



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

### **“DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS POR FUGAS EN TUBERÍAS DE AIRE COMPRIMIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PASIVO EN EL LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

**MADRID CELI MARIO ANDRÉS  
VALLE VEGA LUIS ANTONIO**

## **TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2015**

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

2014-10-09

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**MADRID CELI MARIO ANDRÉS  
VALLE VEGA LUIS ANTONIO**

---

Titulada:

**“DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS POR FUGAS EN TUBERÍAS DE AIRE  
COMPRIMIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PASIVO EN  
EL LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE LA  
FACULTAD DE MECÁNICA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el título de:

**INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Eduardo Hernández Dávila  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Dr. Marco Haro Medina  
**ASESOR DE TESIS**

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** MADRID CELI MARIO ANDRÉS

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS POR FUGAS EN TUBERÍAS DE AIRE COMPRIMIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PASIVO EN EL LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”

**Fecha de Examinación:** 2015-07-03

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Marco Santillán Gallegos <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Eduardo Hernández Dávila <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Dr. Marco Haro Medina <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** VALLE VEGA LUIS ANTONIO

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS POR FUGAS EN TUBERÍAS DE AIRE COMPRIMIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PASIVO EN EL LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”

**Fecha de Examinación:** 2015-07-03

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Marco Santillán Gallegos <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Eduardo Hernández Dávila <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Dr. Marco Haro Medina <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que se presenta, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Mario Andrés Madrid Celi**

---

**Luis Antonio Valle Vega**

## **DEDICATORIA**

A mis padres: Absalón Madrid y Deysi Celi, gracias por su apoyo incondicional brindado hasta el final de mi carrera. A mis hermanos: Braulio Madrid y Jorge Madrid por demostrarme que somos una familia y nos apoyamos en todo momento.

A Viviana Paucar gracias por su apoyo diario brindado hasta la culminación de mi carrera, a mi hijo Lionel Madrid que es mi pilar fundamental para vencer todas las barreras que se me presentaron y finalizar con éxitos todas mis metas planteadas.

**Mario Andrés Madrid Celi**

Este trabajo lo dedico con toda la humildad a DIOS por haberme guiado, iluminado mi mente a lo largo de toda mi carrera y por haberme dado salud para así poder conseguir mis objetivos.

A mi madre por ser el pilar fundamental en mi vida y por haberme apoyado en todo momento con sus consejos los cuales fueron muy importantes durante la consecución de mi carrera. Este trabajo va por ella por lo que significa ella en mi vida.

A mi padre que aunque ya no esté conmigo gracias por ser la persona que me dio la vida y por qué sé que desde el lugar en el que se encuentre siempre intercedió por mí y sé que estará muy orgulloso de que haya alcanzado mi meta propuesta.

A mis abuelitos, hermanos, tíos, primos por haberme brindado su apoyo y por mostrarme lo que es el significado de una verdadera familia unida.

**Luis Antonio Valle Vega**

## **AGRADECIMIENTO**

Primero doy gracias a Dios por darme la fuerza y sabiduría todos los días de mi vida para seguir adelante en mi formación profesional y personal.

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser persona útil a la sociedad.

Y en especial para toda mi familia, los amigos y personas que me apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito otra etapa de mi vida.

**Mario Andrés Madrid Celi**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, y de manera especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por brindarme la oportunidad de obtener una profesión y ser alguien útil en la vida.

Y de manera especial un agradecimiento infinito a toda mi familia por haber recibido su apoyo y a mis amigos y compañeros por haber compartido momentos tristes y de alegría a lo largo de toda mi etapa estudiantil.

**Luis Antonio Valle Vega**

# CONTENIDO

Pág.

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Justificación.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	<i>Objetivo general</i> .....	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	3
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	
2.1	Generación de aire comprimido.....	4
2.2	Elementos que conforman un sistema de aire comprimido.....	4
2.2.1	<i>La central compresora</i> .....	4
2.2.1.1	<i>Componentes de la central compresora</i> .....	5
2.2.2	<i>Sistemas de distribución</i> .....	7
2.2.2.1	<i>Tuberías o ramales principales</i> .....	7
2.2.2.2	<i>Tuberías de distribución</i> .....	7
2.2.2.3	<i>Tuberías de servicio</i> .....	7
2.2.3	<i>Instalación de tubería de aire</i> .....	7
2.2.3.1	<i>Circuito abierto</i> .....	8
2.2.3.2	<i>Circuito cerrado</i> .....	8
2.2.4	<i>Consideraciones sobre redes de aire comprimido</i> .....	9
2.2.5	<i>Instalación de aire comprimido</i> .....	9
2.3	Clasificación y selección de los compresores.....	11
2.3.1	<i>Clasificación de los compresores</i> .....	11
2.3.1.1	<i>Compresores volumétricos</i> .....	11
2.3.1.2	<i>Compresores rotodinámicos</i> .....	12
2.3.2	<i>Selección de los compresores</i> .....	12
2.3.2.1	<i>Criterios de selección</i> .....	12
2.3.2.2	<i>Parámetros en la selección de un compresor</i> .....	13
2.4	Ultrasonido pasivo.....	14
2.4.1	<i>Principio físico de ultrasonido</i> .....	14
2.4.2	<i>Componentes del sonido</i> .....	15
2.5	Ultrasonido propagado en aire.....	17
2.5.1	<i>Vacío</i> .....	17
2.5.2	<i>Movimiento de ondas en sonido</i> .....	17
2.5.3	<i>Distribución de energía desonido</i> .....	17
2.5.4	<i>Penetración del sonido</i> .....	17
2.5.4.1	<i>Velocidad</i> .....	17
2.5.4.2	<i>Longitud de onda</i> .....	18
2.5.4.3	<i>Decibel</i> .....	18
2.5.4.4	<i>Amplitud</i> .....	18
2.5.5	<i>Nivel de intensidad de sonidos</i> .....	18
2.6	Técnica de detección de ultrasonido.....	18
2.6.1	<i>Aplicaciones de la detección de ultrasonido</i> .....	19
2.6.1.1	<i>Monitoreo de rodamientos</i> .....	19
2.6.1.2	<i>Detección de fugas de presión o vacío</i> .....	20



2.6.1.3	<i>Inspección de instalaciones eléctricas</i> .....	20
2.7	Procedimiento de inspección por ultrasonido.....	21
2.7.1	<i>Para confirmar una fuga</i> .....	21
2.7.2	<i>Superando dificultades</i> .....	22
2.8	Factores que causan las fugas en los sistemas.....	22
2.9	Efecto de las fugas en el sistema.....	23
2.10	Soluciones para las fugas encontradas.....	24
2.11	Características y datos técnicos del equipo.....	25
2.11.1	<i>Datos técnicos del ULTRAPROBE 15000</i> .....	25
2.11.2	<i>Características del ULTRAPROBE 15000</i> .....	27
2.11.3	<i>Aplicaciones del ULTRAPROBE 15000 touch</i> .....	29
2.12	Pérdidas energéticas en sistemas de aire comprimido.....	29
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DEL MÓDULO Y PRUEBAS</b>	
3.1	Cálculos del módulo de pruebas.....	31
3.1.1	<i>Selección de pistón neumático</i> .....	31
3.1.1.1	<i>Carga crítica de pandeo del vástago</i> .....	32
3.1.1.2	<i>Presión de trabajo del cilindro neumático</i> .....	35
3.1.2	<i>Selección del diámetro principal de la tubería</i> .....	36
3.1.2.1	<i>Consumo de aire</i> .....	36
3.1.2.2	<i>Pérdida de carga en la línea principal</i> .....	40
3.1.3	<i>Selección del diámetro de la línea secundaria de la tubería</i> .....	41
3.1.3.1	<i>Consumo de aire en orificio</i> .....	41
3.1.3.2	<i>Pérdida de presión en los agujeros</i> .....	42
3.1.3.3	<i>Pérdida de carga en la línea secundaria</i> .....	44
3.1.4	<i>Selección de tubería flexible para el actuador</i> .....	45
3.1.5	<i>Selección del compresor</i> .....	45
3.1.5.1	<i>Potencia del compresor</i> .....	45
3.1.5.2	<i>Tanque del compresor</i> .....	48
3.2	Equipos y materiales para el banco de pruebas.....	47
3.3	Equipos y materiales del banco de pruebas.....	48
3.3.1	<i>Compresor de 2 Hp</i> .....	48
3.3.2	<i>Cilindro de acero</i> .....	49
3.3.3	<i>Válvula de accionamiento manual</i> .....	50
3.3.4	<i>Válvula de globo</i> .....	51
3.3.5	<i>Flujómetro o caudalímetro</i> .....	51
3.3.6	<i>Manómetro</i> .....	51
3.3.7	<i>Balanza digital</i> .....	52
3.3.8	<i>Racor recto cilíndrico macho</i> .....	53
3.3.9	<i>Tubo de poliuretano</i> .....	53
3.3.10	<i>Regulador de flujo</i> .....	54
3.3.11	<i>Tubería, tee, neplo corrido, universal, codo de 90° de hierro galvanizado de 1/2 plg</i> .....	55
3.4	Diseño y montaje del banco de pruebas.....	55
3.5	Pruebas del montaje.....	58
3.6	Plan de mantenimiento y guía de prácticas de laboratorio.....	58
3.6.1	<i>Plan de mantenimiento</i> .....	58
3.6.1.1	<i>Tareas de mantenimiento del compresor</i> .....	59
3.6.1.2	<i>Tareas de mantenimiento en el cilindro neumático</i> .....	59

3.6.1.3	<i>Tareas de mantenimiento en la válvula de accionamiento manual de 5 posiciones y dos vías</i> .....	61
3.6.2	<i>Guía de prácticas de laboratorio</i> .....	62
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE PRUEBAS</b>	
4.1	Descripción del procedimiento.....	63
4.2	Medición de pérdidas de presión.....	66
4.3	Mediciones de amplitudes de las ondas y espectros de ultrasonido.....	69
4.4	Comparación entre fuga de área circular y área rectangular.....	74
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
5.1	Presión del consumidor final y diámetro de las fugas.....	75
5.2	Caudal de aire y presión del consumidor final.....	75
5.3	Amplitudes de las ondas de ultrasonido.....	77
5.4	Espectros de ultrasonido.....	78
5.5	Análisis de la calidad de la energía.....	78
5.6	Relación entre amplitud de onda de ultrasonido y potencia requerida.....	79
5.7	Eficiencia energética en los puntos de fuga.....	80
5.8	Comparación de los resultados con los métodos analíticos.....	81
5.8.1	<i>Presión del consumidor final y diámetro de las fugas</i> .....	81
5.8.2	<i>Amplitud de onda y potencia requerida</i> .....	88
5.9	Aplicación práctica del equipo de ultrasonido pasivo.....	94
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1	Conclusiones.....	97
6.2	Recomendaciones.....	98

**BIBLIOGRAFÍA**  
**ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1	Relación entre el nivel de calidad de aire, aplicación y tratamiento de aire ..... 5
2	Compresores alternativos ..... 13
3	Parámetros en la selección de un compresor ..... 14
4	Representación de una fuga en costo anual ..... 24
5	Parámetros de selección del cilindro neumático ..... 32
6	Longitudes equivalentes con $\phi = 12$ plg de la tubería principal ..... 36
7	Longitudes equivalentes con $\phi = 12$ plg de la tubería secundaria ..... 42
8	Parámetros para selección de la tubería del actuador ..... 45
9	Volumen de pérdida total ..... 45
10	Selección del tanque del compresor ..... 46
11	Parámetros para selección del compresor ..... 47
12	Equipos para el banco de pruebas ..... 47
13	Materiales para el banco de pruebas ..... 47
14	Datos técnicos del compresor ..... 48
15	Componentes del compresor ..... 48
16	Datos técnicos del cilindro ..... 49
17	Componentes del cilindro ..... 49
18	Datos técnicos de la válvula de accionamiento manual ..... 50
19	Componentes de la válvula de globo ..... 51
20	Datos técnicos del manómetro tipo tubos bourdon ..... 51
21	Componentes del manómetro tipo tubos bourdon ..... 52
22	Datos técnicos de la balanza ..... 52
23	Componentes de la balanza digital ..... 52
24	Datos técnicos del racor recto ..... 53
25	Componentes del racor recto ..... 53
26	Datos técnicos del regulador de flujo ..... 54
27	Componentes del regulador de flujo ..... 54
28	Tareas de mantenimiento del compresor ..... 59
29	Tareas de mantenimiento del cilindro neumático ..... 60
30	Tareas de mantenimiento de la válvula de accionamiento manual ..... 61
31	Fuerza sin ninguna fuga ..... 66
32	Punto de fuga de 1,0 mm ..... 67
33	Punto de fuga de 1,5 mm ..... 67
34	Punto de fuga de 2,0 mm ..... 67
35	Punto de fuga de 2,5 mm ..... 68
36	Punto de fuga de 3,0 mm ..... 68
37	Presión con fugas ..... 68
38	Decibeles en fuga de 1,0 mm ..... 69
39	Frecuencias en fuga de 1,0 mm ..... 69
40	Decibeles en fuga de 1,5 mm ..... 70

41	Frecuencia en fuga de 1,5 mm.....	70
42	Decibeles en fuga de 2,0 mm .....	71
43	Frecuencias en fuga de 2,0 mm .....	71
44	Decibeles en fuga de 2,5 mm .....	72
45	Frecuencias en fuga de 2,5 mm .....	72
46	Decibeles en fuga de 3,0 mm .....	73
47	Frecuencias en fuga de 3,0 mm .....	73
48	Fuga de área circular y rectangular .....	74
49	Resultados finales de decibeles y frecuencias.....	74
50	Caudal de aire – diámetro de fuga.....	76
51	Caudal de aire presión del pistón .....	77
52	Amplitudes de ondas .....	77
53	Espectros de ultrasonido.....	78
54	Potencia requerida para la compresión.....	79
55	Amplitud de onda – potencia requerida .....	80
56	Pérdidas anuales por fugas .....	81
57	Regresión polinomial fuga - presión del pistón.....	81
58	Ajuste de la curva fuga – presión del consumidor final .....	85
59	Regresión polinomial amplitud de onda – potencia requerida .....	88
60	Regresión lineal amplitud de onda – potencia requerida .....	91
61	Ajuste de la curva amplitud de onda – potencia requerida.....	93
62	Mediciones en el laboratorio de la facultad de mecánica.....	95
63	Pérdidas anuales por fugas en el laboratorio de la facultad de mecánica.....	96

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1 Red de aire comprimido circuito abierto .....	8
2 Red de aire comprimido circuito abierto .....	8
3 Onda sinusoidal con algunos parámetros del sonido.....	16
4 Características de una onda sonora .....	16
5 Diseño de un detector de ultrasonido .....	19
6 Monitoreo de rodamientos con ultrasonido pasivo .....	20
7 Detección de fugas de presión o vacío por medio del ultrasonido .....	20
8 Inspección de instalaciones eléctricas utilizando la técnica de ultrasonido. ....	20
9 Kit ULTRAPROBE 15000.....	25
10 Pantalla principal del equipo .....	27
11 Visualizador de análisis espectral del equipo .....	28
12 Temperatura y dB del equipo .....	28
13 Visualizador de cámara del equipo .....	28
14 Componentes del compresor .....	49
15 Componentes del cilindro.....	50
16 Medidas de la válvula de accionamiento manual .....	50
17 Componentes del racor recto .....	53
18 Componentes del regulador de flujo .....	55
19 Base y soportes para los elementos del módulo .....	56
20 Acoplamiento de accesorios .....	56
21 Acoplamiento en la base.....	56
22 Colocación del pistón, manómetro y flujómetro .....	57
23 Conexión del pistón y colocación de la balanza.....	57
24 Vista superior del módulo de pruebas .....	58
25 Vista frontal del módulo de pruebas.....	58
26 Regulación del manómetro.....	63
27 Barrido con el equipo ULTRAPROBE 15000 .....	64
28 Medición en la fuga de 2,0 mm con el equipo ULTRAPROBE 15000 .....	64
29 Medición en la fuga de 2,0 mm con el equipo ULTRAPROBE 15000 .....	65
30 Medición N°2 de una fuga de 1,0 mm.....	69
31 Medición N°2 de una fuga de 1,5 mm.....	70
32 Medición N°2 de una fuga de 2,0 mm.....	71
33 Medición N°3 de una fuga de 2,5 mm.....	72
34 Medición N°4 de una fuga de 3,0 mm.....	73
35 Presión del pistón .....	75
36 Caudal de aire .....	76
37 Caudal de aire – presión del pistón .....	76
38 Amplitudes de las ondas.....	77
39 Espectros de ultrasonido.....	78

40	Potencia requerida .....	79
41	Amplitud de onda – potencia requerida .....	80
42	Ajuste de la curva amplitud de onda – potencia requerida.....	94
43	Ecuación en el programa geogebra .....	94
44	Mediciones en el laboratorio de la facultad de mecánica.....	95
45	Medición N°2 en el laboratorio de la facultad de mecánica.....	95

## **LISTA DE ANEXOS**

- A**      Ábaco de selección del diámetro del cilindro y vástago
- B**      Selección del cilindro neumático
- C**      Ábaco de máxima carrera permitida antes que inicie el pandeo del vástago
- D**      Longitudes equivalentes de cada accesorio 1
- E**      Longitudes equivalentes de cada accesorio 2
- F**      Rugosidad absoluta de materiales
- G**      Diagrama de Moody
- H**      Selección de la tubería para el actuador
- I**      Pérdidas debido a fugas con presión de trabajo a 6 bar
- J**      Guía de prácticas de laboratorio

## RESUMEN

Se realizó la detección de fugas en sistemas de aire comprimido por medio de la utilización de la técnica predictiva de ultrasonido pasivo así como también se logró cuantificar las pérdidas energéticas que existen en sistemas de aire comprimido que presentan fugas.

