### **Selección de accesorios**

Los accesorios principales para una red de aire comprimido son: las válvulas esféricas, desviaciones en T y codos de 90°, los cuales se detallan en la Tabla 11. El material para la tubería será de aluminio y para facilitar la instalación se ha seleccionado accesorios con ajuste por anillo de seguridad de tecnopolímero y junta tórica NBR como se muestra en la Figura 21.

En donde: (1) Tuerca en latón niquelado, (2) Junta en NBR, (3) Pinza de sujeción en INOX AISI 304, (4) Junta tórica NBR, (5) Anillo de seguridad en tecnopolímero, (6) Cuerpo en latón niquelado, (7) Tubo de aluminio extrusionado calibrado y pintado.

## Figura 21

### Sistema de sujeción para accesorios de aire comprimido



*Nota.* El gráfico muestra el sistema de sujeción usado para un racor recto de aire comprimido y sus partes numeradas. Tomado de AIGNEP (2021).

Para el montaje de la tubería en estos accesorios es muy sencilla, y se puede realizar en dos pasos:

- Introducir la tubería de aluminio hasta el fondo del racor.
- Apretar la tuerca utilizando los valores de esfuerzo de torsión que se muestran en la Tabla 16.

## Tabla 16

### Par de apriete para racores Infinity

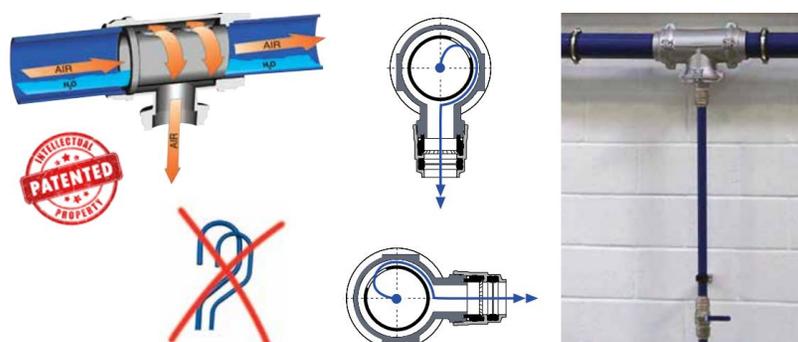
Diámetro (mm)	Par de Apriete (Nm)
20	3
25	3
32	4
40	6.5

*Nota.* La tabla muestra el par de apriete utilizado en la tuerca para un racor Infinity de diferentes diámetros. Tomado de AIGNEP (2021).

Con el objetivo de optimizar el diseño y la cantidad de materiales a utilizar, para cada una de las bajantes se ha decidido por utilizar racores especiales anti condensados, los cuales sustituyen la utilización de los cuellos de cisne permitiendo que el aire dirigido hacia cada una de las tomas contenga una mínima cantidad de condensados, esta tecnología para bajantes se muestra en la Figura 22.

## Figura 22

### *Racor T para bajante*



*Nota.* El gráfico muestra el sistema de racor en T para bajantes anti condensados que reemplaza el uso de cuellos de cisne. Tomado de AIGNEP (2021).

Las válvulas esféricas, las desviaciones en T normales y codos de 90° utilizan la misma tecnología de acople rápido para su instalación, las especificaciones técnicas y dimensiones se detallan en el Anexo C.

## Selección del compresor

Los puntos que intervendrán en la selección del compresor son: presión máxima, caudal necesario luego del estudio de demanda, volumen del tanque de almacenamiento, ruido, precio, voltaje de funcionamiento, tipo de transmisión. De acuerdo a los puntos anteriores en el mercado existen dos tipos de compresores: compresores de tornillo y compresores de pistón, cuyas características y ventajas se detalló en el capítulo anterior. El costo de un compresor de tornillo es 3 veces la cantidad de un compresor de pistón para el mismo caudal y la misma presión, pero su principal característica es que son silenciosos, con un intervalo entre los 60 y

70 [dBA], sin embargo, actualmente los compresores de pistón también pueden funcionar a niveles de ruido cercanos a los de tornillo. Por lo tanto, la presente selección se basará en la selección de un compresor de pistón que preste las características necesarias para el funcionamiento correcto, además de un índice de ruido permitido en áreas educativas.

La selección se centrará en el compresor de pistón PORTEN PCO-5530V lubricado con aceite y transmisión por banda y el compresor de pistón PORTEN PCO-6200S sin aceite y transmisión directa, la Tabla 17 muestra las características principales de estos compresores.

**Tabla 17**

*Características principales de compresores de pistón PORTEN*

<b>Características</b>	<b>PCO-5530V</b>	<b>PCO-6200S</b>
Motor	4.1 [kW]-5.5 [HP]	4.7 [kW]-6 [HP]
Voltaje	220 [V]- Monofásico	220 [V]- Monofásico
Caudal	550 [l/min]-19.4 [CFM]	588 [l/min]-21 [CFM]
Tanque	300 [L]-80 [gal]	200 [L]-53 [gal]
Presión Máxima	125 [PSI]-8.6 [bar]	116 [PSI]-8 [bar]
Transmisión	Por banda	Directa
Nivel de Ruido	>72 <80 [dBA]	<70 [dBA]

*Nota.* La tabla muestra las características principales de dos compresores de pistón PORTEN para la selección de la red de aire comprimido. Tomado de PORTEN (2021).

El estudio de la demanda de aire comprimido dio como resultado un caudal necesario de 19.59 [CFM] y 7 [bar] de presión de trabajo, y de acuerdo a la Tabla 17 el compresor seleccionado será el PORTEN PCO-6200S debido a que cumple mejor con las características de funcionamiento de la instalación, además de que su nivel de ruido es menor para trabajar en instalaciones educativas.

## Capítulo IV

### Recomendaciones de Operación y Mantenimiento

#### **Mantenimiento de la red de aire comprimido**

Al realizar un plan de mantenimiento para la red de aire comprimido del laboratorio, se pretende que se mantenga funcionando continuamente en perfectas condiciones, además de alargar la vida útil de los componentes y de los equipos, se lo realizará al implementar una guía sistemática, que detalla los tiempos exactos de mantenimiento.

#### ***Situación actual de la red de aire comprimido***

La generación de aire comprimido para el laboratorio de Hidrónica y Neutrónica se utiliza un compresor que se alimenta con una alimentación de 220 [V] monofásico silencioso de 6 [HP] con una capacidad de 21 [CFM], abarcando el caudal en plena carga de todos los equipos neumáticos del laboratorio

#### ***Ubicación y funcionamiento del Compresor***

La ubicación del compresor está destinada en un área del laboratorio específica que no afecta a la movilidad de los estudiantes. El funcionamiento es sencillo se coloca la alimentación respectiva y se procede a activar los dos interruptores termomagnéticos, activando los tres motores que almacenarán el aire comprimido en el tanque de 200 [l], para posteriormente mediante la válvula esférica permitir el paso a la instalación de aire comprimido, llegando a todos los puestos de trabajo implementados.

#### ***Encargados del mantenimiento de la red de aire comprimido***

Los responsables del mantenimiento son todas las personas que van a estar inmersos en la utilización del aire comprimido.

Los docentes que imparten las asignaturas referentes a neumática, colaborarán con la aplicación del respectivo plan de mantenimiento.

Los estudiantes al estar en contacto directo con la red de aire comprimido, desarrollarán las prácticas con una guía previa del tema que aborde la utilización y mantenimiento de la red.

### ***Codificación de elementos de la red de aire comprimido***

La codificación se lleva a cabo para una breve identificación de los elementos que conforman la red de aire comprimido, para que los encargados del mantenimiento puedan registrar las actividades rápidamente y sin inconvenientes.

La codificación se va a plantear al principio con 3 letras mayúsculas que definirán a la red de aire comprimido en este caso se colocará las iniciales: (RAC), las cuales irán acompañadas de un número que definirá la cantidad de elementos del mismo tipo, pero diferentes características que existan en la red. Un ejemplo si tenemos dos compresores su codificación será: (RAC1 y RAC2) respectivamente.

En la parte intermedia se describen las 3 primeras iniciales en mayúsculas del elemento y en la parte final se irán enumerando los elementos que existen en la red. Siguiendo el ejemplo del compresor su codificación final se detalla de la siguiente manera: (RAC1-COM-01).

Se definen a continuación todas las codificaciones de los elementos de la red de aire comprimido.

**Tabla 18***Codificación de los elementos de la red de aire comprimido*

<b>Elemento</b>	<b>Código</b>
Compresor	RAC1-COM-01
Filtro	RAC1-FIL-02
Regulador	RAC1-REG-03
Lubricador	RAC1-LUB-04
Purgador	RAC1-PUR-05
Tubería 20 [mm] y Accesorios	RAC1-TUB-06
Válvula esférica	RAC1-VAL-07
Manguera y Acoples	RAC1-MAN-08

*Nota.* La tabla muestra la codificación de los elementos que componen la red de aire comprimido.

### ***Orden de trabajo de mantenimiento***

Para que se cumplan todas las tareas del plan de mantenimiento, se requiere implementar una orden de trabajo, para designar al personal las actividades que se pretendan realizar en la red, que serán llevadas a cabo con su respectivo orden y respetando los plazos establecidos Anexo D.

### ***Plan de mantenimiento***

Para que la red de aire comprimido funcione en perfectas condiciones y alargar su vida útil es necesario gestionar un plan de mantenimiento preventivo, en el cual se va a detallar ciertas tareas en tiempos definidos, las cuales se ha realizado acorde a las recomendaciones

de los catálogos de fabricación de los elementos de la red y de las personas que tienen experiencia en el tema Anexo E.

## **Recomendaciones de operación**

### ***Equipos***

**Compresor.** El compresor se ha seleccionado en base al caudal de uso del laboratorio, el cual cuenta con pistones de doble etapa en línea que disminuyen considerablemente el ruido. Una de las recomendaciones más importante para la operación del compresor es que se deben evacuar los condensados al menos una vez a la semana.

**Purgado de condensados.** Es esencial colocar un sistema de purgado de condensados, debido a que en el interior de la tubería van a existir este tipo de fluidos que al estar en contacto con los equipos neumáticos van a provocar daños, debido a que su funcionamiento es netamente con aire, es por ello que se debe colocar la tubería con una inclinación considerable para que los condensados se dirijan a la purga y de esta manera evacuar estos contaminantes.

**Válvulas esféricas.** Las válvulas esféricas son de diámetro nominal  $\frac{3}{4}$ , sirven para dejar que fluya el aire hacia los equipos neumáticos logrando activarlos y funcionen sin inconvenientes, cuando la red no presenta ninguna anomalía, lo que conlleva a que la misma se encuentre en perfectas condiciones de funcionamiento.

También sirven para bloquear completamente el fluido, esta acción se realiza cuando la instalación presenta daños en su sistema, lo que nos permite evacuar la zona y proceder al respectivo mantenimiento.

**Unidades de mantenimiento FRL.** Al final de la instalación es imprescindible colocar una unidad de mantenimiento FRL, que consiste en un Filtro, Regulador y Lubricador.

El filtro va estar ubicado en primera instancia en la unidad el cual con la ayuda de la misma presión del aire va a eliminar todos los contaminantes, dejando el aire completamente limpio para entrar a la siguiente etapa.

El regulador nos va a permitir ajustar la presión de funcionamiento. Cada equipo necesita una presión diferente para operar y es esencial que lo respetemos, para no tener daños en los equipos.

Al final de la unidad va actuar el lubricador con el cual vamos a suministrar aceite a los equipos, para que de esta manera se lubriquen internamente sus mecanismos y así alargar su vida útil.

**Red de tuberías.** La red principal está compuesta por un anillo cerrado de 20 [mm]. La red secundaria se encuentra compuesta por 9 bajantes de 20 [mm] las cuales se encuentran acopladas a una válvula esférica y a una unidad de mantenimiento FRL, además se cuenta con una bajante no regulada de 20 [mm].

### ***Pasos para la operación de la red de aire comprimido***

Se han desarrollado los pasos que se debe seguir para que la red de aire comprimido opere correctamente, para lo cual se detalla en el Anexo F.

## Capítulo V

### Análisis de Resultados

#### Pruebas de funcionamiento del compresor

##### *Tiempo de carga en vacío del compresor*

La presión de funcionamiento de la red de aire comprimida es de 7 [bar], por lo cual en el compresor se ajusta a este valor. Al iniciar con el funcionamiento de la red por primera vez, el compresor va estar en vacío, el tiempo que va a tardar en llenarse el tanque de 200 [l] será de aproximadamente 04.23 [min].

#### Figura 23

*Presión de funcionamiento de la red de aire comprimido*



*Nota.* Ajuste de la presión en el compresor, acorde al funcionamiento de la red de aire comprimido del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L. Sede Latacunga.

***Tiempo de carga de aire en la red de aire comprimido***

Al finalizar la implementación de la red de aire comprimido se encuentra totalmente en vacío, para lo cual se requiere insertar aire comprimido que es generado desde el compresor. Al insertar el fluido en la tubería deben estar todas las válvulas esféricas completamente cerradas. Al dar paso al aire comprimido mediante su respectiva válvula esférica hacia la instalación tenemos un tiempo aproximado de llenado de 7.85 [s].

Este tiempo es muy eficaz porque al tener una red de aire comprimido para 9 tomas y una toma no regulada, va a llegar el fluido rápidamente hacia los puntos requeridos, existiendo caídas de presión que van a estar acorde a la estandarización de redes de aire comprimido.