La investigación realizada para desarrollar la presente tesis está enfocada en analizar cuáles son las consecuencias de las fugas y su incidencia en los parámetros de presión y caudal que existen en los sistemas de aire comprimido. Para el análisis se construyó un módulo que simula un sistema de aire comprimido en el cual se provocaron fugas por medio de orificios con diferentes diámetros.

En cada fuga se midió con el equipo de ultrasonido pasivo los decibeles, en el flujómetro se observó el caudal de aire que se fugaba por cada punto, para medir la presión que se perdía en el sistema se utilizó un manómetro y un pistón neumático el cual al descender su vástago golpeaba una balanza digital esto con el fin de poder observar cuál era la fuerza que nos marcaba el pistón con cada fuga abierta.

Para cuantificar las pérdidas energéticas se utilizó el equipo FLUKE 435 serie II, la potencia eléctrica que se obtuvo es la que se consume y se desperdicia a causa de cada fuga, luego se realizó el análisis para verificar cual sería la pérdida económica por motivo de las fugas.

Este trabajo se realizó bajo las líneas de investigación de la ESPOCH-2012; ARTÍCULO V de esta manera también se contribuirá indirectamente con la nueva matriz productiva y energética del país.



## **ABSTRACT**

This investigation was accomplished to detect leaks on compressed air systems through of predictive passive ultrasound technique was achieved as well as quantify energy losses that exist in compressed air systems leaks.

This research is focused on analyzing the consequences of leaks and its impact on the pressure and flow parameters that exist in compressed air systems are. For analysis a module is built that simulates a compressed air system in which leaks through holes with different diameters.

In each leak was measured with equipment passive ultrasound decibels in the flowmeter was observed airflow that ran away for every point, for measuring the pressure lost in the system a pressure gauge and a pneumatic piston descends to hit down its rod to a digital balance this with the purpose of observing what was the force that marked us with every open drain piston.

For quantifying the energy losses is used FLUKE 435 series II equipment, the electrical power obtained is consumed and wasted because each leak, then the analysis was performed to verify the economic loss which would because of leakage.

This work was conducted under the research at ESPOCH-2012; ARTICLE V thus also, it's recommended indirectly contribute to the new production and energy matrix.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El aire comprimido en los últimos cincuenta años se ha situado dentro de la industria de una manera común, es decir, se ha convertido en una fuente de energía principal dentro de los diferentes procesos productivos esto debido a las propiedades que contiene y a su fácil adaptación a cualquier proceso o tipo de aplicación. (APLICACIONES INDUSTRIALES, 2001)

Generalmente en toda planta industrial se tienen fugas de aire, ya que estos hacen parte de los servicios típicos de una planta de proceso lo que no se sabe es que el corregir todas las fugas llevará a la optimización de los procesos y ahorros energéticos considerables. Aproximadamente del 20 al 30% de toda la energía malgastada es contribuida a la salida del compresor. (RIVERA J, 2008)

Debido a la poca peligrosidad de un escape o fuga y al concepto equivocado que se tiene acerca del costo real de la producción de aire comprimido, las fugas presentes en los sistemas no son tratadas adecuadamente, teniendo como incidencia altos costos en cuanto a pérdidas económicas se refiere ya que el compresor es el equipo que mayor consumo energético presenta cuando un sistema de aire comprimido presenta fugas, por tal motivo es que existen tantas pérdidas económicas en las industrias, ya que, el valor del kW-h es muy bajo les parece algo insignificante pero al sumar el desperdicio de kW-h de un mes y peor aun de un año resultan valores de pérdidas económicas muy grandes.

La detección de modos de fallos en los sistemas de aire comprimido es uno de los ejes de acción del ingeniero de mantenimiento y uno de los campos de formación dentro de la facultad de Mecánica. En la industria, el ultrasonido pasivo es una técnica de gran ayuda para mantenimiento predictivo ya que se puede encontrar el lugar puntual, en el cual se está presentando un problema. (LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, 2011) .

## 1.2 Justificación

La utilización de aire comprimido en las industrias es muy frecuente, debido a que es más rápido en comparación con sistemas hidráulico y económico puesto que no es necesario restituir aceite, pero este tipo de sistemas presentan fugas, las cuales se traducen en aumento de costos de energía eléctrica. Dichos costos pueden ser muy elevados en el tiempo, por tanto, es necesario que los datos recopilados en las mediciones de estas fugas sean registrados de forma ágil, segura y transformados en valores monetarios confiables. (PERALTA D, FERNANDEZ D, GALIO G., 2011)

Para la simulación de estos efectos se requiere de un modular capaz de replicar de manera controlada y con procedimientos de seguridad adecuados las fugas de aire en estos sistemas con la finalidad de definir los procedimientos idóneos en la determinación de fugas y cuantificar las pérdidas energéticas. Por esta razón se ha tomado la iniciativa de realizar ésta investigación, la cual estará enmarcada en integrar un módulo desarmable el mismo que simulará las fugas en un sistema de aire comprimido, se evaluará las fugas encontradas acorde con los resultados obtenidos y se realizará un estudio acerca de las pérdidas energéticas en los sistemas que presentan fugas.

Se va determinar la relación existente entre las pérdidas de presión de un sistema de aire a presión y las ondas de ultrasonido generadas por las fugas para determinar con ésta técnica las pérdidas energéticas que se producen en estos sistemas.

La implementación de este modular proporcionará de un beneficio sustancial en la formación del Ingeniero de Mantenimiento, ya que se le proporcionará de un enfoque proactivo relacionado con la eliminación de uno de los problemas más severos existentes en la generación de aire comprimido de las industrias ecuatorianas. De esta manera también se contribuirá indirectamente con las nuevas matrices productiva y energética del país.

Este trabajo se realizará bajo las líneas de investigación de la ESPOCH-2012; ARTÍCULO V. *Tecnologías de la Información, comunicación y procesos industriales*: programa para el desarrollo de automatización y control de procesos industriales.

### **1.3    Objetivos**

**1.3.1    Objetivo general:** Determinar pérdidas por fugas en tuberías de aire comprimido mediante la técnica de ultrasonido pasivo en el laboratorio de mantenimiento predictivo de la facultad de mecánica

**1.3.2    Objetivos específicos:**

Investigar acerca de los requerimientos para la generación de aire comprimido.

Diseñar una vez conocidos los requerimientos de un sistema de aire comprimido, un módulo para simular las fugas.

Recolectar en el módulo de pruebas los datos que se obtengan con cada fuga provocada.

Analizar los resultados obtenidos mediante la recolección de datos con cada fuga.

Determinar las conclusiones y recomendaciones acorde con los resultados obtenidos en la investigación.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Generación de aire comprimido

Por generación de aire comprimido, se entiende al proceso de elevación de presión del aire atmosférico en la sección de entrada del sistema neumático. El componente característico de la sección de entrada de un sistema de transmisión de energía neumático es el compresor.

El objetivo de un compresor es aumentar la presión del aire atmosférico mediante la transformación de la energía proporcionada por una fuente exterior. El aumento de presión del aire atmosférico en el compresor depende del tipo de compresor y del servicio requerido en los sistemas neumáticos convencionales este aumento es del orden de 5 a 10 bares. (JIMENEZ, 2003)

#### 2.2 Elementos que conforman un sistema de aire comprimido

Una instalación de aire comprimido está conformada por dos partes fundamentales que son:

- La central compresora
- Sistemas de distribución

**2.2.1** *La central compresora:* Es la parte más importante del sistema ya que no solo produce aire a diferentes presiones de acuerdo a la que necesite, sino que también el aire debe ser limpio y sin humedad para evitar una serie de tratamientos y altos costos que generan la purificación del aire.

El tratamiento de purificación de aire comprimido se lo debe realizar, ya que en la salida del compresor el aire presenta generalmente una serie de agentes contaminante y con mayor frecuencia agua, lo cual es un aspecto negativo ya que el aire debe salir puro y sin ningún tipo de humedad a los diferentes tipos de servicios al cual se lo va utilizar.

La calidad del aire comprimido y el tratamiento de purificación se deben realizar en conjunto para la obtención del aire puro, dependiendo al tipo de servicio que se va requerir. En esta tabla se indicará cuál es la relación que debe tener el nivel de calidad de aire, aplicación y tratamiento que este debe recibir. (APLICACIONES INDUSTRIALES, 2001)

Tabla 1. Relación entre el nivel de calidad de aire, aplicación y tratamiento de aire

<b>Nivel</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Componentes de tratamiento de aire</b>
1	Aire para taller	Filtro separador centrifugo
2	Herramienta neumática, limpieza por chorro de arena, sistemas de control neumático	Secador de aire comprimido tipo refrigerativo, filtro para remoción de aceite
3	Aire para instrumentos, pintura aerosol, pintura electrostática, máquina de empaque	Secador de aire comprimido tipo refrigerativo, filtro para remoción de vapor de aceite.
4	Industria alimentaria química y farmacéuticas, laboratorios	Secador de aire comprimido tipo refrigerativo, filtro para remoción de vapor de aceite.
5	Tuberías exteriores (bajas temperaturas) cervecera, industria láctea, industrias electrónica, química y farmacéutica, laboratorios, transporte neumático de fármaco	Filtro de aire, filtro para remoción de aceite, secador desecante de bajo punto rocío, filtro de aire, filtro para remoción de vapor de aceite.
6	Aire respirable	Sistema de aire respirable (estacionario, portátil)

Fuente: (APLICACIONES INDUSTRIALES, 2001)

**2.2.1.1 Componentes de la central compresora:** Está constituida por siete partes fundamentales para la obtención de un aire purificado:

- Filtro de aire
- Compresor
- Enfriador
- Separador de aceite
- Depósito regulador
- Eliminador de impurezas
- Secador

*Filtro de aire:* Debido a que el aire presente en la atmósfera contiene una serie de impurezas, en la central compresora se debe colocar un filtro de aire para que el aire que ingrese al compresor al succionarlo pase por el filtro y en este se quede la mayor

cantidad de impurezas, ya que estas afectan en gran magnitud al funcionamiento del compresor.

*Compresor:* Es el equipo dentro del sistema que incrementa la presión del aire a partir de la presión atmosférica con el fin de proporcionarles energía y utilizarlos en múltiples aplicaciones. Los compresores son máquinas que tienen por finalidad aportar una energía a los fluidos compresibles, tales como el aire que es el fluido comprimido con mayor frecuencia pero también se comprimen el gas natural, el oxígeno, el nitrógeno, y otros gases de importancia industrial. (CUNALATA, 2010)

*Enfriador:* El papel fundamental es enfriar el aire caliente, lo cual provoca la reducción del volumen de aire; ayudando a que el compresor aumente considerablemente su rendimiento y además condensa el agua contenida en el aire.

*Separador de aceite:* Debido a que el compresor se le debe realizar lubricaciones para evitar el desgaste de sus partes, el separador ayuda a suprimir las partículas de aceite y sólidos que se adhieren en el aire cuando ingresan al compresor.

*Depósito regulador:* Conocido comúnmente como tanque de almacenamiento, se lo utiliza para evitar que el compresor esté funcionando todo el tiempo ya que el aire comprimido se acumula en el depósito y se logra mantener la presión necesaria en el sistema y además poder abastecer a todos los puntos de servicio y consumidores que requieran del aire comprimido.

*Eliminador de impurezas:* Detiene el ingreso de gotas de agua y las diferentes impurezas que contiene el aire después de su compresión.

*Secador:* es necesario para lograr que el aire llegue limpio, seco y totalmente purificado a los puntos de servicio requerido, existen dos tipos de secado:

- **Químicos:** este secado se logra mediante un cartucho lleno de sustancias químicas higroscópicas, el cuál retiene la humedad que llegue a contener el aire.
- **Mecánicos:** es la disminución de la temperatura del aire mediante un sistema de refrigeración. (APLICACIONES INDUSTRIALES, 2001)

**2.2.2** *Sistemas de distribución:* En los sistemas de distribución se produce el transporte del aire comprimido desde el tanque de almacenamiento hasta los consumidores finales. Para diseñar las dimensiones de la red de distribución se deberá tomar en cuenta que la máxima caída de presión en el sistema no debe ser mayor que 0,1 bares.

En sistemas de distribución de aire comprimido se pueden observar generalmente tres tipos de tuberías, las cuales cada una tiene su función específica.

**2.2.2.1** *Tuberías o ramales principales:* Estas tuberías son las que salen directamente de la central compresora.

**2.2.2.2** *Tuberías de distribución:* Estas tuberías salen de los ramales principales y se distribuyen por los puntos de servicio.

**2.2.2.3** *Tuberías de servicio:* Las de servicio salen de las tuberías de distribución, es decir, de los puntos de servicios a cada uno de los accesorios o consumidores finales.

La mejor forma de situar la línea de distribución es formando un anillo cerrado alrededor de la zona de consumo de aire, con esta disposición de la línea de distribución se consigue una adecuada y uniforme alimentación debido a que cada punto recibe el aire desde dos direcciones aunque los consumos sean intermitentes.

**2.2.3** *Instalación de tubería de aire:* Las redes de aire comprimido, generalmente están formadas por dos partes fundamentales:

- Línea principal
- Líneas secundarias

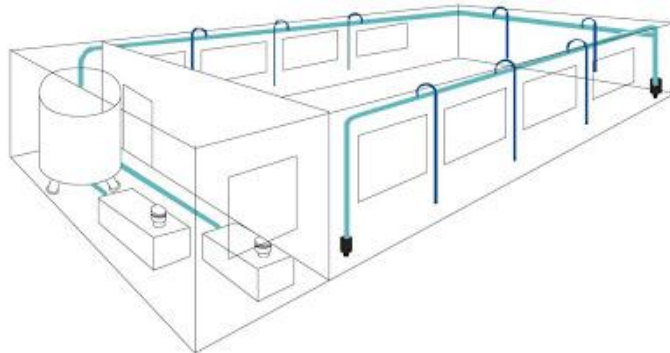
La línea principal sale de la central compresora, después transportan el aire comprimido a los diferentes puntos de servicio, generalmente están dispuestos de dos formas:

- En circuito abierto.
- En circuito cerrado.



**2.2.3.1 Circuito abierto:** Consiste en una entrada general, que se va distribuyendo a los distintos puntos de servicio. Este tipo de circuito es más utilizado en instalaciones de aire comprimido de pequeña y mediana importancia, o cuando se prevea que el consumo no disminuirá la presión en el punto final del circuito. Cuando todas las ramificaciones están consumiendo aire comprimido, en los puntos de servicio más lejanos a la central compresora la presión no va ser la misma, va a disminuir en gran medida a diferencia de los puntos de servicios iniciales e intermedios; así mismo cuando en una zona del circuito se produce algún daño, se queda sin servicio una gran parte de la misma.

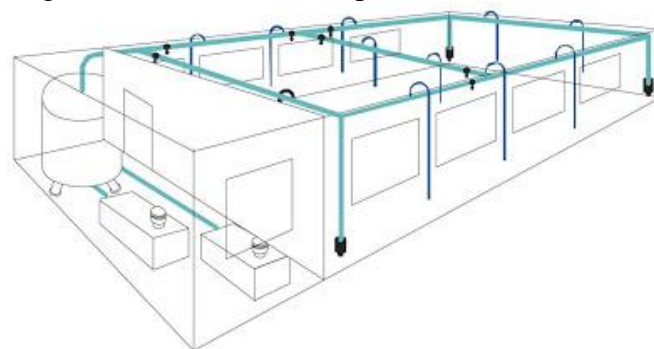
Figura 1. Red de aire comprimido circuito abierto



Fuente: (INDUSTRIAL, 2010)

*Circuito cerrado:* Es más, en su implantación (*hay que emplear mayor cantidad de material*), pero resultan ventajosas en cuanto a suministro de caudal con menos pérdidas de carga. Cuando se produce una avería en cualquier punto de la red, se puede aislar permitiendo el funcionamiento del resto de la instalación, si previamente se han dispuesto grifos o llaves de cierre convenientemente distribuidas. Se emplean en grandes instalaciones y siempre que se prevean consumos intermedios importantes.