***Tiempo de descarga a plena carga en funcionamiento***

El presostato del compresor se encuentra ajustado inicialmente para accionar los motores en 4 [bar] generando aire comprimido, que será almacenado en el tanque de 200 [l] y distribuido hacia la red. Al llegar a una presión de 7 [bar] los motores se apagarán automáticamente, de esta manera operara el compresor, cuando detecte las variables ya descritas anteriormente.

El tiempo de descarga a plena carga con un consumo de 19.59 [CFM], hasta llegar a la presión de 4 [bar], cuando el control del compresor active a los motores será de aproximadamente de 3.56 [min].

***Tiempo de descarga de funcionamiento real***

Los docentes imparten conocimiento en la cátedra de neumática a varias carreras de la Universidad, donde los estudiantes tienen aproximadamente 8 [h] a la semana de clases, donde los docentes imparten 4 [h] de teoría y 4 de práctica. Los estudiantes fuera del horario

de clases acuden al laboratorio aproximadamente unas 6 [h], llegando a utilizar el laboratorio aproximadamente unas 10 [h] a la semana.

Los módulos utilizados son específicos para cada tema, es por ello que todos los módulos no están en funcionamiento continuamente. Al realizar una práctica de laboratorio, utilizando todos los módulos neumáticos de la marca DEGEM SYSTEM tenemos un caudal de 1.53 [CFM] que se detalla en el ANEXO G. Al realizar un análisis con el tiempo de carga en plena carga en funcionamiento tenemos lo siguiente:

**Tabla 19**

*Análisis de funcionamiento real y a plena carga*

<b>Consumo</b>	<b>Caudal (CFM)</b>	<b>Tiempo Funcionamiento (min)</b>
Real	1.53	45.52
Plena Carga	19.59	3.56

*Nota.* Tiempo de consumo real y a plena carga, hasta que el valor del manómetro del compresor marque 4 [bar].

Al encontrarnos en condiciones reales de funcionamiento el tiempo estimado que se prenderá el compresor es de 45.52 [min]. Este cálculo es cuando los cilindros se encuentran funcionando continuamente. Si tomamos en cuenta el tiempo en que los estudiantes realizan sus prácticas que es de dos horas; solo activaran y desactivaran los cilindros continuamente aproximadamente unos 10 [min], tomando en cuenta en este tiempo las pruebas que realicen y la presentación final al docente, el tiempo restante lo van a ocupar para armar y desarmar el circuito, con lo cual el compresor no se va a encender durante la práctica, logrando de esta manera que el ruido que emite el mismo no distraiga a los alumnos, lo que puede causar inconvenientes en su aprendizaje.

## Pruebas de Caída de presión

### *Prueba de caída de presión en vacío*

La prueba en vacío consiste en abastecer de aire a todos los equipos neumáticos, teniendo en cuenta que tenemos 9 tomas reguladas y 1 toma no regulada, con lo cual la presión no debe exceder del 10%, la presión que hemos tomado en cuenta es de 7 [bar], en la Tabla 20 se detalla las medias registradas en esta prueba.

**Tabla 20**

### *Prueba de caída de presión en vacío*

N.º de toma	Presión (bar)	Imagen
1	6.40	
2	7.25	
3	7.05	
4	7.10	
5	6.55	
6	6.25	

N.º de toma	Presión (bar)	Imagen
7	6.35	
8	7.05	
9	6.90	
<b>Media</b>	<b>6.77</b>	

*Nota.* Se detalla en el manómetro las presiones de las 9 tomas y su respectiva media.

Al aplicar la prueba de caída de presión en vacío y realizar una media de las presiones de cada una de las tomas, que en total son nueve puestos de trabajo, tenemos un valor de 6.77[bar], como se muestra en la Tabla 20.

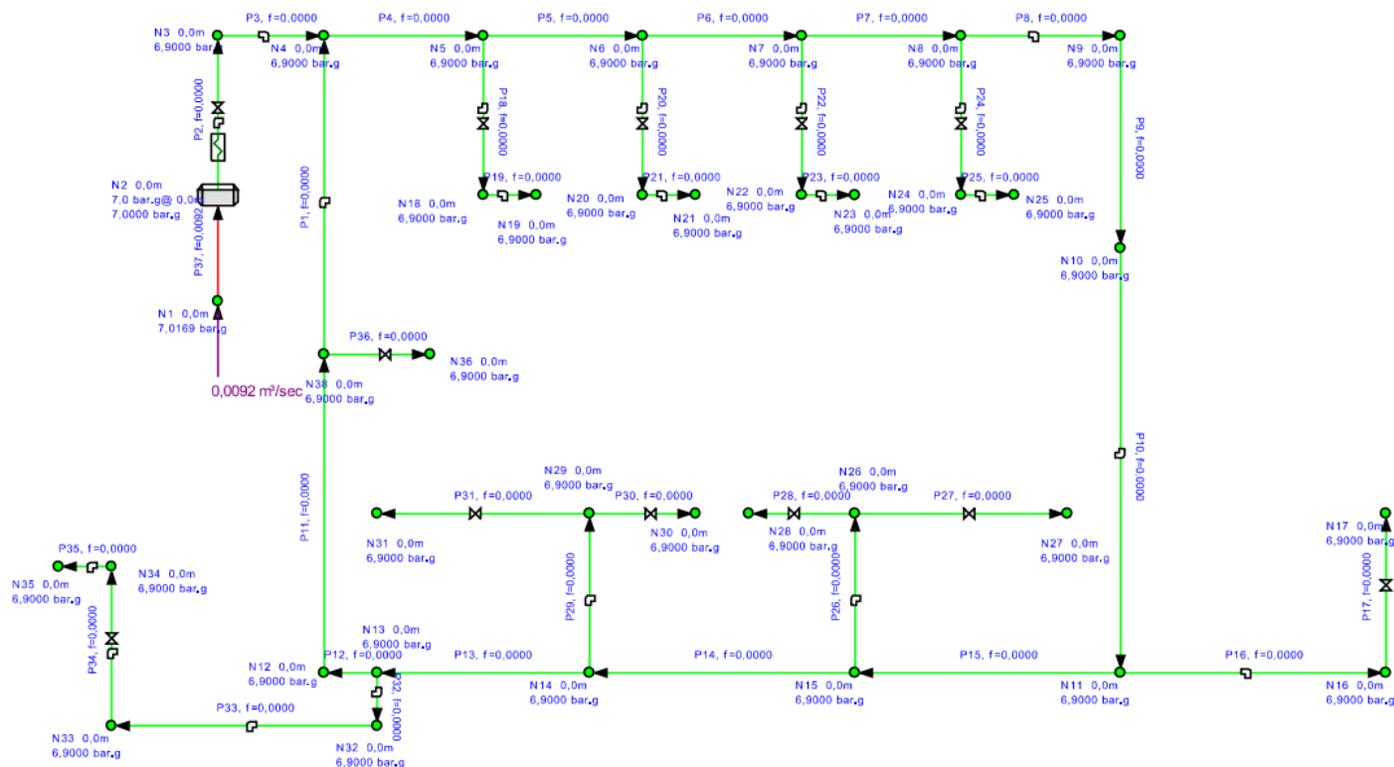
Esta presión es aceptable, debido a que la caída de presión máxima es del 10% que equivale a 6.3 [bar]. El porcentaje del promedio de esta prueba es del 3.28 %, con lo cual la instalación va a trabajar eficientemente y sin complicaciones.