Figura 2. Red de aire comprimido circuito abierto



Fuente: (INDUSTRIAL, 2010)

**2.2.4** *Consideraciones sobre redes de aire comprimido:* Deben tenerse en cuenta algunos de los siguientes conceptos en las instalaciones de redes de aire comprimido:

- Se evitarán las restricciones y desviaciones en ángulo recto.
- Los ramales de alimentación que pasan por válvulas y canalizaciones flexibles deben ser suficientemente amplios para proporcionar el caudal adecuado para la realización de las prácticas.
- Las tuberías deben estar provistas de los medios adecuados para la extracción de agua y residuos.
- Prever conexiones ciegas por si hay que ampliar la red.
- Es aconsejable instalar las tuberías con una cierta inclinación (3% mínimo), en dirección del caudal de aire, para que la gravedad y la misma corriente del aire arrastre el agua y residuos a los colectores y o ramales de descarga localizados en los puntos bajos del circuito.
- Para evitar que el agua de la línea llegue al equipo alimentado, los ramales no deben conectarse nunca en la parte inferior de la línea principal.
- Es conveniente filtrar, regular, lubricar el aire tan cerca como sea posible del punto de aplicación.
- Las tuberías generales deben de tener los diámetros apropiados. (ZHIMNAYCELA C., 2011)

**2.2.5** *Instalación de aire comprimido:* Estas instalaciones están compuestas de los siguientes elementos:

- *Llaves de paso:* Estas se utilizan para la manipulación de los diferentes ramales y deben ser del mismo diámetro de la tubería para que no exista al momento del paso del aire comprimido un estrangulamiento, porque esto causaría pérdidas de presión.

- *Purgadores:* Estos se utilizan en sistemas de aire comprimido porque se producen condensaciones y acumulación de agua y mediante los purgadores se logra eliminarlos.
- *Grupo de filtro, regulador y lubricador:* los secadores y filtros sirven para eliminar vapor de agua, pequeñas impurezas y además residuos de aceite que saben existir en los puntos de servicio. Para que exista una presión constante en el sistema se debe utilizar reguladores de presión y además los lubricadores permiten mantener todos los elementos neumáticos en un funcionamiento adecuado.
- *Enchufes rápidos con cierre automático:* permiten abrir el paso del aire comprimido en el momento en el que se acoplan a ellos la toma y se cierra en el momento en el que se desacoplan.
- *Mangueras para aire comprimido:* la elección de una manguera debe basarse en el consumo de aire libre que se requiere para realizar las prácticas o en el caso de las industrias en el consumo que requiere la herramienta cuando funciona a plena carga y a máxima potencia.

Una vez situados los puntos de consumo tenemos que realizar el diseño de la instalación teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones constructivas:

- Trazado de la red según el diseño del módulo y las actividades que se desarrollan dentro del laboratorio, escogiendo la mejor ruta para la tubería principal.
- El montaje de las tuberías se realizará de una forma correcta y lugar adecuado para facilitar su inspección y mantenimiento.
- Las sujeciones de las tuberías se realizarán de forma que permita su variación de longitud cuando se produzca cambios de temperatura, sin que tenga lugar las deformaciones ni tensiones adicionales.
- No deben realizarse nuevas tomas o salidas de aire sin comprobar antes si los diámetros de las tuberías son todavía suficientes, para una cantidad adicional de aire.

- La pendiente de las tuberías será del 1% en la dirección del flujo.
- Se colocarán purgadores al final de cada tramo para la recogida del agua condensada.
- Se recomienda que la pérdida de presión hasta el punto más desfavorable se establezca en un máximo de 0,6 bares.
- En cada uno de los bajantes de las acometidas, y previo a la toma del equipo neumático, se instalará un equipo de mantenimiento compuesto por: regulador de presión, filtro y lubricador.
- Los tipos de tuberías utilizados son de hierro galvanizado, unidas mediante roscado. Para evitar fugas se utilizará cinta de teflón.

## **2.3 Clasificación y selección de los compresores**

**2.3.1 Clasificación de los compresores:** Dependiendo de la forma en que se produce la transformación de energía mecánica en energía de presión en el gas, los compresores se clasifican en:

**2.3.1.1 Compresores volumétricos:** En los cuales se comprimen porciones del gas, disminuyendo su volumen, mediante un elemento del compresor que se desplaza conjuntamente con el gas. Estos compresores se llaman también de desplazamiento positivo.

En cuanto al modo de funcionamiento, está caracterizado por la forma del diagrama de compresión en el sistema P, V: el incremento de presión del fluido puede ser progresivo, en cuyo caso el diagrama realizado tiene la misma forma que el de un compresor de pistón, o bien instantáneo, lo que se traduce en diagrama rectangular.

En todos los casos, la comunicación entre el compresor y los recintos en los que tiene lugar la aspiración o la descarga se establece o suprime por la rotación de ciertos órganos, de manera que la entrada y la salida del fluido no están reguladas (como en los

compresores de pistón) por válvulas accionadas o por válvulas automáticas. Los compresores volumétricos se clasifican en:

- *Alternativos*: de pistón, de membrana.
- *Rotativos*: de tornillo (helicoidal bicelular), de paletas (rotativo multicelular), roots, de anillo de agua.

**2.3.1.2** *Compresores rotodinámicos*: Un elemento giratorio con aletas o álabes induce fuerza centrífuga al gas aumentando su energía y cantidad de movimiento. Estos compresores también se llaman dinámicos o de desplazamiento negativo.

Otra diferencia importante entre los compresores volumétricos y rotodinámicos radica en que los primeros realizan el proceso de compresión de una manera discontinua o pulsante, en cambio que los compresores rotodinámicos realizan el proceso de compresión de una forma continua. Los compresores rotodinámicos se clasifican en:

- Centrífugos
- Axiales

Esta sección toma como referencia las normas API Standard 617, 618 y 619 que se refieren a los compresores de utilización en la industria del petróleo y gas para los compresores axiales, centrífugos y reciprocantes; y, de desplazamiento positivo rotativos, respectivamente. (TROYA, 2010 págs. 45,46).

**2.3.2** *Selección de los compresores*: La elección del compresor se realiza sobre la base del caudal a suministrar y la presión de trabajo. Normalmente se engloban por tamaños en diferentes categorías, pudiendo ser pequeños, medianos o grandes según el caudal.

**2.3.2.1** *Criterios de selección*: El rango de tamaños de los compresores empleados en neumática comprende desde compresores de caudal inferior a 1 l/s, con o sin equipo de tratamiento, hasta instalaciones múltiples en las cuales los compresores generan caudales de varias centenas de m<sup>3</sup>/h. Los tamaños de los compresores se engloban en las siguientes categorías:

- *Pequeños*: caudales de hasta 40 litros por segundo y potencia de entrada de no más de 15 kW.
- *Medianos*: caudales de entre 40 y 300 litros por segundo y potencia de entrada de entre 15 y 100 kW.
- *Grandes*: cualquiera por encima del límite anterior.

El mejor compresor se elige fundamentalmente a partir del caudal que deba suministrar y la presión de trabajo. Otros condicionantes son el rendimiento energético, el ruido de la instalación, los requisitos de mantenimiento y reposición y, claro está, el costo total. (JIMENEZ, 2003)

**2.3.2.2 Parámetros en la selección de un compresor:** Sin tener en cuenta otros parámetros, los compresores alternativos son generalmente adecuados y suelen ser los más económicos para caudales de hasta 100 m<sup>3</sup>/min. Las demandas superiores las cubren fácilmente los compresores centrífugos, aunque con rendimientos no tan atractivos para capacidades inferiores a los 170 m<sup>3</sup>/min.

Las capacidades de los compresores centrífugos van hasta 2800 y 3500 m<sup>3</sup>/min. Las características principales en cuanto a funcionamiento y caudal para diversos tipos de compresores se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Compresores alternativos

<b>Presión</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Tipo</b>
Menos de 60 psi (4 kg/cm <sup>2</sup> )	-----	Una etapa
60 – 100 psi (4-7 kg/cm <sup>2</sup> )	Menos 300 cfm (8,5 m <sup>3</sup> /min)	Una etapa
60 – 100 psi (4-7 kg/cm <sup>2</sup> )	Menos 300 cfm (8,5 m <sup>3</sup> /min)	Dos etapas
Más de 100 psi (7 kg/cm <sup>2</sup> )	-----	Dos, tres o cuatro etapas según la demanda específica

Fuente: (TROYA, 2010 pág. 51)

Tabla 3. Parámetros en la selección de un compresor

Parámetro	Observaciones
Rendimiento total	De importancia primordial si se requieren grandes caudales.
Capacidad y presión	Determina normalmente el tipo idóneo.
Control	Confirmar la adaptación a las condiciones de carga.
Utilización	Debe tenerse en cuenta con el rendimiento. El uso intermitente sin carga anula la importancia del rendimiento como parámetro de selección.
Refrigeración	El rendimiento depende de la refrigeración; si se proyecta bien este sistema se necesita menos agua y se reduce el costo. La refrigeración por aire rinde algo menos y es de aplicación más limitada.
Refrigeración intermedia	
Velocidad	Determina la aptitud para accionamiento directo o la necesidad de variador.
Vibración	Los elevados niveles de vibración pueden causar dificultades o limitar las velocidades de los motores.
Tipo de válvula	Una válvula correctamente proyectada asegura un funcionamiento con pocas pérdidas y fiable (sobre todo en los compresores alternativos)
Lubricación	La lubricación a presión se emplea, generalmente, en los modernos compresores alternativos. Algunos tipos pueden funcionar sin lubricación.
Mantenimiento	Los costos de depreciación y de mantenimiento pueden convertirse en factores primarios de los gastos generales después del primer año.
Ruido	Algunos tipos son inevitablemente ruidosos y difíciles de silenciar sin una pérdida drástica de rendimiento.
Costo del motor	Puede influir en el costo inicial y en el de funcionamiento.
Costo de la cimentación	Importante según los tipos.
Adaptación	Capacidad de adaptarse a las instalaciones.

Fuente: (TROYA, 2010 págs. 47,48)

## 2.4 Ultrasonido pasivo

El análisis por ultrasonido se fundamenta en el estudio de las ondas de sonido de alta frecuencia las mismas que son producidas por las máquinas que se encuentran con algún tipo de inconveniente o problema.

Las ondas de ultrasonido debido a su corta longitud tienen la capacidad de disminuirse muy rápidamente, esta característica facilita la localización de la fuente en las que se originan dichas ondas a pesar de que el contexto operacional sea muy ruidoso.

**2.4.1 Principio físico de ultrasonido:** La vibración de los objetos produce ondas mecánicas longitudinales las cuales conforman el sonido, dichas ondas producen una

sensación sonora al oído humano, las ondas de sonido tienen las siguientes características:

- *Ciclo*: Viene a ser el movimiento completo de una onda de sonido.
- *Longitud*: Es el espacio o trayecto de la onda que necesita para llegar a completar un ciclo. Generalmente se lo conoce como  $\lambda$ .
- *Amplitud*: Es la magnitud máxima de la onda de sonido que puede ser en sentido positivo o negativo.
- *Frecuencia*: Es el número de ciclos por unidad de tiempo

**2.4.2** *Componentes del sonido*: Los componentes del sonido son los siguientes:

- Desplazamiento
- Ciclo
- Periodo
- Velocidad
- Intensidad
- Longitud de onda
- Frecuencia
- Decibeles
- Amplitud

*Periodo (T)*: es el tiempo que tarda en producirse un ciclo completo de la onda sonora. Su unidad es el segundo.

*Frecuencia (f)*: es el número de ciclos que se realizan la inversa del periodo. Se mide en Hz

*Ciclos por segundo*: En esta figura se puede observar que el ciclo tiene un período de 0,004 segundos y esta duración se tendría que repetir 250 veces para llenar un segundo, es decir, su frecuencia es de 250 Hz.





## **2.5 Ultrasonido propagado en aire**

**2.5.1 Vacío:** El aire se compone de partículas por lo cual es un medio elástico. Este medio elástico permite la transferencia de vibraciones de sonido. Sin aire, el sonido no viajará ya que no hay moléculas a mover por lo que no puede ser llevado en vacío. Sólo para dar una idea de cuán lejos las moléculas están a  $1 \cdot 10^8$  promedio viajada por una molécula de aire antes de colisión con otra molécula es 480 Kms.

**2.5.2 Movimiento de ondas en sonido:** Las ondas de sonido son vibraciones que se propagan en un medio transfiriendo energía por el medio. Una manera de ilustrar este concepto es imaginar una fuente de agua en calma. Deje caer una piedra en el medio y un patrón de olas comienza a formarse desde el punto donde se dejó caer la piedra. Las olas viajarán a la orilla o hasta que la energía es disipada y el agua se vuelve a estar en calma. Si observamos estas olas con detenimiento, entenderemos un punto muy interesante. El agua no se mueve hacia fuera. Es la onda que viaja por la superficie, no el agua.

**2.5.3 Distribución de energía de sonido:** Inicialmente, la energía de sonido viajará longitudinalmente, las partículas vibrarán en proporción a la energía que reciban. El área más cercana al impacto original contendrá la mayor energía.

### **2.5.4 Penetración del sonido**

**2.5.4.1 Velocidad:** La distancia que una onda viaja por un medio en un lapso de tiempo, es también conocido como velocidad de onda. La velocidad de onda permanece constante en un medio dado tal como el aire. Generalmente las ondas de sonido viajan más rápido por sólidos y líquidos que por gases. Esto se debe al tiempo extra que toma para que ocurran las colisiones entre moléculas en un gas. Moléculas de gas están más separadas (menos denso) y tienen un coeficiente de elasticidad menor. El sonido es más veloz en sólidos.

Los factores principales que afectan la velocidad son elasticidad y densidad. La temperatura no varía regularmente en sólidos y líquidos así es que las variaciones de temperatura tienen muy poco efecto en la velocidad. La temperatura, sin embargo,

podría ser un factor significativo cuando se trata de gases. Los incrementos de temperatura ocasionan que las moléculas de gas choquen una con otra a mayor velocidad.

**2.5.4.2 Longitud de onda:** El ultrasonido se mueve a una velocidad fija por un medio específico. Las longitudes de onda pueden ser definidas el trayecto de las ondas. La velocidad por frecuencia representa a una longitud de onda.

**2.5.4.3 Decibel:** El decible o decibelio es la unidad de medida de la intensidad sonora. Su símbolo es db y corresponde al logaritmo decimal de la relación entre la intensidad del sonido que se ha de medir y la de otro sonido conocido que se toma como referencia.

Generalmente el sonido que se escucha es directamente proporcional a la intensidad, es decir, entre mayor intensidad más fuerte es el sonido.

**2.5.4.4 Amplitud:** La oscilación de una onda de sonido puede ser ilustrado por la oscilación de un péndulo, en el cual la distancia desde el punto de reposo al punto máximo de oscilación es la amplitud. Amplitud de una onda de sonido no depende de la frecuencia de la onda.

**2.5.5 Nivel de intensidad de sonidos:** La amplitud de una onda de sonido de frecuencia y longitud de onda dada es una medición de su intensidad. Intensidad es la cantidad o grado de fuerza de sonido en un área determinada o volumen. (RIVERA J, 2008)

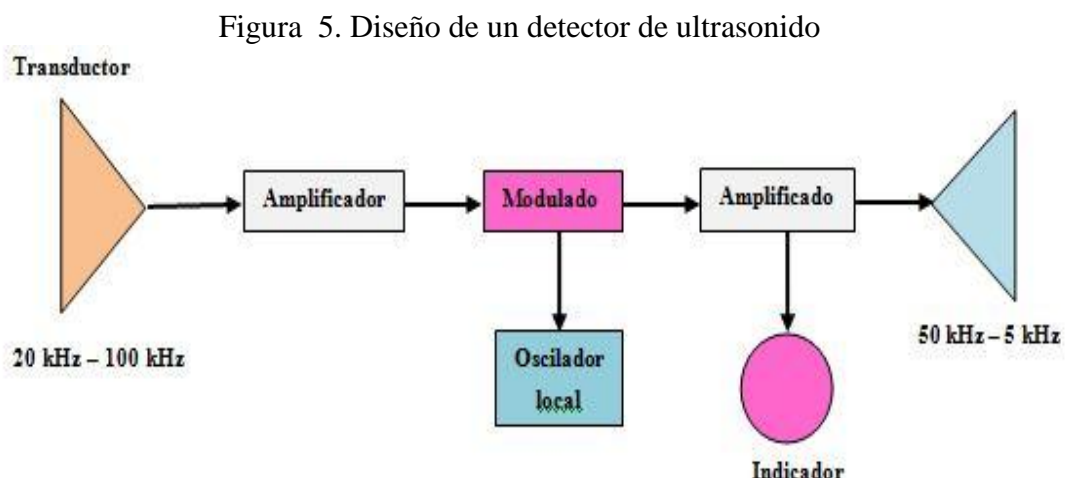
## **2.6 Técnica de detección de ultrasonido**

El ultrasonido pasivo es muy utilizado en el mantenimiento la cual se basa en el estudio de las ondas sonoras de alta frecuencia que tiene origen en los equipos cuando algo fuera de lo común está sucediendo. Se fundamenta en que pérdidas de presión o vacío, descargas eléctricas y fuerzas de rozamiento, llegan a producir ondas de sonido de alta frecuencia, de longitud corta y pierden la energía rápidamente, esto que permite que los problemas en los equipos sean localizados fácil y rápidamente antes de que se produzcan fallas que causen un paro en la planta de producción de una empresa.