### ***Simulación de caídas de presión en vacío***

Se analizó la simulación de las caídas de presión en vacío, en el Software Pipe Flow, en toda la red de aire comprimido, como se muestra en la Figura 24.

Figura 24

Simulación prueba en vacío.



*Nota.* La Imagen muestra la simulación de la prueba en vacío en el Software Pipe Flow.

Los nodos N17, N19, N21, N23, N25, N27, N28, N30 y N31 muestran las nueve tomas reguladas de la instalación real de red de aire comprimido, el nodo N38 idea la toma no regulada. Al realizar la simulación se obtiene una presión de 6.90 [bar] en todos los nodos antes mencionados, sus valores se relejan en el Anexo H, lo cual contiene un error del 1.42%; en la Tabla 20 se muestra el valor real de la prueba que es de 6.77 [bar] con un error del 3.28%; que es aceptable ya que en la parte práctica es ideal el 10%, pero con menos del 5% trabaja sin complicaciones.

### ***Prueba de caída de presión en funcionamiento***

La presión más baja que va a llegar a marca el manómetro del compresor es de 4[bar], para lo cual, en la prueba de caída de tensión en funcionamiento, se accionarán todos los puestos de trabajo, activando los módulos neumáticos correspondientes, llegando a su presión mínima de funcionamiento, dicha presión se verá reflejada en todos los nueve manómetros con una caída presión admisible del 10%. Se muestran las medidas de las pruebas en la Tabla 21.

**Tabla 21**

*Prueba de caída de presión en funcionamiento*

<b>N.º de toma</b>	<b>Presión (bar)</b>	<b>Imagen</b>
1	3.8	
2	3.95	
3	3.8	
4	4.1	
5	3.5	
6	3.8	

N.º de toma	Presión (bar)	Imagen
7	3.8	
8	4	
9	4	
<b>Media</b>	3.86	

*Nota.* Se detalla en el manómetro las presiones de las 9 tomas y su respectiva media.

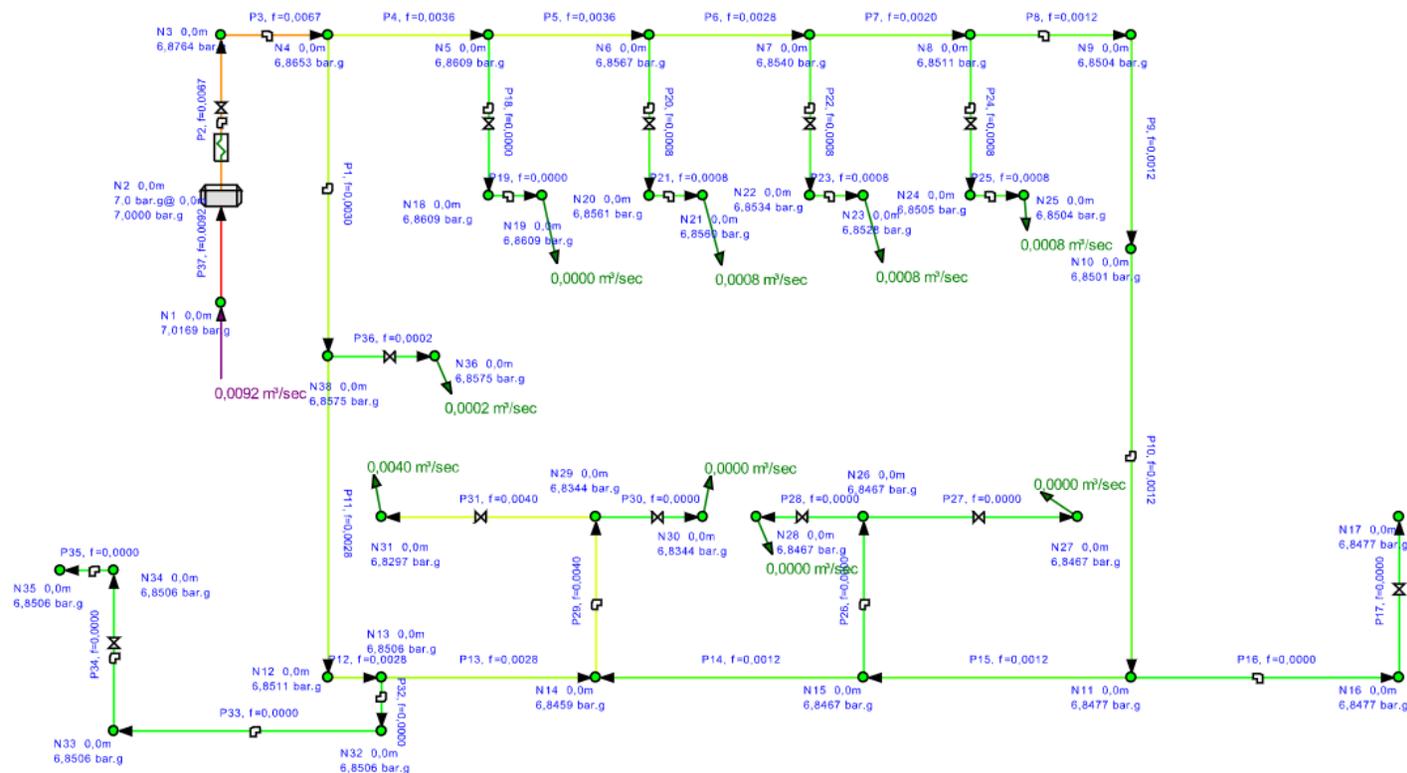
La presión mínima de funcionamiento de la red de aire comprimido es de 4 [bar], en ese momento se debe accionar el compresor hasta llegar a la presión máxima de 7 [bar], en este caso la presión mínima debe tener un error máximo del 10%, en la prueba realizada tenemos una media de 3.86 [bar], como se muestra en la Tabla 21, lo que representa un error del 3.5%, que es aceptable, lo que permitirá que la red de aire comprimido, a su presión mínima trabaje en condiciones estables.

### ***Simulación de caídas de presión en funcionamiento***

Se analizó la simulación de las caídas de presión en funcionamiento, en el Software Pipe Flow, en toda la instalación, como se muestra en la Figura 25.

Figura 25

Simulación prueba en funcionamiento.

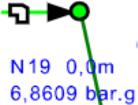
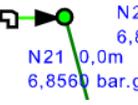
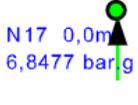
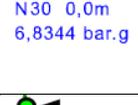
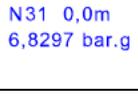


Nota. La Imagen muestra la simulación de la prueba en funcionamiento en el Software Pipe Flow.

Los nodos N19, N21, N23, N25, N17, N27, N28, N30 y N31 representan las nueve tomas reguladas de la red de aire comprimido, el nodo N38 muestra la toma no regulada, los valores se detallan en la Tabla 22. Los valores de todos los nodos de la Figura 25 se evidencian en el Anexo I.

**Tabla 22**

*Simulación de caída de presión en funcionamiento*

N.º de toma (Nodo)	Presión (bar)	Imagen
Toma 1, Nodo N19	6.860	
Toma 2, Nodo N21	6.856	
Toma 3, Nodo N23	6.852	
Toma 4, Nodo N25	6.850	
Toma 5, Nodo N17	6.847	
Toma 6, Nodo N27	6.846	
Toma 7, Nodo N28	6.846	
Toma 8, Nodo N30	6.834	
Toma 9, Nodo N31	6.829	
<b>Media</b>	6.845	

*Nota.* Se muestra los valores de la simulación, en los nodos referentes a las tomas de la red de aire comprimido.

La simulación en funcionamiento nos arroja un valor de 6.845 [bar] que representa un error del 2.21%, el cual está en el rango de funcionamiento óptimo. Tomar en cuenta que para la simulación no se consideró el tanque de almacenamiento, las variables que intervinieron fueron: el caudal de las tomas y la presión constante de 7 [bar], es por ello que los valores y procesos de las pruebas de funcionamiento que se muestra en la Tabla 21 y de la simulación de la Tabla 22, son diferentes, pero en los cuales, al realizar una analogía técnica los resultados serán similares.

### **Prueba de condensados**

El compresor no tiene un elemento que seque el aire, por lo cual se debe purgar los condensados semanalmente, para que no se dirijan hacia los equipos neumáticos, que pueden provocando daños en su estructura y reducir la vida útil de los mismos.

### **Figura 26**

*Evacuación de condensados*



*Nota.* La Imagen muestra la evacuación de los condensados del compresor, manipulando el tapón que se encuentra en la parte inferior del tanque de almacenamiento de aire comprimido.

El volumen de los condensados durante una semana es de 106 [ml], que equivale a 0.10[l]. Los equipos neumáticos operan con aire, si dejamos ingresar este fluido hacia los módulos, provocarían averías en toda su estructura, es por ellos que es aconsejable purgar semanalmente estos fluidos

**Figura 27**

*Volumen de condensados del compresor*



*Nota.* Se muestra los condensados, que se han creado en una semana de trabajo del compresor, que son 106 [ml].

Al realizar el purgado desde la zona designada de la red de aire comprimida, no se encuentra ningún condensado, este fluido es más pesado que el aire, es por esta razón que se quedan en el tanque del compresor, pero de igual manera se debe realizar la purga cada semana, para que no existan inconvenientes en los equipos neumáticos.

**Figura 28**

*Purgado de la red de aire comprimido*



*Nota.* Se muestra el purgado de la red de aire comprimido.

## Prueba de sonido

Para esta prueba de sonido utilizamos un sonómetro de la marca EXTECH INSTRUMENTS que se muestra en la siguiente figura.

### Figura 29

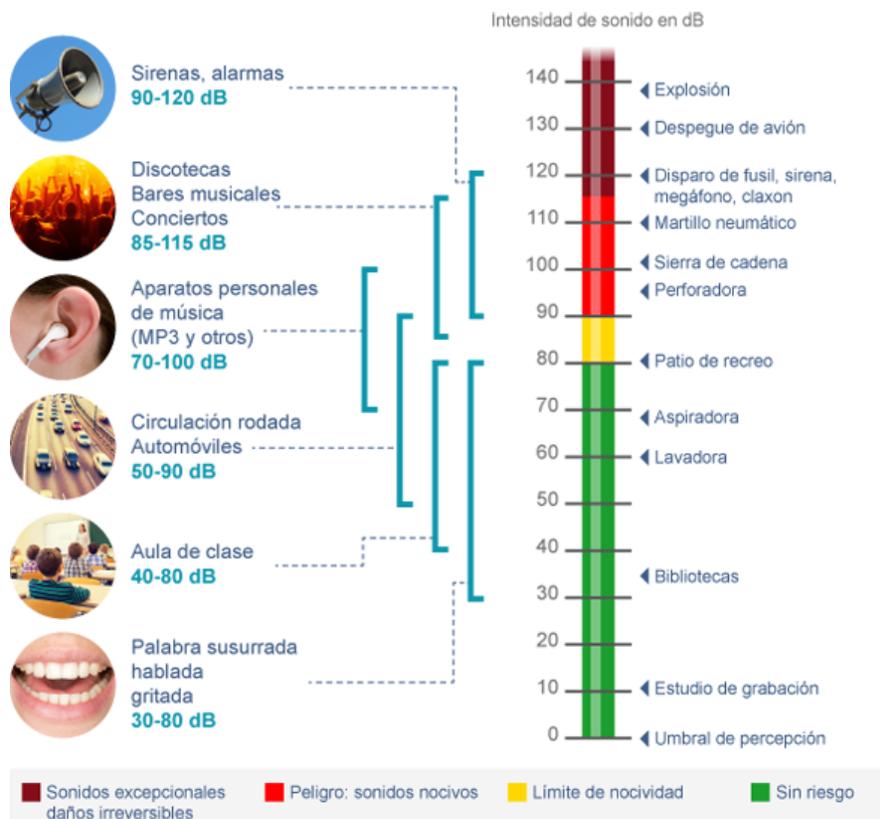
*Sonómetro*



*Nota.* En la imagen se muestra el sonómetro, equipo que mide los niveles sonoros.

Para realizar esta prueba se ha dividido el laboratorio en 5 zonas que se observa en el Plano F, activando consecuentemente los 3 motores que tiene el compresor, donde se obtuvo 4 mediciones en cada minuto, las mismas se realizarán en lugares estratégicos, específicamente donde los estudiantes permanecen realizando las respectivas prácticas, encomendadas por el docente encargado.

También se optó por realizar las pruebas fuera del laboratorio, que son el pasillo y otra en el exterior del edificio, a continuación, se detalla los niveles de ruido por decibeles y cada una de las mediciones obtenidas.

**Figura 30***Intensidad de sonido en [dB]*

*Nota.* En la imagen se detalla la intensidad de ruido en decibeles. Tomado de Ducorneau (2017).