Los instrumentos con los que es posible transformar las ondas de ultrasonido en ondas audibles se denominan detectores ultrasónicos o medidores de ultrasonido, con la utilización de estos instrumentos las señales de ultrasonido que han sido transformadas pueden ser escuchadas por medio de audífonos y en muchos casos pueden ser observadas en una pantalla.

Los detectores ultrasónicos son fáciles de manejar esto gracias que el comportamiento del sonido es direccional, la fuente de problema es detectada debido a que el sonido que se produce aquí es mucho más fuerte que en los demás puntos inspeccionados.

Los detectores ultrasónicos cuentan con un selector de frecuencias que le permite al usuario filtrar el ruido del ambiente y escuchar la onda ultrasónica con total claridad. A continuación se muestra el diseño interno de un detector ultrasónico. (LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, 2011)



Fuente: (LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, 2011)

### 2.6.1 Aplicaciones de la detección de ultrasonido

**2.6.1.1 Monitoreo de rodamientos:** Un rodamiento sea este nuevo o usado en buenas o malas condiciones emite ondas de ultrasonido debido a la fricción entre sus partes por medio de la detección del ultrasonido se puede determinar su estado y también identificar si existe algún problema.

Figura 6. Monitoreo de rodamientos con ultrasonido pasivo



Fuente: (LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, 2011)

**2.6.1.2** *Detección de fugas de presión o vacío:* Los equipos detectores de ultrasonido detectan fácilmente el sonido proveniente de la turbulencia ocasionada por un escape de presión o vacío en los sistemas.

Figura 7. Detección de fugas de presión o vacío por medio del ultrasonido



Fuente: (LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, 2011)

**2.6.1.3** *Inspección de instalaciones eléctricas:* Las ondas ultrasónicas también son producidas por las descargas eléctricas y el efecto corona y que pueden ser detectadas a través del análisis por ultrasonido.

Figura 8. Inspección de instalaciones eléctricas utilizando la técnica de ultrasonido.



Fuente: (LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO, 2011)

## 2.7 Procedimiento de inspección por ultrasonido

Para efectuar una inspección por ultrasonido se debe seguir las siguientes recomendaciones:

- Use el módulo de escaneo (Trisónico TM).
- Inicie con el selector de sensibilidad a 0 (Máximo).
- Comience a escanear dirigiendo el módulo hacia la zona de pruebas. El procedimiento consiste en pasar de la "grueso" a "fino" - más y más sutiles ajustes se realizarán conforme se acerque a la fuga.
- Si detecta mucho ultrasonido en el área, reduzca el ajuste de sensibilidad y prosiga con el escaneo.
- Si es difícil aislar la fuga debido a los ultrasonidos que compiten, coloque la SONDA DE HULE sobre el módulo de escaneo y prosiga en el área de inspección.
- Trate de escuchar un sonido de "escape" mientras observa el medidor.
- Siga el sonido al punto donde es más fuerte. El medidor mostrará una lectura más alta cuando se aproxime a la fuga.
- Con el fin de centrarse en la fuga, siga reduciendo la sensibilidad y mueva el instrumento más cerca del sitio donde se sospecha que se encuentra la fuga hasta que finalmente esté en condiciones de confirmar su existencia.

**2.7.1** *Para confirmar una fuga:* Coloque el módulo de escaneo (Trisonic TM), o la sonda de hule (si esta se encuentra ya en el módulo de escaneo) cerca del sitio donde se sospecha una fuga moviéndolo ligeramente, ida y vuelta, en todas las direcciones. Si la fuga está en esta ubicación, el sonido aumentará y disminuirá en intensidad a medida que hace barrido sobre ella. En algunos casos, es útil para posicionar la sonda de hule directamente sobre el sitio donde se sospecha la fuga y empújela hacia abajo para "aislar la zona" de los sonidos del entorno. Si está es la fuga, el sonido de ráfaga va a continuar.

Si este no es el sitio de la fuga, el sonido decaerá. (INC. UE SYSTEMS)

**2.7.2 Superando dificultades:** Si los ultrasonidos que se encuentran compitiendo hacen difícil el aislamiento de la fuga, existen dos procedimientos a realizarse:

**a) Manipule el medio ambiente:** Este procedimiento es relativamente simple. Cuando es posible, apague el equipo que está produciendo el ultrasonido que compite o aislé el área cerrando puertas y/o ventanas.

Manipule el instrumento y use técnicas de blindaje. Si no puede manipular el medio ambiente, trate de aproximarse al sitio de prueba y manipule el instrumento apuntando en dirección opuesta de los ultrasonidos que se encuentran compitiendo. Aislé el área de la fuga reduciendo la sensibilidad de la unidad y dirija la punta de la sonda de hule en la zona de prueba, realice este procedimiento en pequeñas secciones a la vez. En algunos casos extremos, cuando la revisión de fugas es difícil a 40kHz, tratar de "sintonizar" el sonido de la fuga "desechando" el sonido problema. En este caso, ajustar la frecuencia hasta que el sonido de fondo se reduce al mínimo y luego proceder a la escucha de la fuga. (INC. UE SYSTEMS)

## **2.8 Factores que causan las fugas en los sistemas**

Generalmente en los sistemas de aire comprimido existen fugas en cualquier parte como por ejemplo:

- Mangueras, acoples rápidos, accesorios.
- Equipos que regulan la presión.
- En las trampas de condensado.
- En las diferentes uniones de accesorios y tubería.

De tal manera que los factores que causarían las fugas en los sistemas de aire comprimido son: (GRUPO DE GESTIÓN EFICIENTE DE ENERGÍA)

- Las válvulas de los drenajes no se encuentran cerradas correctamente.
- Incorrecta selección del compresor para el sistema al cual está instalado.

- La distribución del sistema de aire comprimido es incorrecto, existiendo una gran cantidad de accesorios y uniones de tuberías lo que provoca caídas de presión en el sistema.
- Falta de colocación de secadores y filtros, lo cual produce demasiado arrastre de condensado.
- Falta de instalación de trampas de vapor que permiten la evacuación de condensado y evitan la fuga de aire.
- Falta de mantenimiento en todos los elementos que conforman el sistema.
- El sistema de aire comprimido de tener una longitud lo más pequeña posible, para evitar pérdidas de presión la tubería debe estar de acorde con el flujo de aire.
- Falta de revisión diaria por parte de los operadores de todos los accesorios y equipos del sistema lo cual ayudaría a encontrar rápidamente las fugas antes de que se vuelvan un problema muy grande.

## **2.9 Efecto de las fugas en el sistema**

Las fugas en un sistema provocan caídas de presión, de esta forma afectan a equipos y disminuye la producción en las industrias, provocan en los compresores ciclos de encendido y apagado más cortos con esto los tiempos de funcionamiento o trabajo de los compresores aumentan y por ende aumentan también el desgaste y el gasto por concepto de mantenimiento de los mismos, incluso la existencia elevada de fugas en un sistema puede llevar a la necesidad de instalar un compresor adicional lo cual sería innecesario. La humedad en el sistema de aire comprimido tiene un alto porcentaje, lo que no es apropiado para el funcionamiento del sistema.

En la siguiente tabla se ofrece una idea de lo que puede representar una fuga en costo anual, para un sistema convencional que opere de forma continua, para un costo de electricidad de 0,05 USD/kW y una presión de descarga de 115 psi. (GRUPO DE GESTIÓN EFICIENTE DE ENERGÍA)



Tabla 4. Representación de una fuga en costo anual.

<b>Diámetro de la fuga</b>	<b>Costo anual USD/año</b>
1/16"	\$ 523
1/8"	\$2095
1/4"	\$8382

Fuente: (GRUPO DE GESTIÓN EFICIENTE DE ENERGÍA)

## 2.10 Soluciones para las fugas encontradas

La manera efectiva de encontrar puntos de fugas es aplicando un detector ultrasónico este equipo de diagnóstico detecta los sonidos de alta frecuencia que presentan las fugas de aire, una manera compleja para la detección de fugas en aplicando una solución jabonosa en los puntos en donde que se presume que existe una fuga. La efectividad de un programa de prevención de fugas se da involucrando al personal en la evaluación, identificación, reparación y verificación de las fugas. (GRUPO DE GESTIÓN EFICIENTE DE ENERGÍA)

- No mantener abierta las válvulas de los drenajes debido a que actúan como fugas de aire si no existe condensado.
- Instalar el compresor recomendado, debido a su mayor eficiencia, lo cual generará un ahorro significativo.
- Utilizar válvulas temporizadas para los drenajes, debido a que si utiliza válvulas de bola se necesita mayor atención por parte del operador para evacuar el condensado o para evitar que se desperdicie aire comprimido.
- Realizar una instalación con una distribución del sistema correcto.
- Instalar secadores y filtros para mejorar la calidad de aire del sistema de aire comprimido, para tener una mayor vida útil en equipos, elementos conexos y accesorios, debido a que no habrá demasiado arrastre de condensado.
- Realizar labores de mantenimiento preventivo en el sistema, esto permite tener un mejor control del mismo y evitar paradas en la producción.

- Instalar bajantes tipo cuello de ganso para evitar el arrastre de condensado.
- Hacer revisiones periódicas en la tubería, en especial en las uniones ya que se pueden presentar nuevas fugas, por ende se presentarían pérdidas económicas. (MURILLO M, 2011)

## 2.11 Características y datos técnicos del equipo

ULTRAPROBE 15000 es un instrumento versátil con muchas características lo que permite una inspección fácil, rápida y precisa. Es muy simple de usar como una herramienta de inspección sencilla, pero este instrumento tiene funciones que una vez que aprendamos a utilizarlas nos llevaran a un mundo de oportunidades en nuestras inspecciones y análisis de datos. ULTRAPROBE 15000 tiene muchas aplicaciones que van desde la detección de fugas hasta la inspección mecánica y puede ser utilizado para determinar tendencia, el análisis o simplemente encontrar un problema.



Fuente: (INC. UE SYSTEMS)

**2.11.1 Datos técnicos del ULTRAPROBE 15000:** Entre los principales datos técnicos del ULTRAPROBE 1500 están:

- *Construcción:* Tipo pistola de mano con recubrimiento de aluminio y plástico ABS.
- *Rango de frecuencia:* 20 kHz a 100 kHz (ajustable en incrementos de 1 kHz).

- *Visualizador:* Pantalla táctil QVGA- IR, puntero láser, cámara, analizador de espectro.
- *Temperatura IR:* -20 °C a 500 °C.
- *Cámara:* 2.0 Mega Pixeles.
- *Puntero láser:* Salida Europea solo <1mW – longitud de onda 640nm – producto láser clase II.
- *Puntero laser:* Todos excepto salida Europea <5mW – longitud de onda 640nm – producto láser clase IIIa.
- *Memoria:* 400 espacios de grabación de datos.
- *Temperatura de operación:* 0 °C a 50 °C (32 °F a 122 °F).
- *Sondas (Probetas):* Módulo de escaneo trisónico y módulo estetoscopico, módulo de largo alcance y módulo RAS-MT.
- *Auriculares:* Auriculares de lujo atenuadores de ruido ambiente para utilización con casco de seguridad.
- *Indicadores:* dB, frecuencia, estado de carga de batería y gráfica de barras de 16 segmentos.
- *Sensibilidad:* Detecta fugas de diámetro 0.127 mm (0.005”) a 0.34 bar (5 psi) a una distancia de 15.24 m (50 ft.)\*
- *Umbral de audición:* 1 x 10<sup>-2</sup> std. cc/s to 1 x 10<sup>-3</sup> std. cc/s.
- *Modos de operación:* dB (principal), IR, ABCD, espectro y aplicación específicos, analizador de espectro (modos): espectro, series de tiempo y dual específico.

- *Paquete ULTRAPROBE 15,000*: Cumple y excede los requerimientos ASTM E1002-2005 para la detección de fugas depende de los parámetros de la fuga. (INC. UE SYSTEMS)

**2.11.2 Características del ULTRAPROBE 15000**: Existe una serie de datos técnicos del equipo los cuales detallaremos a continuación:

- Tecnología de pantalla táctil.
- Analiza la condición con el analizador espectral incorporado
- Es posible planificar/Revisar rutas en el mismo equipo.
- Tome temperaturas con el termómetro infrarrojo.
- Permite fotografiar puntos de inspección con la cámara integrada.
- Múltiples pantallas de datos: Temperatura DBL y Análisis Espectral.
- Nos permite revisar grupos de alarma y generar informes.
- Almacene datos, sonidos e imágenes.
- Podemos revisar el histórico de datos registrados.
- Señale localizaciones con el puntero láser.
- Ajuste de la emisividad.

*Pantalla principal*: Seleccione dos iconos para que se muestren en todo momento en la Vista de la Pantalla Principal: decibelios, frecuencia, número de registro, niveles de sensibilidad, aplicación; toque la pantalla para cambiar la sensibilidad, la frecuencia, o ver un icono. (INC. UESYSTEMS)

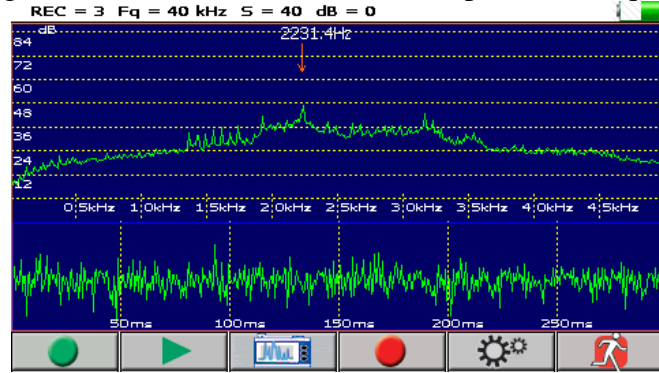
Figura 10. Pantalla principal del equipo



Fuente: (INC. UESYSTEMS)

*Visualizador de análisis espectral*: Tres vistas que incluyen: FFT y series de tiempo, FFT, Series de tiempo. Ve/Analice muestras de sonido en su equipo, guarde el sonido, e incluso la imagen del sonido, ajuste el tiempo de muestreo.

Figura 11. Visualizador de análisis espectral del equipo



Fuente: (INC. UESYSTEMS)

*Temperatura y dB:* Visualice los dB, vea las fluctuaciones de intensidad en una barra indicadora, vea la temperatura (°C or °F), ajuste la emisividad para exactitud en la temperatura, grabe datos, descargue datos y temperatura en su ordenador.

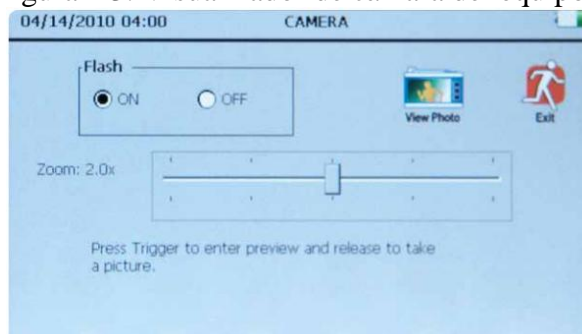
Figura 12. Temperatura y dB del equipo



Fuente: (INC. UESYSTEMS)

*Visualizador de cámara:* tome una foto, la función de zoom le permitirá capturar un punto de prueba de cerca, flash integrado, que se puede activar o desactivar, almacene datos de las imágenes, adjunte imágenes a los datos de las inspecciones para mejorar los informes.

Figura 13. Visualizador de cámara del equipo



Fuente: (INC. UESYSTEMS)

**2.11.3 Aplicaciones del ULTRAPROBE 15000 touch:** El ULTRAPROBE 15,000 Touch es el sistema de inspección más avanzado. Utilizado para casi cualquier aplicación de planta, el sistema medirá, analizará y recopilará todos los datos utilizando una tecnología sencilla de pantalla táctil durante su ruta de inspección. Usted nunca ha experimentado un sistema tan robusto, tan fácil de utilizar. Aplicaciones específicas donde el equipo es habitualmente utilizado son:

- *Análisis de inspecciones/tendencias mecánicas:* Condición de rodamientos, condiciones de roce, cavitación, engranajes / cajas de engranajes, bombas / motores, falta de lubricación / lubricación excesiva.
- *Análisis de inspecciones eléctricas:* Para detección y análisis de los siguientes tipos de fallos: arco, tracking, corona para su uso en las siguientes aplicaciones: conmutadores, transformadores, aisladores, relés, barras de bus.
- *Detección y análisis de fugas / auditorías energéticas:* Válvulas, trampas de vapor, aire comprimido, gases comprimidos (O<sub>2</sub>, NO, etc.). (INC. UE SYSTEMS)

## **2.12 Pérdidas energéticas en sistemas de aire comprimido**

Un gran porcentaje de las pérdidas de energía en un sistema de aire comprimido se debe a las fugas, llegando a representar hasta un 30% y en casos extremos hasta el 50% de la producción de aire.

En una planta en donde que se apliquen un buen mantenimiento y un adecuado programa de control de fugas, las fugas deben estar entre el 5 y el 10% de la producción de los compresores. En la gran mayoría de plantas industriales se producen grandes pérdidas por mal seleccionamiento del compresor, por ende al tener un equipo sobredimensionado causa que el factor de potencia disminuya, lo que causa penalizaciones en la plantilla de consumo eléctrico.

Se puede ahorrar mucho dinero revisando periódicamente el sistema de aire comprimido: hermetizando fugas, adaptando máquinas y consumidores de aire a las condiciones operativas pertinentes y sustituyendo herramientas y equipos por variantes

de menos consumo energético. Una adecuada operación de un sistema de aire comprimido mejora el rendimiento de los procesos productivos en los cuales se esté aplicando este tipo de energía. La mejora de la eficiencia energética en dichos sistemas se ve reflejada en la disminución del 20 al 50% del consumo de electricidad. (GRUPO DE GESTIÓN EFICIENTE DE ENERGÍA)

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DEL MÓDULO Y PRUEBAS

#### 3.1 Cálculos del módulo de pruebas

**3.1.1 Selección de pistón neumático:** Se asume que la fuerza máxima  $F_1$  a la que va a estar sometida la balanza será de 200 lb o 90,72 kg. Debido a los esfuerzos internos que existen por las juntas a la fuerza teórica se le adiciona el (50 - 100) % de la fuerza requerida, de dónde: (Catálogos, 2011)

$$F_2 = \frac{F_1}{\lambda} ; \text{ Fuerza real en el cilindro} \quad (1)$$

$$F_T = \frac{F_2}{\mu} ; \text{ Fuerza teórica del cilindro} \quad (2)$$

Dónde:

$$F_{\text{máx. requerida}} = F_1$$

$\lambda$  = factor de carga a velocidad normal

$\mu$  = rendimiento interno por rozamiento de juntas

$F_T$  = fuerza teórica del cilindro

$F_2$  = fuerza real en el cilindro

Datos:

$$F_{\text{máx. requerida}} = F_1 = 200 \text{ lb}$$

$$\lambda = 0,7$$

$$\mu = 0,9$$

$$F_T = \frac{F_1}{\mu * \lambda} \quad (3)$$

$$F_T = \frac{200 \text{ lb}}{0,9 * 0,7}$$

$$F_T = 317,46 \text{ lbf} \quad \text{ó} \quad 1412,06 \text{ N}$$



Para encontrar los parámetros para la selección del cilindro tomamos la presión estándar en línea para uso normal industrial de  $P_{cilindro} = 6 \text{ bar}$  y  $F_T = 1412,06 \text{ N}$  calculado anteriormente, así obtenemos lo siguiente datos del Anexo A:

$$\phi_{cilindro} = 63 \text{ mm} ; \phi_{vástago} = 20 \text{ mm} ; L_{carrera} = 100 \text{ mm}$$

Con los datos del Anexo A se obtiene los parámetros para la selección del cilindro neumático del Anexo B.

Tabla 5. Parámetros de selección del cilindro neumático

Parámetros de selección del cilindro neumático			
Tipo de cilindro	$P_{max.trabajo}$	$T_{máxima}$	$T_{mínima}$
Doble efecto, amortiguador fija	10 bar	80 °C	20 °C

Fuente: (Pneumatic, 2007)

**3.1.1.1 Carga crítica de pandeo del vástago:** Los siguientes datos  $F_T = 1412,06 \text{ N}$  y  $\phi_{vástago} = 20 \text{ mm}$  se utilizan en la tabla del Anexo C, donde se encuentra la máxima carrera permitida antes de que inicie el pandeo del vástago, dónde:

$$L_{critica \text{ pandeo}} = 0,80 \text{ m}$$

A continuación se calcula el radio de giro ( $r_g$ ), para el cual primero se necesita encontrar el área del vástago ( $A_v$ ) y el momento de inercia ( $I$ ) (Catálogos, 2011)

$$A_v = \frac{\pi * (\phi_v)^2}{4} \quad (4)$$

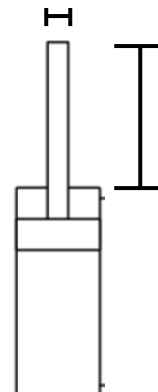
Dónde:

$A_v$  = área del vástago

$\phi_v$  = diámetro del vástago

$$A_v = \frac{3,1416 * (20 \text{ mm})^2}{4}$$

$$A_v = 0,00031416 \text{ m}^2$$



Dónde:

I= momento de inercia

$\phi_v$  = diámetro del vástago

$$I = \frac{\pi * (\phi_v)^4}{64} \quad (5)$$

$$I = \frac{3,1416 * (20 \text{ mm})^4}{64}$$

$$I = 7,85x 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$r_g = \sqrt{\frac{I}{A_v}} \quad (6)$$

Dónde:

$r_g$  = radio de giro

I= momento de inercia

$A_v$  = área del vástago

$$r_g = \sqrt{\frac{7853,98 \text{ mm}^4}{314,16 \text{ mm}^2}}$$

$$r_g = 0,00499 \text{ m}$$

*Longitud efectiva en condiciones extremas:* Para realizar el cálculo de la carga crítica se hace el análisis como si fuera una viga con un extremo fijo y el otro extremo libre. (SHIGLEY, 1984)

$$l_e = 2 * l \quad (7)$$

Dónde:

$l_e$  = longitud equivalente

l = longitud efectiva en condiciones extremas

$$l_e = 2 * 100 \text{ mm}$$

$$l_e = 0,20 \text{ m}$$

Ahora se va a utilizar la fórmula de la relación de Esbeltez, para lo cual primero se debe especificar las características del material del cual va ser el pistón, acero  $E = 200000 \text{ N/mm}^2$  y  $S_y = 345 \text{ N/mm}^2$  ; donde  $E$ = módulo de elasticidad y  $S_y$  = *resistencia de fluencia*

$$\tau_0 = \left( \frac{l_e}{r_g} \right)_{\tau} = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * E}{S_y}} \quad (8)$$

Dónde:

$l_e$ = longitud equivalente

$r_g$ = radio de giro

$E$ = módulo de elasticidad

$S_y$ = resistencia de fluencia

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2 * (3,1416)^2 * (200\,000 \text{ N/mm}^2)}{345 \text{ N/mm}^2}}$$

$$\tau_0 = 106,97$$

$$\tau = \frac{l_e}{r_g} \quad (9)$$

Dónde:

$l_e$ = longitud equivalente

$r_g$ = radio de giro

$$\tau = \frac{200 \text{ mm}}{5 \text{ mm}}$$

$$\tau = 40$$

Debido a que  $\tau_0 > \tau$  se utiliza la ecuación de Johnson, la cual se pone a continuación.  
(MOTT, 1996)

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \left[ \frac{S_y^2}{4 * \pi^2 * E} * \left( \frac{l_e}{r_g} \right)^2 \right] \quad (10)$$

Dónde:

$r_g$ = radio de giro

$l_e$ = longitud equivalente

E= módulo de elasticidad

$S_y$ = resistencia de fluencia

$P_{cr}$ = presión crítica

A= área

$$\frac{P_{cr}}{314,16 \text{ mm}^2} = 345 \text{ N/mm}^2 - \left[ \frac{(345 \text{ N/mm}^2)^2}{4 * (3,1416)^2 * (200000 \text{ N/mm}^2)} * \left( \frac{200 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \right)^2 \right]$$

$$P_{cr} = 100\,795,09 \text{ N} \quad \text{ó} \quad 10\,277,251 \text{ kgf}$$

NOTA: Si el vástago del cilindro sobrepasa la fuerza de 100 795,09 N ó 10 277,251 kgf se pandea; caso contrario se mantiene recto.

**3.1.1.2 Presión de trabajo del cilindro neumático:** Para realizar los cálculos del cilindro neumático primero se debe iniciar encontrando la presión sobre la cual va trabajar, después encontrar tanto la velocidad de entrada y de salida.

$$P_{tr} = \frac{F}{A} \quad (11)$$

Dónde:

$P_{tr}$ = presión de trabajo

F= fuerza teórica del cilindro

A= área del cilindro

$$P_{tr} = \frac{317,46 \text{ lbf} * 4}{\pi * \left(63 \text{ mm} * \frac{1 \text{ pulg}}{25,4 \text{ mm}}\right)^2}$$

$$P_{tr} = 4,53 \text{ bar } \acute{o} \text{ 453000 Pa}$$

**3.1.2 Selección del diámetro principal de la tubería:** Mientras las válvulas están cerradas en el módulo de pruebas, por los tapones con agujeros de  $\phi = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$  y  $3,0$  mm, no existen pérdidas; además como el porcentaje de pérdidas de presión no puede ser mayor del 10%, se asume que el diámetro de la tubería principal debe ser de  $\phi = \frac{1}{2}$  plg. Para saber las pérdidas en los accesorios se utiliza las longitudes equivalentes que se toman del Anexo D y Anexo E.

Tabla 6. Longitudes equivalentes con  $\phi = \frac{1}{2}$  plg de la tubería principal

<b>Longitud equivalente con <math>\phi = \frac{1}{2}</math> plg</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>L<sub>eq.</sub> [m]</b>	<b>L<sub>Total</sub> [m]</b>
Té	4	0,30	1,20
Reductor	1	0,18	0,18
Flujómetro	1	0,30	0,30
Universal, neplo corrido	3	0,49	1,47
Codo de 90°	1	0,46	0,46
$\Sigma_{Leq.}$			3,97 m

Fuente: Autores

$$L_{total} = L + \Sigma_{Leq.} \quad (12)$$

$$L_{total} = 1 \text{ m} + 3,97 \text{ m}$$

$$L_{total} = 4,97 \text{ m}$$

### 3.1.2.1 Consumo de aire

- *Volumen de salida*

$$V_s = \frac{\pi * \phi_c^2}{4} * \frac{(P_{tr} + 1)}{P_{at}} * L_c * n \quad (13)$$

Dónde:

$V_s$  = volumen de salida

$\phi_c$  = diámetro del cilindro

$P_{tr}$  = presión de trabajo

$P_{at}$  = presión atmosférica en Riobamba

$L_c$  = longitud de carrera

$$V_s = \frac{3,1416 * (6,3 \text{ cm})^2}{4} * \frac{\left(4,53 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} + 1\right)}{0,757 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} * 10 \text{ cm} * \frac{2}{60 \text{ s}}$$

$$V_s = 0,000075 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{ó} \quad 4,51 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

- *Volumen de entrada*

$$V_e = \frac{\pi * (\phi_c^2 - \phi_v^2)}{4} * \frac{(P_{tr} + 1)}{P_{at}} * L_c * n \quad (14)$$

Dónde:

$V_e$  = volumen de entrada

$\phi_c$  = diámetro del cilindro

$\phi_v$  = diámetro del vástago

$P_{tr}$  = presión de trabajo

$P_{at}$  = presión atmosférica

$L_c$  = longitud de carrera

$$V_e = \frac{3,1416 * ((6,3 \text{ cm})^2 - (2 \text{ cm})^2)}{4} * \frac{\left(4,53 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} + 1\right)}{0,757 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} * 10 \text{ cm} * \frac{2}{60 \text{ seg}}$$

$$V_e = 0,000068 \text{ m}^3/\text{seg} \quad \text{ó} \quad 4,05 \text{ l}/\text{min}$$

- *Volumen total*

$$V_t = V_s + V_e \quad (15)$$

Dónde:

$V_t$  = volumen total

$V_s$  = volumen de salida

$V_e$  = volumen de entrada

$$V_t = 75,14 \frac{cm^3}{s} + 67,57 \frac{cm^3}{s}$$

$$V_t = 0,000143 \frac{m^3}{s} \quad \text{ó} \quad 8,56 \frac{l}{min}$$

- *Velocidad del aire en la tubería*

$$v = \frac{V_{total}}{A} \quad (16)$$

$$v = \frac{142,71 \frac{cm^3}{s} * 4}{\pi * \left(0,5 pulg * \frac{2,54 cm}{1 pulg}\right)^2}$$

$$v = 1,126 \text{ m/s}$$

- *Número de Reynolds (Re)*

Ahora se procede a calcular el número de Reynolds ( $Re$ ) para determinar si el flujo es laminar o turbulento.

$$R_e = \frac{\rho * v * \phi_{tub}}{\mu_{aire}} \quad (17)$$

Dónde:

$R_e$  = número de Reynolds

$\rho$ = densidad del aire

$v$ = velocidad del aire en la tubería

$\phi_{\text{tub}}$  = diámetro de la tubería

$\mu_{\text{aire}}$  = coeficiente de rozamiento del aire

$$R_e = \frac{1,18 \text{ kg/m}^3 * 1,126 \text{ m/seg} * 0,0127 \text{ m}}{0,0000176 \text{ kg/m} * \text{seg}}$$

$$R_e = 958,76$$

$$R_e < 2000 \approx \text{Régimen laminar}$$

- *Rugosidad relativa ( $\varepsilon$ )*

A continuación se calcula la rugosidad ( $\varepsilon$ ) con la siguiente fórmula, donde el valor de la rugosidad absoluta (k) la tomamos según los datos del Anexo F.

$$\varepsilon = \frac{k}{\phi} \quad (18)$$

Dónde:

$\varepsilon$ = rugosidad relativa

k= rugosidad absoluta

$\phi$ = diámetro de la tubería

$$\varepsilon = \frac{0,09 \text{ mm}}{12,7 \text{ mm}}$$

$$\varepsilon = 0,00708$$

- *Coefficiente de fricción ( $\lambda$ )*

Debido a que el régimen es laminar se procede a calcular el coeficiente de fricción ( $\lambda$ ) con la siguiente fórmula:



$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (19)$$

Dónde:

$\lambda$ = coeficiente de fricción

Re= número de Reynolds

$$\lambda = \frac{64}{958,76}$$

$$\lambda = 0,0668$$

**3.1.2.2 Pérdida de carga en la línea principal:** Mediante la ecuación de Darcy calculamos la pérdida que existe en la línea principal y se comprueba si es menor al 10% caso contrario se coloca un diámetro de tubería mayor.

$$H = \lambda * \frac{L_{Total}}{\phi} * \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

Dónde:

H= pérdida de energía debido a la fricción

$\lambda$ = coeficiente de fricción

$L_{Total}$ = longitud total de la corriente del flujo

$\phi$ = diámetro de la tubería

v= velocidad del aire en la tubería

$$H = 0,0668 * \frac{4,97 \text{ m}}{0,0127 \text{ m}} * \frac{(1,126 \text{ m/seg})^2}{2(9,8 \text{ m/seg}^2)}$$

$$H = 1,69 \text{ m}$$

Ahora se utiliza la ecuación de Bernoulli para finalizar el cálculo.

$$\frac{P_1}{\rho} - H = \frac{P_2}{\rho}$$

$$\Delta P = \rho * H \quad (21)$$

Dónde:

$\Delta P$ = pérdida de carga en líneas secundarias

$\rho$ = densidad del aire

$$\Delta P = 1,18 \frac{kg}{m^3} * 1,69m$$

$$\Delta P = 0,00020 \text{ bar } \text{ ó } 20 \text{ Pa}$$

Con la pérdida de presión encontrada procedemos a verificar si está dentro de lo permitido, es decir, no más del 10%. (MOTT, 1996)

$$4,53 \text{ bar } \rightarrow 100\%$$

$$0,00020 \text{ bar } \rightarrow x \%$$

$$0,0044 \% < 10\% ; \text{ si cumple con la condición}$$

### 3.1.3 Selección del diámetro de la línea secundaria de la tubería

**3.1.3.1 Consumo de aire en orificio:** La pérdida de volumen y la potencia requerida para la compresión en kW de los diferentes diámetros de los orificios (pérdida de aire a 6 bares), se observa en el Anexo I.

$$\theta_1 = 1,50 \text{ mm}$$

$$V_{\theta_1} = 2,80 \text{ lt/seg } ; 2800 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$P_{\theta_1} = 0,75 \text{ kW/h}$$

$$\theta_2 = 2,00 \text{ mm}$$

$$V_{\theta_2} = 5,00 \text{ lt/seg } ; 5000 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$P_{\theta_2} = 1,34 \text{ kW/h}$$

$$\theta_3 = 2,50 \text{ mm}$$

$$V_{\theta_3} = 8,00 \text{ lt/seg} ; 8000 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$P_{\theta_3} = 2,30 \text{ kW/h}$$

$$\theta_4 = 3,00 \text{ mm}$$

$$V_{\theta_4} = 11,10 \text{ lt/seg} ; 11100 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$P_{\theta_4} = 3,10 \text{ kW/h}$$

**3.1.3.2 Pérdida de presión en los agujeros:** El cálculo de la pérdida de presión se realizará con los siguientes datos:

Datos:

$$\theta = \frac{1}{2} \text{ pulg}$$

$$L = 0,25 \text{ m} * 4 = 1 \text{ m}$$

Las longitudes equivalentes de cada accesorio se tomarán del Anexo D y Anexo E y la longitud sumatoria de longitudes equivalentes se reemplaza en la ecuación 12.