**Tabla 23***Mediciones zona 1*

Compresor	1(dbA)	2(dbA)	3(dbA)	4(dbA)	Promedio(dbA)
<b>Compresor 1</b>	59.11	59.10	60	59.50	59.43
<b>Compresor 1 y 2</b>	67.20	67.00	68.20	67.30	67.42
<b>Compresor 1, 2 y 3</b>	68.90	69.00	69.10	68.95	68.99

*Nota.* Se detalla las mediciones en cada minuto y su respectivo promedio de la zona 1 del laboratorio.

**Figura 31***Zona 1*

*Nota.* En la imagen se muestra la zona 1 del laboratorio.

**Tabla 24***Mediciones zona 2*

<b>Compresor</b>	<b>1(dbA)</b>	<b>2(dbA)</b>	<b>3(dbA)</b>	<b>4(dbA)</b>	<b>Promedio(dbA)</b>
<b>Compresor 1</b>	64.10	64.50	64.20	64.40	64.30
<b>Compresor 1 y 2</b>	67.30	66.08	67.10	66.80	66.82
<b>Compresor 1, 2 y 3</b>	68.10	68.00	67.80	68.20	68.02

*Nota.* Se detalla las mediciones en cada minuto y su respectivo promedio de la zona 2 del laboratorio.

**Figura 32***Zona 2*

*Nota.* En la imagen se muestra la zona 2 del laboratorio.

**Tabla 25***Mediciones zona 3*

<b>Compresor</b>	<b>1(dbA)</b>	<b>2(dbA)</b>	<b>3(dbA)</b>	<b>4(dbA)</b>	<b>Promedio(dbA)</b>
<b>Compresor 1</b>	61.20	60.60	60.70	61.00	60.87
<b>Compresor 1 y 2</b>	64.00	63.90	63.11	63.85	63.71
<b>Compresor 1, 2 y 3</b>	65.30	65.10	65.00	65.20	65.15

*Nota.* Se detalla las mediciones en cada minuto y su respectivo promedio de la zona 1 del laboratorio.

**Figura 33***Zona 3*

*Nota.* En la imagen se muestra la zona 3 del laboratorio.

**Tabla 26***Mediciones zona 4*

<b>Compresor</b>	<b>1(dbA)</b>	<b>2(dbA)</b>	<b>3(dbA)</b>	<b>4(dbA)</b>	<b>Promedio(dbA)</b>
<b>Compresor 1</b>	60.00	59.70	59.80	59.90	59.85
<b>Compresor 1 y 2</b>	63.30	63.20	63.90	63.70	63.52
<b>Compresor 1, 2 y 3</b>	65.20	65.40	65.90	65.10	65.40

*Nota.* Se detalla las mediciones en cada minuto y su respectivo promedio de la zona 1 del laboratorio.

**Figura 34***Zona 4*

*Nota.* En la imagen se muestra la zona 4 del laboratorio.

**Tabla 27***Mediciones zona 5*

<b>Compresor</b>	<b>1(dbA)</b>	<b>2(dbA)</b>	<b>3(dbA)</b>	<b>4(dbA)</b>	<b>Promedio(dbA)</b>
<b>Compresor 1</b>	58.00	58.01	58.30	58.00	58.08
<b>Compresor 1 y 2</b>	61.40	61.80	61.20	61.30	61.42
<b>Compresor 1, 2 y 3</b>	63.80	63.60	63.50	63.40	63.57

*Nota.* Se detalla las mediciones en cada minuto y su respectivo promedio de la zona 1 del laboratorio.

**Figura 35***Zona 5*

*Nota.* En la imagen se muestra la zona 5 del laboratorio.

**Tabla 28***Mediciones zona 6, pasillo*

<b>Compresor</b>	<b>1(dbA)</b>	<b>2(dbA)</b>	<b>3(dbA)</b>	<b>4(dbA)</b>	<b>Promedio(dbA)</b>
<b>Compresor 1</b>	46.60	46.80	46.50	46.40	46.57
<b>Compresor 1 y 2</b>	49.20	48.90	48.80	49.10	49.00
<b>Compresor 1, 2 y 3</b>	51.10	50.90	51.20	50.95	51.04

*Nota.* Se detalla las mediciones en cada minuto y su respectivo promedio de la zona 6 del laboratorio.

**Figura 36***Pasillo*

*Nota.* En la imagen se muestra el pasillo de acceso al laboratorio.

**Tabla 29***Mediciones zona 7, exterior del edificio*

<b>Compresor</b>	<b>1(dbA)</b>	<b>2(dbA)</b>	<b>3(dbA)</b>	<b>4(dbA)</b>	<b>Promedio(dbA)</b>
<b>Compresor 1</b>	35.60	35.90	36.00	35.95	35.86
<b>Compresor 1 y 2</b>	36.70	36.60	36.90	36.80	36.75
<b>Compresor 1, 2 y 3</b>	36.90	37.00	37.10	37.00	37.00

*Nota.* Se detalla las mediciones en cada minuto y su respectivo promedio de la zona 7 del laboratorio.

**Figura 37**

*Zona exterior*



*Nota.* En la imagen se muestra la zona exterior del laboratorio.

Al analizar las Tablas de las zonas (1-5) que se encuentran dentro del laboratorio podemos evidenciar que el mayor nivel de ruido se encuentra en la zona 1, cuando los 3 motores están en funcionamiento a plena carga, el valor alcanzado es de 68.99 [dBA]. En la zona 5 se encuentra el valor de nivel de ruido más bajo que es de 63.57 en las mismas condiciones antes descritas. Según la Figura 30 estos valores se encuentran en el rango permitido para que el oído humano no sufra daños, debido que un aula de clase por lo general llega a estar con un nivel de ruido entre los 40 y 80 [dBA].

Las Tablas de las zonas 6 y 7 muestra el ruido exterior del laboratorio, se lo ha analizado con la finalidad de asegurarnos que no existan alteraciones de ruido en los estudiantes que transitan por estas zonas, el nivel más alto se encuentra en el pasillo, cuando los 3 motores están funcionando a todo su potencial, tenemos un valor de 51,04 [dBA]. que es aceptable y según la Figura 30 no se encuentra en riesgo de alteraciones al oído humano.

## Capítulo VI

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

Se calculó la demanda real del laboratorio de Hidrónica y Neutrónica, teniendo en cuenta el caudal de los módulos neumático; aplicando los factores de uso y de simultaneidad se obtuvo un valor de 13.06 [CFM].

Al proyectar un aumento de consumo del 50%, se obtuvo un caudal de consumo proyectado de 19.59 [CFM], los cuales sirvieron para calcular las características del compresor y de los elementos necesarios para la red de aire comprimido.

Al ser un área educativa el compresor que se optó para alimentar a la red de aire comprimido, es un silencioso, libre de aceite, de 6 [HP], con un caudal de 21 [CFM], que supera el consumo proyectado del laboratorio.