Tabla 7. Longitudes equivalentes con  $\phi = \frac{1}{2} \text{ plg}$  de la tubería secundaria

Descripción	Cantidad	L (equi)	L (total)
Válvula	4	0,11 m	0,44 m
T (te salida lateral)	4	1 m	4 m
$\Sigma L$ (equi) =			4,44 m

Fuente: Autores

$$L_{Total} = 5,44 \text{ m}$$

- *Velocidad de consumo de aire de los agujeros*

El cálculo de la velocidad se hará con la suma de todos los volúmenes de los 4 agujeros:

$$V_{TA} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (22)$$

$$V_{TA} = 2800 + 5000 + 8000 + 11100$$

$$V_{TA} = 0,0269 \frac{m^3}{s} \text{ ó } 26,9 \frac{l}{s}$$

Datos:

$$V_{TA} = 26900 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$\emptyset = 1/2 \text{ pulg} \ ; \ 1,27 \text{ cm} \ ; \ 0,0127\text{m} \ ; \ 12,7 \text{ mm}$$

$$v = \frac{V_{TA}}{A}$$

Dónde:

$v$  = velocidad de consumo de aire de los agujeros

$V_{TA}$  = volumen total de los 4 agujeros

$A$  = área de la tubería

$$v = \frac{26900 \frac{cm^3}{s}}{\pi * (1,27 \text{ cm})^2}$$

$$v = 53,06 \frac{m}{s}$$

- *Número de Reynolds (Re)*

Con esta velocidad se calcula el número de Reynolds (Re) para determinar si el flujo es laminar o turbulento, para esto se utiliza la ecuación (17).

$$Re = \frac{1,18 \frac{kg}{m^3} * 53,06 \frac{m}{s} * 0,0127 m}{0,0000176 \frac{kg}{m * s}}$$

$$Re = 45170,45 ; 4,5 * 10^4$$

$$Re > 2000 ; \text{Regimén turbulento}$$

- *Rugosidad relativa ( $\varepsilon$ )*

Ahora se procede a calcular la rugosidad ( $\varepsilon$ ), donde el valor de la rugosidad absoluta (k) se toma según los datos del Anexo F y se utiliza la ecuación 18.

$$\varepsilon = \frac{0,09 \text{ mm}}{12,7 \text{ mm}}$$

$$\varepsilon = 0,00708$$

- *Coefficiente de fricción ( $\lambda$ )*

Con el número de Reynolds (Re) y la rugosidad ( $\varepsilon$ ) calculados procedemos a encontrar el coeficiente de fricción ( $\lambda$ ) mediante el diagrama de Moody que lo encontramos en el Anexo G.

$$\lambda = 0,046$$

**3.1.3.3 Pérdida de carga en la línea secundaria:** A continuación se calcula la Pérdida de carga en línea secundaria con la ecuación 20.

$$H = 0,046 * \frac{5,44 m}{0,0127 m} * \frac{(53,06 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}}$$

$$H = 2830,30 m$$

Ahora se utiliza la ecuación 21 para finalizar el cálculo. (MOTT, 1996)

$$\Delta P = 1,18 \frac{kg}{m^3} * 2830,30 m$$

$$\Delta P = 0,334 bar \text{ ó } 33\ 400 Pa$$

**3.1.4 Selección de tubería flexible para el actuador:** Sabiendo que la velocidad en condiciones normales está entre 0,1 m/s y 1,5 m/s en los actuadores, se asume los siguientes datos  $v= 0,5$  m/s; L (tubería) = 0,3 m, el cual se selecciona del ábaco del Anexo H un  $\phi_{externo} = 6 mm$  y  $\phi_{interno} = 4 mm$ , con la ayuda de estos datos se seleccionan valores que se encuentren en el mercado de la tubería para el actuador. (SEAS)

Tabla 8. Parámetros para selección de la tubería del actuador

Parámetros de la tubería del actuador				
$P_{trabajo}$	T °C	$P_{m\acute{a}xima}$	$\phi_{externo}$	$\phi_{interno}$
15 bar	60	30 bar	10 mm	4 mm

Fuente: (PARKER)

**3.1.5 Selección del compresor:** Para la selección se trabaja con el volumen total obtenido de la suma de volumen de entrada y salida, tomando en cuenta del libro Sistemas Oleodinámicos, Ing Iván D. Moran F. dice que las pérdidas de accesorios en las tuberías es el 15% del volumen de pérdidas totales.

Tabla 9. Volumen de pérdida total

$V_{total\ de\ compresión}$	$V_{p\acute{e}rdida\ en\ accesorios}$	$V_{total\ del\ 4\ agujero}$	$V_{p\acute{e}rdida\ total}$
142,71 $cm^3/s$	21,41 $cm^3/s$	11100 $cm^3/s$	11264,12 $cm^3/s$

Fuente: Autores

**3.1.5.1 Potencia del compresor:** Con estos datos de volumen se obtiene la potencia del compresor ( $P_c$ )

$$P_c = P_{atmosf\acute{e}rica} * V_{p\acute{e}rdida\ total} * \ln\left(\frac{P_{max}}{P_{atmosf\acute{e}rica}}\right) \quad (23)$$

Dónde:

$P_c$ = potencia del compresor [Hp]

$P_{at}$ = presión atmosférica [Pa]

$V_{p\acute{e}rdida\ total} = \text{Volumen de p\acute{e}rdida total [m}^3]$

$P_{m\acute{a}x.} = \text{potencia m\acute{a}xima de trabajo [Hp]}$

$$P_c = 0,757 \text{ kg/cm}^2 * 11264,12 \text{ cm}^3/\text{s} * \ln\left(\frac{6 \text{ bar}}{0,757 \text{ kg/cm}^2}\right)$$

$$P_c = 2,3 \text{ Hp}$$

**3.1.5.2 Tanque del compresor:** Datos recomendados por fabricantes indica que el tiempo estimado para que se termine el volumen de aire comprimido almacenado en el tanque y se vuelva a encender el motor es entre 1,31 minutos. Para el c\`alculo de la selecci3n del tanque se utiliza un tiempo de 5 min. ; una  $P_{max} = 8 \text{ bar}$  y  $P_{min} = 3,5 \text{ bar}$  obteniendo una  $\Delta P = 4,5 \text{ bar}$

Tabla 10. Selecci3n del tanque del compresor

<b>Selecci3n del tanque del compresor</b>			
$P_{m\acute{a}xima}$	T(min)	$P_{m\acute{in}ima}$	$\Delta P$
8 bar	5 min.	3,5 bar	4,5 bar

Fuente: Autores

- *Volumen del tanque del compresor*

$$V_{tanque} = \frac{V_{p\acute{e}rdida\ total} * t * P_{atmosf\acute{e}rica}}{\Delta P} \tag{24}$$

D3nde:

$V_{tanque} = \text{Volumen del tanque}$

$V_{p\acute{e}rdida\ total} = \text{Volumen de p\acute{e}rdida total}$

t= tiempo de encendido y apagado del motor del compresor

$P_{atmosf\acute{e}rica} = \text{presi3n atmosf\acute{e}rica}$

$\Delta P = P_{m\acute{a}xima} - P_{m\acute{in}ima}$

$$V_{tanque} = \frac{26900 \text{ cm}^3/\text{s} * 300 \text{ s} * 0,757 \text{ kg/cm}^2}{4,5 \text{ bar}}$$

$$V_{tanque} = 358,63 \text{ galones}$$

Entonces para la selección del compresor se debe encontrar con los siguientes parámetros:

Tabla 11. Parámetros para selección del compresor

<b>Parámetros para selección del compresor</b>		
$P_{compresor}$	$V_{tanque}$	$P_{maxima}$
2,3 HP	358,63 galones	6 bar

Fuente: Autores

### 3.2 Equipos y materiales para el banco de pruebas

Para la elaboración del banco de pruebas se necesitó los siguientes equipos y materiales los cuales se detallarán a continuación:

Tabla 12. Equipos para el banco de pruebas

<b>Equipos para el banco de pruebas</b>	
<b>Equipos</b>	<b>Cantidad</b>
Cilindro de doble efecto con amortiguador de ½ plg.	1
Compresor de 2 Hp	1
Válvula de accionamiento manual (5/2) de ½ plg	1
Válvula de globo de ½ plg.	4
Flujómetro o caudalímetro	1
Manómetro de 3/8 plg.	1
Balanza digital	1

Fuente: Autores

Tabla 13. Materiales para el banco de pruebas

<b>Materiales para el banco de pruebas</b>	
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Tubería de hierro galvanizado de ½ ”	2,5 m
Tee de hierro galvanizado de ½ ”	4
Tapón hembra de PVC de ½ ”	4
Racor recto de ½ ” x 10 mm	2
Tubo de Poliuretano $\varnothing_{exterior} = 10 \text{ mm}$	3 m
Regulador de Flujo tipo C de 3/8 ” x 10 mm	2
Codo de hierro galvanizado de ½ ” x 90°	1
Neplo corrido de hierro galvanizado de ½ ”	2
Universal de hierro galvanizado de ½ ”	1

Fuente: Autores



### 3.3 Equipos y materiales del banco de pruebas

A continuación se detallan los datos técnicos y se identificarán las partes de los equipos y materiales utilizados en el banco de pruebas.

**3.3.1 Compresor de 2 Hp:** El compresor utilizado para el banco de pruebas es de marca PORTEN el cual tiene los siguientes datos técnicos y sus respectivas partes.

Tabla 14. Datos técnicos del compresor

<b>Datos técnicos del compresor</b>	
Modelo	PCO-0224X
Potencia	1492 kW; 2 Hp
Voltaje	110 V
Frecuencia	60 Hz
Corriente	7,5 A
Velocidad nominal	3400 RPM
Descarga	110 l/min
Máxima presión	115 PSI
Tanque de capacidad	24 L ; 6,3 Galones
Peso Neto	55,12 lb; 25 kg
Dimensiones	55 x 23,5 x 64 cm

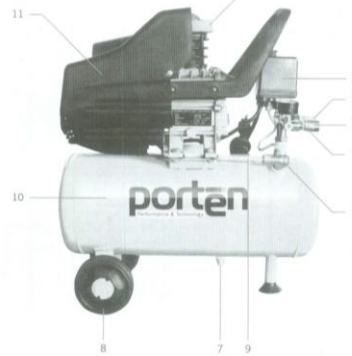
Fuente: (PORTEN)

Tabla 15. Componentes del compresor

<b>Componentes del compresor</b>	
1	Bomba
2	Interruptor de presión
3	Válvula de salida
4	Válvula de regulación
5	Manómetro
6	Válvula unidireccional
7	Grifo de drenado
8	Rueda
9	Tubería de descarga
10	Tanque de aire
11	Cubierta del ventilador

Fuente: (PORTEN)

Figura 14. Componentes del compresor



Fuente: (PORTEN)

**3.3.2 Cilindro de acero:** El cilindro que se utiliza es de acero, los datos técnicos y sus partes los se detallan a continuación:

Tabla 16. Datos técnicos del cilindro

Datos técnicos del cilindro	
Presión de trabajo	Máx. 10 bar (1 MPa – 145 psi)
Rango de temperatura [°C]	-20; + 80
Fluido	Aire sin lubricación; si se utiliza lubricación, ésta debe ser continuada
Diámetro interior [mm]	$\phi = 63$
Construcción	Cabezales con tirantes
Carreras estándar [mm]	Máx. 100
Versión	Doble efecto con amortiguación
Nota: carreras máximas aconsejables, valores superiores pueden crear problemas de funcionamiento.	

Fuente: (Pneumatic, 2007)

Tabla 17. Componentes del cilindro

Componentes del cilindro		
1	Vástago	Acero AISI 316
2	Cabezal	Acero AISI 304
3	Junta de pistón	Poliuretano
4	Casquillo guía	Bronce sinterizado
5	Camisa	Acero AISI 304
6	Junta monobloc	NBR o FKM/FPM
7	Imán	Plastoferrita
8	Anillos toroidales estáticos	NBR o FKM/FPM
9	Junta de amortiguación	Poliuretano o FKM/FPM
10	Aguja de amortiguación	Acero AISI 304
11	Tirantes	Acero AISI 316
12	Anillo retenedor de la aguja	Tecnopolímero

Fuente: (Pneumatic, 2007)



**3.3.4 Válvula de globo:** Es un tipo de válvula que posee una bola taladrada de lado a lado que abre, cierra u obstruye en forma parcial el flujo, pueden tener dos o tres vías. Se acciona a través del giro de la bola perforada y el eje los cuales están unidos, permitiendo la salida del aire cuando se encuentre al mismo nivel la perforación de la bola y la salida y entrada de dicha válvula. Cuando se encuentre cerrada la válvula de globo, la entrada y salida está perpendicular al agujero de la bola.

Las válvulas de bola o esfera son de baja presión (125 lbs) y diseño sencillo, soliendo usarse para controlar el flujo y regularlo aunque no es completamente recomendable. Es un tipo de válvula muy versátil en el manejo de fluidos lo que le permite ser una de las válvulas más populares. Precisamente su cierre rápido de ¼ de vuelta ordinariamente con una palanca permite que su operación sea muy sencilla además de que su diseño es más pequeño que las válvulas de compuerta. (ECURED)

Tabla 19. Componentes de la válvula de globo

<b>Componentes de la válvula de globo</b>	
1	Maneta
2	Eje
3	Prensa – Estopas
4	Esfera
5	Asientos

Fuente: Autores

**3.3.5 Flujómetro o caudalímetro:** El Flujómetro que se utilizó es de Gama de acrílico montada el panel del aire del metro de flujo que tendrá en un rango de medida de 3 hasta 30 litros/min; AIR 20 °C.

**3.3.6 Manómetro**

Tabla 20. Datos técnicos del manómetro tipo tubos bourdon

<b>Datos técnicos del manómetro</b>	
Rango de medición	0 a 8 bar ; 0 a 116,030 psi
Comportamiento de temperatura	Con aumento de temperatura aprox. +0,04%/k Con descenso de temperatura aprox. -0,04%/k (Error de indicación en caso de desviaciones de la temperatura normal de +20°C, en cada caso referido al valor final de escala)
Ambiente	- 20 °C hasta + 60 °C

Fuente: (WIT)

Tabla 21. Componentes del manómetro tipo tubos bourdon

<b>Componentes del manómetro</b>	
1	Base para tornillos de la carátula
2	Tubo bourdon
3	Ajuste de linealidad
4	Ajuste span
5	Tope mínimo
6	Tope máximo
7	Conexión de acero inoxidable
8	Sello de la caja de buna "N"
9	Mecanismo de acero inoxidable
10	Aguja
11	Carátula
12	Cristal inastillable
13	Purga

Fuente: Autores

### 3.3.7 Balanza digital

Tabla 22. Datos técnicos de la balanza

<b>Datos técnicos de la balanza</b>		
Capacidad	Máxima	150 Kg ; 330 lb
	Mínima	100 g ; 0,2 lb
Tecnología		4 sensores
Altura de dígitos LCD		21 mm ; 0,8 pulgadas
Accionamiento		Automático
Indicador		de baja potencia / sobrecarga
Certificación		ISO 9001

Fuente: (CAMRY)

Tabla 23. Componentes de la balanza digital

<b>Componentes de la balanza digital</b>	
1	Medidor de deformación tecnológica (Sensores)
2	Vidrio templado
3	Baterías
4	Interruptor de la unidad para convertir escala de Kg a lb
5	Pantalla para dígitos LCD

Fuente: (CAMRY)

### 3.3.8 Racor recto cilíndrico macho

Tabla 24. Datos técnicos del racor recto

<b>Datos técnicos del racor recto</b>		
Material	Cuerpo en latón niquelado y pulsador en polímero	
Rango de temperatura	°C	- 20 ; + 80
	°F	- 4 ; + 162
Rango de presión	Bar	- 0,99 ; 16
	MPa	- 0,099 ; 1,6
Tubería	Poliamida, poliuretano, polietileno	
Fluido	Vacío, aire comprimido	

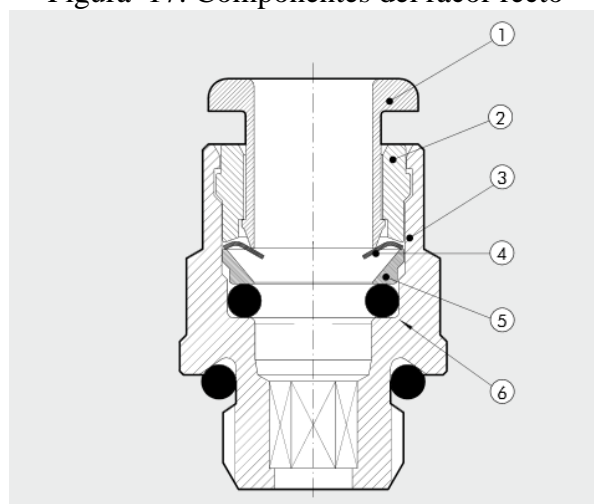
Fuente: (METAL WORK, 2007)

Tabla 25. Componentes del racor recto

<b>Componentes del racor recto</b>	
1	Anillo o casquillo de acoplamiento de tecnopolímero.
2	Casquillo de bloqueo de tecnopolímero.
3	Cuerpo de latón.
4	Muelle de sujeción.
5	Anillo soporte del muelle de tecnopolímero.
6	Juntas de retención de NBR

Fuente: (METAL WORK, 2007)

Figura 17. Componentes del racor recto



Fuente: (METAL WORK, 2007)

**3.3.9 Tubo de poliuretano:** Manguera flexible de TPU (poliuretano PU), en color azul adecuado para el transporte de aire comprimido en la aplicación automatización

industrial, herramientas, máquinas, el aire y las redes en general.

- Excelente flexibilidad y radio de curva
- Gran estabilidad térmica
- Buena resistente a productos químicos
- Fácil manipulación y montaje
- *Temperatura de:* -20 ° C a + 60 ° C.
- *Diámetro exterior:* 10 mm
- *Diámetro interno:* 6.5mm
- *Presión de trabajo:* 188,6 psi

**3.3.10 Regulador de flujo:** A continuación se detalla los datos técnicos del regulador de flujo obtenidos del catálogo:

Tabla 26. Datos técnicos del regulador de flujo

<b>Datos técnicos del regulador de flujo</b>		
Tubo		Ø 12
Anillo roscado		½ ”
Presión máx. de entrada	MPa	1
	Bar	10
	Psi	145
Caudal máx. en regulación NI/min		1400
Fluido		Aire comprimido filtrado con o sin lubricación
Gama de temperatura: anillo en Tecnopolímero	°C	- 10 ; + 50
	°F	+ 14 ; + 122

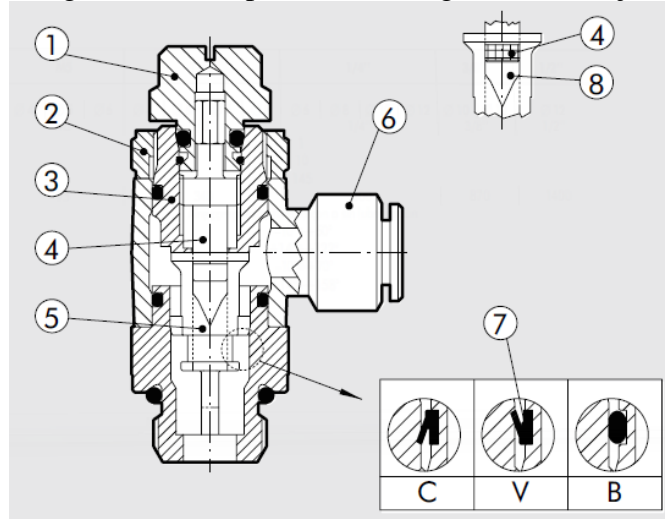
Fuente: (PNEUMATIC, 2007)

Tabla 27. Componentes del regulador de flujo

<b>Componentes del regulador de flujo</b>	
1	Pomo en latón
2	Anillo para fijación pomo en anillo (latón)
3	Cuerpo en latón
4	Tornillo en latón
5	Inserción en tecnopolímero con ventana de flujo de sección progresiva
6	Anillo giratorio de tecnopolímero
7	Juntas en NBR tipo C

Fuente: (PNEUMATIC, 2007)

Figura 18. Componentes del regulador de flujo



Fuente: (PNEUMATIC, 2007)

**3.3.11 Tubería, tee, neplo corrido, universal, codo de 90° de hierro galvanizado de 1/2 plg:** El hierro galvanizado es el hierro que se recubre de una capa de cinc para evitar que se produzca la corrosión en el metal.

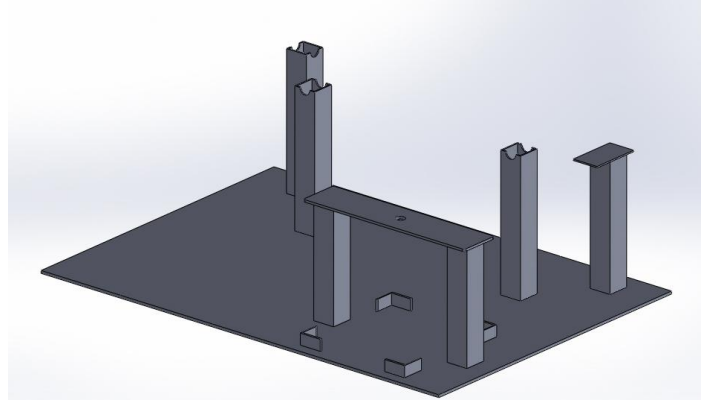
- *Características físicas:* Resistente a la corrosión gracias a la capa de cinc. Es de color gris y bastante activo químicamente.
- *Características mecánicas:* Conserva las características del hierro de maleabilidad, dureza y resistencia.
- *Otras características:* Las tuberías de hierro galvanizado presentan una pérdida de carga mayor que las de cobre debido a la rugosidad de sus paredes.
- *Incompatibilidades:* En ambientes ácidos la capa de cinc pierde su eficacia y se empieza a producir la corrosión en el metal.

#### 3.4 Diseño y montaje del banco de pruebas

A continuación se indica el diseño y como se realizó el montaje del módulo con sus respectivas imágenes. Primero se corta la plancha base y los soportes para los ramales de la tubería principal, la válvula de accionamiento manual, pistón y se suelda.



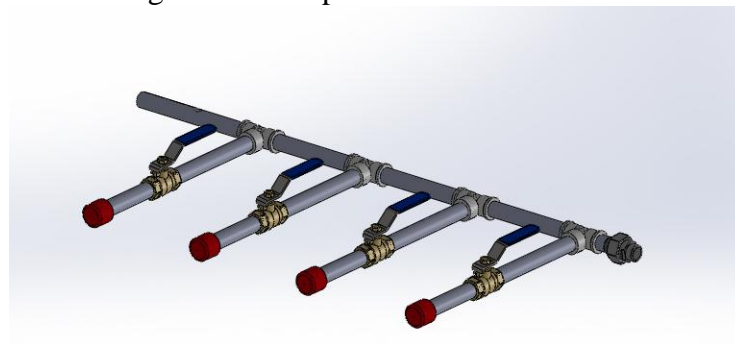
Figura 19. Base y soportes para los elementos del módulo



Fuente: Autores

Luego se realiza las rocas y acoplamiento de los accesorios, válvula de globo y tubería con teflón.

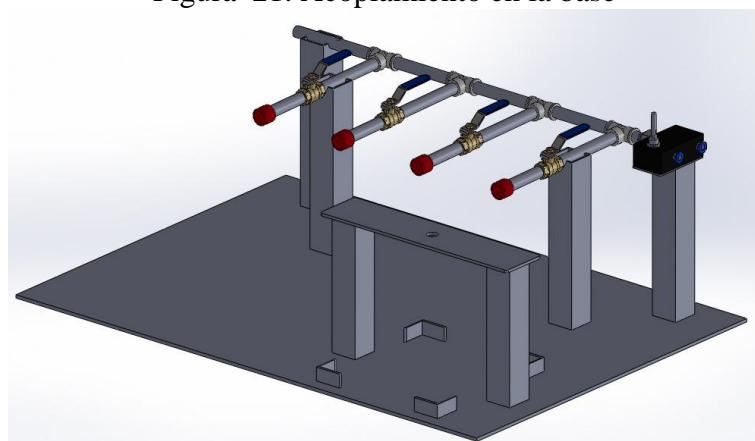
Figura 20. Acoplamiento de accesorios



Fuente: Autores

Una vez concluido con el acoplamiento se realiza el montaje en la base y colocación de la válvula de accionamiento manual para el pistón.

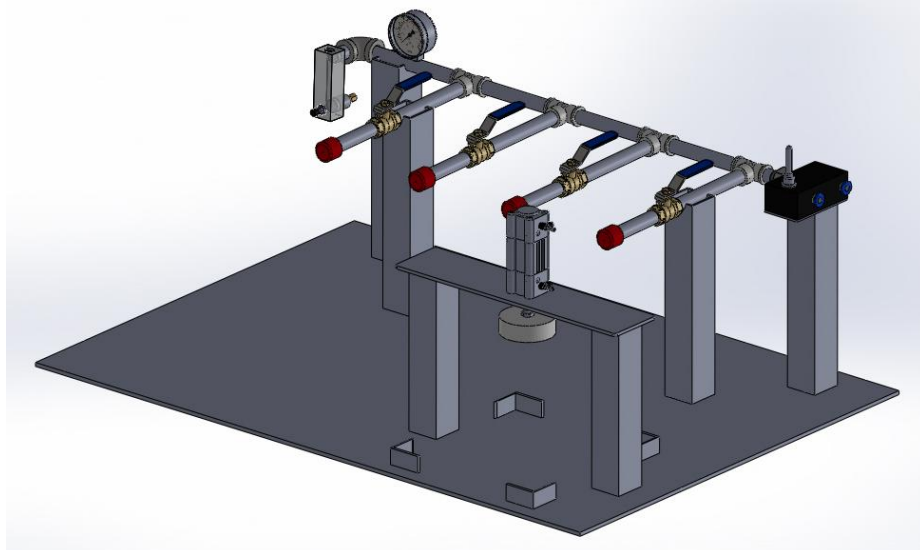
Figura 21. Acoplamiento en la base



Fuente: Autores

Luego se coloca el pistón (consumidor final), el flujómetro que servirá para la medida del caudal de aire comprimido y el manómetro para observar la presión del sistema.

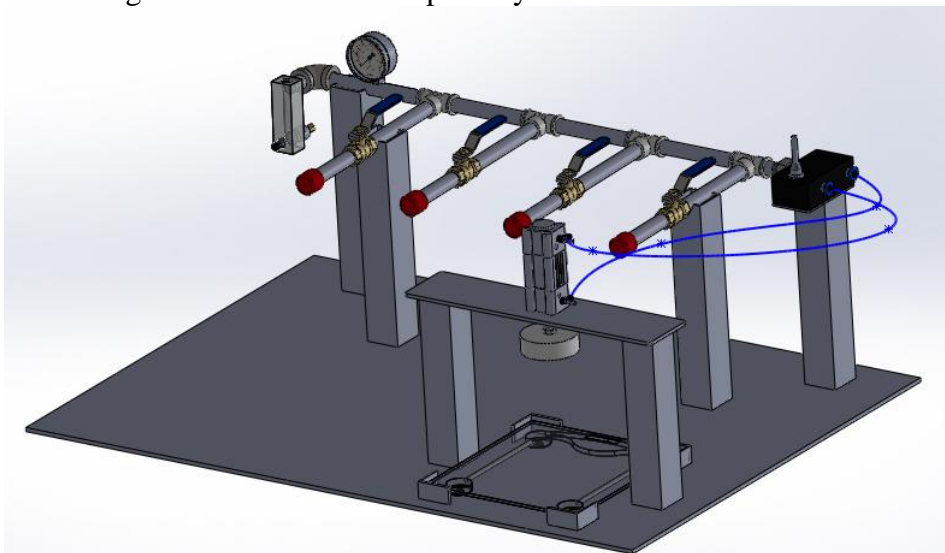
Figura 22. Colocación del pistón, manómetro y flujómetro



Fuente: Autores

Por último la conexión el pistón con la válvula de accionamiento manual y se coloca la balanza digital para obtener la fuerza del pistón (consumidor final) con cada una de las fugas.

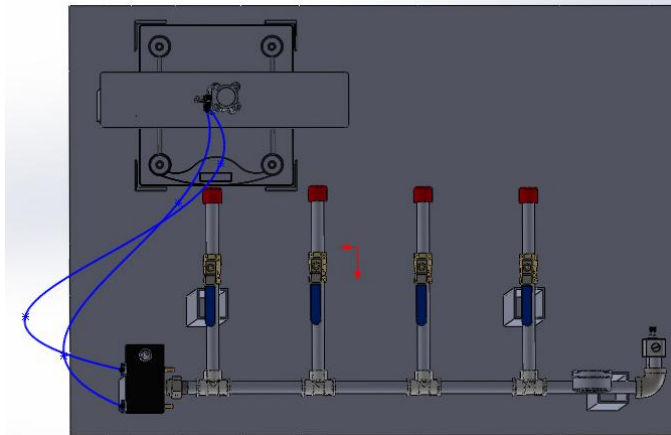
Figura 23. Conexión del pistón y colocación de la balanza



Fuente: Autores

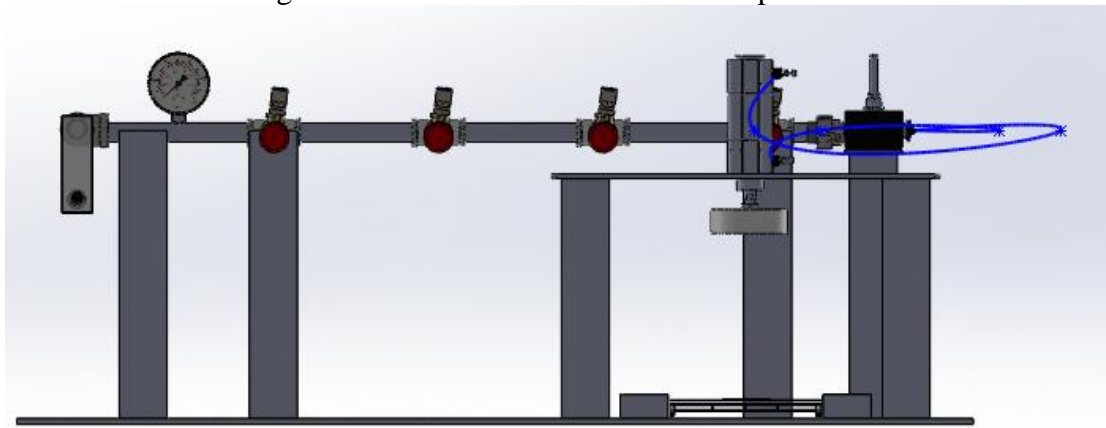
A continuación se indicará una imagen de vista aérea y otra de vista frontal del módulo de pruebas.

Figura 24. Vista superior del módulo de pruebas



Fuente: Autores

Figura 25. Vista frontal del módulo de pruebas



Fuente: Autores

### 3.5 Pruebas del montaje

En las pruebas de montaje se pudo constatar que existían fugas en las uniones de las tuberías y los accesorios, se volvió a desenroscar para colocar más teflón porque al parecer no tenía lo suficiente. Se realizó nuevas pruebas y las fugas desaparecieron, lo cual eso era lo correcto porque en el módulo se colocaron tapones con agujeros de diferentes diámetros para simular fugas, por ende en el sistema ya no deben existir más fugas.

### 3.6 Plan de mantenimiento y guía de prácticas de laboratorio

**3.6.1 Plan de mantenimiento:** Con el objetivo de que en el módulo se pueda realizar las pruebas sin ningún inconveniente y de manera correcta, se diseñó un plan de

mantenimiento en el cual se indica las tareas con su frecuencia de aplicación para cada uno de los componentes que conforman el módulo de pruebas.

### 3.6.1.1 Tareas de mantenimiento del compresor

Tabla 28. Tareas de mantenimiento del compresor

Nº	Tareas	Frecuencia
1	Limpiar la caja del cigüeñal y cambiar el aceite lubricante.	Después de las primeras 10 horas de trabajo
2	Abrir la llave de drenaje debajo del depósito de aire para eliminar la condensación	Antes y después de cada utilización
3	Limpieza de la carcasa	Antes y después de cada utilización
4	Inspección visual	Antes y después de cada utilización
5	Encendido e inspección de parámetros de funcionamiento	Mensualmente
6	Verificación de niveles de aceite	Mensualmente
7	Control de Temperatura	Mensualmente
8	Revisión de contactos eléctricos	Mensualmente

Fuente: Autores

La periodicidad de las tareas de mantenimiento están enfocadas a que el módulo en si no va a ser ocupado con regularidad o continuamente, es decir, se lo va a utilizar muy pocas veces en el semestre es por esto que algunas tareas se realizarán antes y después de haber concluido con cada práctica.

**3.6.1.2 Tareas de mantenimiento en el cilindro neumático:** El hecho de querer establecer un período exactamente igual para realizar el mantenimiento preventivo de los equipos neumáticos es muy complicado. Sin embargo no cabe la duda de que el mantenimiento debe ser periódico, para esto los intervalos o frecuencias deberán ser determinados acorde con las condiciones de trabajo a las cuales estén expuestos dichos equipos neumáticos y en este caso el pistón neumático, a más de esto también se debe tomar en cuenta las condiciones ambientales como: el polvo, temperatura ambiental, agentes corrosivos.