El diseño de la instalación no requiere de la implementación de un secador debido a que la calidad del aire determinado será de 5 y los costos de implementación se elevarían considerablemente. Sin embargo, se seleccionó un secador de membrana de acuerdo a los datos de la estación meteorológica más cercana proporcionados por el INAMHI y se detalló sus características técnicas requeridas en la instalación. Este secador podrá ser implementado en futuras ampliaciones o cuando la calidad del aire para los equipos neumáticos sea necesario que se encuentre entre 1 y 3.

Con las características del caudal, la longitud de la tubería y considerando una pérdida de presión de 0.1 [bar], se aplicó el nomograma para el cálculo del diámetro de tubería, obteniendo un diámetro de 20 [mm] y 16 [mm]. Para la tubería principal y secundaria respectivamente. En el mercado no se encuentra la tubería de 16 [mm], por lo cual la red se implementó, tanto la tubería primaria como secundaria con un diámetro de 20 [mm].

Para seleccionar la longitud real de la tubería, acoples, válvulas esféricas, unidades de mantenimiento, etc. Se diseñó una simulación de la red de aire comprimido, enlistando el número exacto de elemento que será parte de la instalación.

Al implementar la red de aire comprimido la tubería principal se colocó con un 2% de inclinación hacia el sistema de purgado, se lo realizó de esta manera para que los condensados se dirijan a esta zona y poder evacuar los condensados, impidiendo que se dirijan hacia los módulos neumáticos.

Las tuberías secundarias tienen un sistema de bajante que separa el aire de los condensados, logrando que llegue solo aire a los módulos neumáticos, además en cada toma se colocó una unidad de mantenimiento FRL. En la instalación se encuentran nueve tomas reguladas y una toma no regulada.

El compresor se colocó en un área específica donde no genera inconvenientes mecánicos, físicos y de funcionamiento, proporcionando facilidad en su uso y servicio. Al estar en funcionamiento sus tres motores a plena carga el nivel de ruido más fuerte se produce en la zona 1 es de 68.99 [dBA], lo que no genera lesiones graves en el oído humano.

Las pruebas de funcionamiento fueron muy exitosas porque las pérdidas de presión que tienen un valor de 3.28% en vacío y del 3.5% en funcionamiento, estos porcentajes se encuentran en el rango establecido, que es máximo del 10%. El tiempo en descargarse el tanque del compresor cuando todos los módulos DEGEM SYSTEM estén funcionando a plena carga es de 45.52 [min], que es un tiempo aceptable porque los estudiantes en realizar la práctica se toman un tiempo aproximado de 30 [min].

Para una correcta operación de la red de aire comprimido se ha creado un diagrama de bloques que se muestra en el ANEXO F, donde se detalla los pasos sistemáticos a seguir para obtener aire en cada una de las tomas de manera eficiente. El plan de mantenimiento ANEXO E se detalla todos los componentes, con su respectiva actividad a realizar, en un lapso específico de tiempo.

## Recomendaciones

Para diseñar una red de aire comprimido es recomendable partir del consumo que vamos a tener en dicho laboratorio, por lo cual se debe realizar un estudio el caudal de todos los elementos neumáticos que existan.

El compresor es un elemento primordial, es por ello que se debe seleccionar adecuadamente sus características de funcionamiento, porque de ello dependerá que la red de aire comprimido entregue el caudal necesario a los módulos neumáticos.

La selección del diámetro de la tubería debe seguir una serie de pasos hasta llegar a su valor final, de esto dependerá que no existan pérdidas de presión, cuando se encuentre transportando el aire, hacia su destino final.

La simulación de la red de aire comprimido es muy importante, porque se podrá evidenciar algunas falencias que pueden ocurrir, de esta manera se puede ir corrigiendo para que, al momento de implementar la instalación, se cuente con todos los elementos y consideraciones, llegando a no tener inconvenientes en su aplicación.

Será necesaria la implementación de un secador cuando la calidad necesaria de aire de los equipos neumáticos del laboratorio aumente a valores entre 1 y 3, por el momento no es necesario su implementación, pero en el caso de futuras ampliaciones se recomienda adquirir e instalar un secador de membrana para una presión de 10 [bar], un caudal de 25.4 [CFM], una caída de presión máxima de 2.5 [psi], y con una conexión G ½, estos valores corresponden a datos normalizados por la marca Atlas Copco para su futuro análisis.

Las pruebas que se deben tomar en cuenta, cuando un correcto funcionamiento de la red de aire comprimido son las de: tiempo de funcionamiento, pérdidas de presión, purga de condensados y niveles de ruido causadas por el compresor.

Es ideal que exista un documento que detallen los pasos de operación de la red de aire comprimido, además de un plan de mantenimiento, de esta manera cualquier persona podrá efectuar el funcionamiento y manipulación de la instalación.

## Bibliografía

- AIGNEP. (29 de Enero de 2021). *Línea de distribución de aire comprimido, gases inertes y vacíos*. Obtenido de Serie Infinity:  
<https://b2b.aignep.com/esl/content/download/181247/21537905/file/INFINITY.pdf>
- Almeida, D. (2019). Control Robusto de un Actuador Neumático Basado en la Estructura de Control con Compensación Activa de Perturbaciones para Seguimiento de Trayectorias. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 16(2), 138-146.
- Asencio, R. (2018). *Diseño de un sistema automatizado para procesos electroneumáticos de lógica cableada*. Perú: Universidad José Carlos Mariátegui.
- Atlas. (2023). *Secadores de membrana SD*. Obtenido de Atlas Copco Ecuador- Compresores:  
<https://www.atlascopco.com/es-ec/compressors/products/air-dryers/membrane-dryers/sd-membrane-dryers>
- Ávila, Ó. (2021). *Diseño de sistema automatizado de suministro de aire comprimido*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Balladares, J., & Cota, A. (2018). *Diseño e implementación de la red de Aire Comprimido Industria METALCI SA*. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
- Barrera, G. (2018). *Diseño de un Sistema de aire comprimido para la Empresa MONCAR de Santa Clara. (Tesis de Grado)*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara. Obtenido de <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/9954>
- Bayas, P. (2020). Diseño y Simulación Mecánica de un Actuador Hidráulico Rotativo Sumergible Para Aplicación en Hidroterapia. *KnE Engineering*, 1(1), 64–78.
- Bezoz, R., Cerdá, M., & Rodríguez, J. (2022). *Automatismos industriales 2.ª edición 2022*. España: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Calomarde, A. (2020). *Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores de piston dentro del campo de la refrigeración comercial*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

- Camayo, B. (2021). Diseño autónomo del sistema solar térmico para la deshidratación indirecta de Aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*), Junín. *Revista de Ciencias de la Vida*, 33(1), 115-124.
- Castillo, R. (2022). *Montaje y reparación de sistemas neumáticos e hidráulicos, bienes de equipo y máquinas industriales*. Antequera: IC Editorial. doi:987-84-1103-235-3
- Cerdá, L. (2018). *Automatismos neumáticos e hidráulicos*. España: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Colombero. (13 de 06 de 2013). *WordPress*. Obtenido de <https://tecnicayateismo.wordpress.com/>
- Creus, A. (2012). *Neumatica e hidráulica*. España: Marcombo.
- Daza, D., & Sánchez, A. (2021). Controles Clásico Vs Controles Inteligentes En Una Bola De Levitación Neumática. *Ingeniería e Innovación*, 1(1), 227-239.
- Díaz, A. (2018). *Evaluación del Sistema de Suministro de Aire Comprimido: En el Área de Pintura de la Planta Toyota de Venezuela C. A.* Venezuela: Editorial Académica Española.
- Domínguez, E., & Ferrer, J. (2018). *FPB - Preparación de superficies*. Editex.
- Domínguez, E., & Ferrer, J. (2020). *Tratamiento y recubrimiento de superficies*. Editex.
- Ducourneau, M. C. (06 de 01 de 2017). *Neuroreille*. Obtenido de <http://www.cochlea.org/es/ruido>
- EACSA. (1 de agosto de 2017). *Tipos de secadores de aire comprimido*. Obtenido de EACSA. Energía en aire comprimido: <https://energiaenaire.com.mx/tipos-secadores-aire-comprimido/>
- Gómez, M., & López, J. (2020). *Manual de presentaciones de Neumática y Oleohidráulica para el grado de ingeniero mecánico*. España: Universidad Almería.
- Gómez, W. (2022). *Oxígeno: Fisiología, terapeutica, toxicidad*. Bogotá: Editorial El Manual Moderno.

- González, F. (2018). Mesa vibratoria accionada por músculos neumáticos teleoperada para experimentación on-line. *XXXIX Jornadas de Automática: actas. Badajoz, 5(7)*, 165-172.
- González, T., & Del Río, G. (2022). *Circuitos de fluidos. Suspensión y dirección 2022*. México: Editex.
- Herrera, A. (2019). Evaluación de las pérdidas de presión en el sistema de aire comprimido en la fábrica CEPIL. *Centro Azúcar, 46(4)*, 50-59.
- Hess, S. (2002). *Aire comprimido fuente de energía*. Esslingen am Neckar: Blue Digest on Automation.
- HESSE, S. (2002). *Aire comprimido fuente de energía*. Blue Digest on Automation.
- Huerta, H. (14 de 06 de 2018). *Historia del Compresor de Aire*. Obtenido de CBS Compresores de Aire: <https://cbscompresores.com.mx/uso-del-compresor-de-aire-a-traves-de-la-historia/>
- INAMHI. (2022). *Red de estaciones Automáticas hidrometeorológicas*. Obtenido de INAMHI: <http://186.42.174.236/InamhiEmas/#>
- Kuan, A., & Ooi, K. (2021). A review on sliding vane and rolling piston compressors. *Machines, 9(6)*, 125-134.
- Leal, A., & Morales, E. (2021). Naturaleza de la Ciencia e historia de la ley de Boyle en futuros profesores de ciencias. *Enseñanza de las ciencias, 39(1)*, 175-193.
- López, A. (2022). El Mejor Precio de Venta caliente compresor de tornillo fijo Industrial 50 HP con un alto ahorro de energía Efficiency Jb50A. *Efficiency Jb50A. Ingeniería Energética, 43(1)*, 48-57.
- Menéndez, F. (2006). *Higiene industrial*. Valladolid: Lex Nova.
- Moge, M., & Pablo, V. (2020). Diseño de un prototipo de órtesis para mano con actuadores neumáticos. *Tecnología en Marcha, 33(1)*, 101-105.
- Morales, E. (2019). Impulsado por motor diesel compresor de aire del compresor de tornillo con ruedas cultivos anuales. *Revista mexicana de ciencias agrÍcolas, 10(8)*, 1875-1886.

- Moscoso, A., & Ordóñez, L. (2022). *Principios de funcionamiento de sistemas oleohidráulicos en maquinaria pesada*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Mundo compresor. (2018). *Historia del compresor. Del fuelle a la levitación*. Obtenido de Mundo compresor: <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/historia-compresor-fuelle-levitacion>
- Naranjo, C. (2020). Diseño de Ventilador Mecánico emergente en modo asistido/controlado y espontáneo por presión. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 1(1), 130-137.
- Novoa, X. (2021). *Ingeniería aplicada a las Cámaras Hiperbáricas para uso sanitario*. . Xavier Novoa Conde.
- Pardavé, W. (2021). *Estrategias proactivas para mejorar la calidad del aire*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Pincay, D. (2019). *Diseño y dimensionamiento de instalación de aire comprimido para Laboratorio de Neumática en la FETD-UCSG*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- PORTEN. (2021). Obtenido de Performance and Technology: <https://www.portentools.com>.
- Procil, M. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo energético para red de aire comprimido en una planta industrial*. Perú: Universidad Tecnológica del Perú.
- S&P. (14 de Junio de 2018). *Caudal de aire: qué es y principales métodos de medición*. Obtenido de S&P: El Blog de la ventilación eficiente: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/caudal-de-aire-principales-metodos-medicion/>
- Salazar, R. (2001). *Compresores centrífugos. (Tesis de Maestría)*. Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza. N. L. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/4756>
- Sánchez, R., & Torres, V. (2020). *Estudio y optimización del sistema de aire comprimido de la unidad de fibras, en CMPC Pulp Planta Laja*. Concepción: Universidad del Bío-Bío.

Severns, W., & Degler, H. (2021). *La producción de energía mediante vapor, aire o gas.*

México: Reverte.

SULLAIR. (2022). *SULLAIR*. Obtenido de A Hitachi Group Company:

<https://america.sullair.com/es/blog/que-es-un-regulador-de-presion>

Tello, F., & Vásquez, D. (2020). Comparación de la influencia de las pérdidas energéticas en las eficiencias de un compresor de desplazamiento (scroll) y un compresor de pistones utilizados en bombas de calor. *Información tecnológica*, 31(5), 205-214.

Toasa, E. (2014). *Diseño e implementación de la red de aire comprimido para el laboratorio de Automatización y Neumática en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Mecánica- ESPOCH*. Riobamba: Repositorio ESPOCH. Obtenido de

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4148>

Toasa, E. (2014). *Diseño e implementación de la red de aire comprimido para el laboratorio de Automatización y Neumática en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Mecánica- ESPOCH. (Tesis de Grado)*. ESPOCH, Riobamba. Obtenido de

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4148>

Vásquez, J. (2016). *Automatización neumática*. México: Ediciones de la U.

Vera, F. (2018). *Diseño y dimensionamiento de instalación de aire comprimido para Laboratorio de Neumática en la FETD-UCSG*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

**Anexos**