De una manera general el mantenimiento se lo puede realizar en períodos que oscilan entre los tres y doce meses, la variación de dichos periodos dependerá del resultado mismo del mantenimiento ya que si los equipos tienen un excelente estado de

conservación no habría la necesidad de cambiar la frecuencia de mantenimiento anteriormente expuesta, al presentarse una situación adversa en el cilindro, es decir, que las condiciones de conservación del equipo son malas y se presentan muchas fallas antes del periodo o fecha prevista del mantenimiento las frecuencias o el periodo de mantenimiento debe ser reducido.

Los puntos o ítems principales que se deberán tomar en cuenta durante el mantenimiento de los cilindros son los que se detallan a continuación.

Tabla 29. Tareas de mantenimiento del cilindro neumático

Nº	Tareas	Frecuencia
1	Limpieza de la carcasa	Antes y después de su utilización
2	Inspección de superficies en las que actúe el vástago del pistón.	Antes y después de su utilización
3	Revisión de las mangueras para el paso de aire al pistón	Antes y después de su utilización
4	Revisión de los racores que conectan el pistón con las mangueras de paso del aire.	Antes y después de su utilización
5	Revisión de la velocidad de ascenso y descenso del pistón.	Antes y después de su utilización

Fuente: Autores

A continuación se detallan recomendaciones que se deben tomar en cuenta al momento de realizar algún tipo de intervención en los cilindros neumáticos.

- Tener cuidado durante el desmontaje del cilindro ya que la mayoría esto debido a que muchas veces se trata de elementos los cuales se encuentran mecánicamente perfectos y que únicamente necesitan de una limpieza.
- Es recomendable que los retenes sean sustituidos por nuevos, aunque no presenten daños o desgastes.
- Las superficies en donde que actúen en el vástago del cilindro deben ser inspeccionadas esto con el fin de verificar que no existan ranuras, golpes o rebabas.
- Prestar mucha atención a que los elementos desmontados estén bien lubricados.

Si el cilindro neumático presentara fallas antes del tiempo previsto se recomienda

verificar como causa de dichas fallas los siguientes ítems: obstrucción, lubricación deficiente, presencia de impurezas dentro del equipo, desgastes excesivos o ranuras en el vástago. (MICRO)

**3.6.1.3 Tareas de mantenimiento en la válvula de accionamiento manual de 5 posiciones y dos vías:** La vida útil de las válvulas queda determinada por los ciclos de conmutación realizados. Es decir el programa de mantenimiento preventivo de las válvulas queda en función de este parámetro. Las intervenciones de mantenimiento preventivo pueden darse en periodos semanales, cada 8 millones de ciclos de conmutación o anuales, y cada 24 millones de ciclos de conmutación o 3 años. Los procedimientos o tareas de mantenimiento preventivo que se deben realizar en las válvulas son las siguientes:

Tabla 30. Tareas de mantenimiento de la válvula de accionamiento manual

Nº	Tarea	Frecuencia
1	Limpieza de la carcasa de la válvula	Antes y después de su utilización
2	Revisión de toda la válvula verificando que no existan fugas	Antes y después de su utilización
3	Revisión de los racores de conexión de la válvula con la manguera de paso de aire	Antes y después de su utilización
4	Revisión de los silenciadores de la válvula	Antes y después de su utilización
5	Cambio de silenciadores de la válvula	Cuando sea necesario

Fuente: Autores

La periodicidad de las tareas de mantenimiento están enfocadas a que el modulo en si no va a ser ocupado con regularidad o continuamente, es decir, se lo va a utilizar muy pocas veces en el semestre es por esto que algunas tareas se realizarán antes y después de haber concluido con cada práctica.

A continuación se detalla las pautas que se deberá seguir en el caso de que se desee realizar alguna intervención.

- *Desarme de unidades:* El desarme de unidades se lo debe efectuar interrumpiendo el suministro de aire y se lo puede efectuar en situ o retirando la válvula en nuestro caso del módulo. Todas las partes de la válvula son desmontables con herramientas estándar las mismas q se encuentran el taller. En el caso en el cual se necesite

utilizar una mordaza para sujetar piezas, la misma debe estar cubierta de un material blando con el fin de no dañar partes de la válvula.

- *Limpieza de las partes:* La limpieza de las partes se lo debe realizar utilizando aire a presión limpio y seco, y también con la ayuda de un pincel o cepillo de limpieza. Es muy importante repetir esta acción varias veces hasta que todas las piezas estén totalmente libre de impurezas. (MICRO)

**3.6.2** *Guía de prácticas de laboratorio:* La guía de laboratorio se la realizó para que las pruebas posteriores que se vallan a realizar se faciliten un poco y se las pueda hacer de manera correcta sin ningún percance ni inconveniente. La guía se va encontrar en Anexo N° 10.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE PRUEBAS

#### 4.1 Descripción del procedimiento

Se realizó las pruebas en la ciudad de Riobamba en la ESPOCH a una altitud de 2750 msnm, latitud de  $1^{\circ}40'28''S$   $78^{\circ}38'54''O$  y una presión atmosférica de  $0,757 \text{ kg/cm}^2$ . Se diseñó un módulo conformado por equipos como: compresor, válvula de accionamiento manual de 5 posiciones y 2 vías, pistón neumático, flujómetro, válvula de globo, manómetro con glicerina y balanza digital.

En lo que respecta a materiales se utilizó hierro galvanizado para toda la tubería y accesorios, los tapones de pvc que son más fáciles para realizar los agujeros de 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm. Una vez construido el módulo se procedió a realizar las pruebas pertinentes las cuales se hizo de la siguiente manera:

1. Se observó que todas las válvulas estén completamente cerradas para proceder a medir sin fugas en el sistema.
2. Se realizó cinco mediciones en cada punto de fuga para luego sacar una media y obtener un resultado más preciso.
3. Se reguló en el sistema una presión de 6 bares para realizar todas las mediciones.

Figura 26. Regulación del manómetro



Fuente: Autores



4. Se realizó un barrido con el equipo de ultrasonido pasivo ULTRAPROBE 15000 por todo el sistema y no existieron fugas y al bajar el pistón dio una fuerza de 105,30 kg en todas las pruebas, las frecuencias y decibeles indicó un valor de cero.

Figura 27. Barrido con el equipo ULTRAPROBE 15000



Fuente: Autores

5. Luego se abrió la llave en la fuga de 1,5 mm, se observó el flujómetro y marcó un caudal de aire de 27,5 l/min, descendió el pistón y se pudo observar la fuerza, se procedió a medir con el equipo de ultrasonido pasivo las frecuencias y los decibeles.
6. Ese mismo procedimiento se realizó en cada punto de fuga para obtener cada uno de los valores.

Figura 28. Medición en la fuga de 2,00 mm con el equipo ULTRAPROBE 15000



Fuente: Autores

7. Una vez obtenido los valores se procedió hacer los cálculos correspondientes. En lo que respecta a la presión con las fuerzas indicadas en la balanza al descender el pistón y el área que en el módulo es de un cilindro de acrílico el cuál golpea en la balanza se calculó las cinco presiones en cada punto de fuga.
8. Con el programa UE SPECTRALYZER se descargó las mediciones y se observó los decibeles, las frecuencias y el primer armónico en cada fuga.
9. Una vez que se concluyó con los cálculos de presión, decibeles y frecuencias, se utilizó el equipo de análisis de la calidad de la energía FLUKE 435 SERIE 2, que sirvió para obtener cual es la potencia que requiere el compresor en cada fuga de aire comprimido.

Figura 29. Medición en la fuga de 2,0 mm con el equipo ULTRAPROBE 15000



Fuente: Autores

10. Se realizó una medición de 30 minutos en cada fuga, donde se tomó datos del tiempo que tarda en descargarse y los ciclos de trabajo del compresor.
11. Luego de culminar con las mediciones se procedió a descargar los datos con el programa POWER LOG y se analizó.
12. Con todos los cálculos y valores que se obtuvo, se analizó las curvas que se presentaron y se comparó los resultados con los métodos analíticos.

## 4.2 Medición de pérdidas de presión

Mediante la balanza que se colocó en el módulo de pruebas se demostró cuál es la presión inicial (presión sin fugas) y la presión final (presión con fugas), en cada punto que presentó fugas de aire. Se realizó pruebas sin ninguna fuga y con una presión constante en el compresor de 6 bares, cuando descendió el vástago del pistón golpeando en la balanza y nos indicó la fuerza con la que descendió el mismo, se hizo cinco mediciones para sacar una media y se obtuvo un valor más exacto.

Tabla 31. Fuerza sin ninguna fuga

Sin fugas		
Fuga [mm]	N° de Medición	Fuerza [kg]
0	1	105,30
0	2	105,30
0	3	105,30
0	4	105,30
0	5	105,30
TOTAL		105,30

Fuente: Autores

Se obtuvo un golpe más uniforme en la balanza colocando un acrílico cilíndrico el cual tiene un diámetro de 7,5 cm, este nos sirvió para calcular el área sobre el cual impacta el vástago del pistón.

$$A = 2 * \pi * r * h \quad (25)$$

$$A = 2 * 3,1416 * 3,75 \text{ cm} * 3 \text{ cm}$$

$$A = 70,69 \text{ cm}^2 \text{ ó } 0,0071 \text{ m}^2$$

Con el área de  $A = 70,69 \text{ cm}^2$  que se obtuvo al realizar los cálculos se procedió a demostrar cuál es la presión que existe en el sistema sin ninguna fuga.

$$P = \frac{F}{A} \quad (26)$$

$$P = \frac{105,30 \text{ kg}}{70,69 \text{ cm}^2}$$

$$P = 1,49 \text{ bar} \text{ ó } 149000 \text{ Pa}$$

Una vez que se obtuvo la presión inicial se procedió a calcular las nuevas presiones que van a existir en el sistema con cada una de las fugas existentes, con una presión de 6 bares. Como el caso anterior se realizó cinco tomas de datos para cada punto de fuga.

- *Punto de fuga de 1,0 mm*

Tabla 32. Punto de fuga de 1,0 mm

<b>Fuga de 1,0 mm</b>		
<b>N° de Medición</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Presión (Bar)</b>
1	105,00	1,49
2	105,10	1,49
3	104,90	1,48
4	105,00	1,49
5	104,90	1,48
TOTAL	104,98	1,485

Fuente: Autores

- *Punto de fuga de 1,5 mm*

Tabla 33. Punto de fuga de 1,5 mm

<b>Fuga de 1,5 mm</b>		
<b>N° de Medición</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Presión (Bar)</b>
1	104,60	1,48
2	104,70	1,48
3	104,80	1,48
4	104,80	1,48
5	104,60	1,48
TOTAL	104,70	1,481

Fuente: Autores

- *Punto de fuga de 2,0 mm*

Tabla 34. Punto de fuga de 2,0 mm

<b>Fuga de 2,0 mm</b>		
<b>N° de Medición</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Presión (Bar)</b>
1	98,50	1,39
2	99,20	1,40
3	99,20	1,40
4	99,50	1,41
5	99,80	1,41
TOTAL	99,24	1,40

Fuente: Autores

- *Punto de fuga de 2,5 mm*

Tabla 35. Punto de fuga de 2,5 mm

<b>Fuga de 2,5 mm</b>		
<b>N° de Medición</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Presión (Bar)</b>
1	60,20	0,85
2	60,20	0,85
3	62,10	0,88
4	60,60	0,86
5	61,50	0,87
TOTAL	60,92	0,86

Fuente: Autores

- *Punto de fuga de 3,0 mm*

Tabla 36. Punto de fuga de 3,0 mm

<b>Fuga de 3,0 mm</b>		
<b>N° de Medición</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Presión (Bar)</b>
1	27,80	0,39
2	27,40	0,39
3	27,00	0,38
4	27,40	0,39
5	26,80	0,38
TOTAL	27,28	0,39

Fuente: Autores

Con el área de impacto del vástago de  $A = 70,69 \text{ cm}^2$  y la media que se obtuvo de las cinco mediciones realizadas en cada punto se consiguió los siguientes resultados:

Tabla 37. Presión con fugas

<b>Presión</b>	
<b>Fugas (mm)</b>	<b>Presión (Bar)</b>
0,0	1,490
1,0	1,485
1,5	1,481
2,0	1,404
2,5	0,862
3,0	0,386

Fuente: Autores

### 4.3 Mediciones de amplitudes de las ondas y espectros de ultrasonido

En cada punto de fuga se realizó cinco mediciones para proceder a calcular la media y obtener un valor más exacto de los decibels y las frecuencias.

- *Punto de fuga de 1,0 mm*

Tabla 38. Decibels en fuga de 1,0 mm

Fuga de 1,0 mm	
N° de Medición	Decibels
1	-17,61
2	-17,54
3	-15,69
4	-17,02
5	-18,60
TOTAL	-17,29

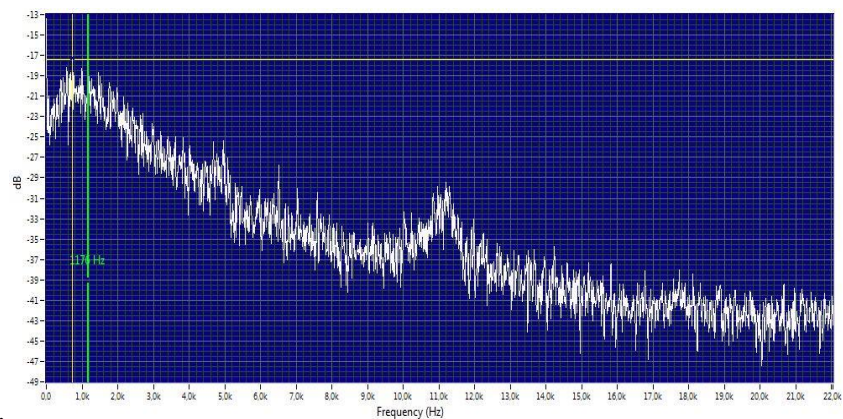
Fuente: Autores

Tabla 39. Frecuencias en fuga de 1,0 mm

Fuga de 1,0 mm	
N° de Medición	Frecuencia (kHz)
1	0,387
2	0,532
3	0,614
4	0,850
5	0,861
TOTAL	0,65

Fuente: Autores

Figura 30. Medición N°2 de una fuga de 1,0 mm



Fuente: Autores

En la figura (29) se indica el espectro de la segunda medición que se obtuvo de una fuga de 1,0 mm, donde se observa que el decibel es de -17,54 y la frecuencia de 0,532 kHz, así mismo podemos observar que el primer armónico es 1,176 kHz.

- *Punto de fuga de 1,5 mm*

Tabla 40. Decibeles en fuga de 1,5 mm

<b>Fuga de 1,5 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Decibeles</b>
1	-17,42
2	-17,36
3	-17,66
4	-17,83
5	-17,40
TOTAL	-17,53

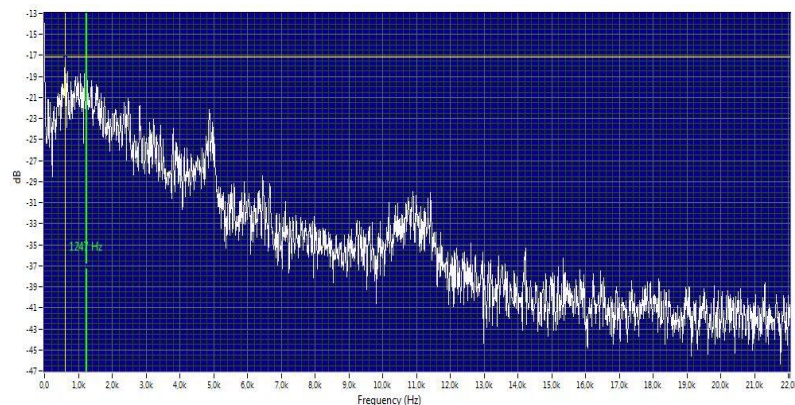
Fuente: Autores

Tabla 41. Frecuencia en fuga de 1,5 mm

<b>Fuga de 1,5 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Frecuencia (kHz)</b>
1	0,527
2	0,603
3	0,904
4	0,710
5	0,775
TOTAL	0,70

Fuente: Autores

Figura 31. Medición N°2 de una fuga de 1,5 mm



Fuente: Autores



En la figura (30) se indica el espectro de la segunda medición que se obtuvo de una fuga de 1,5 mm, donde se observa que el decibel es de -17,36 y la frecuencia de 0,603 kHz, así mismo podemos observar que el primer armónico es 1,24 kHz

- *Punto de fuga de 2,0 mm*

Tabla 42. Decibeles en fuga de 2,0 mm

<b>Fuga de 2,0 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Decibeles</b>
1	-17,93
2	-17,56
3	-16,99
4	-17,98
5	-17,40
TOTAL	-17,57

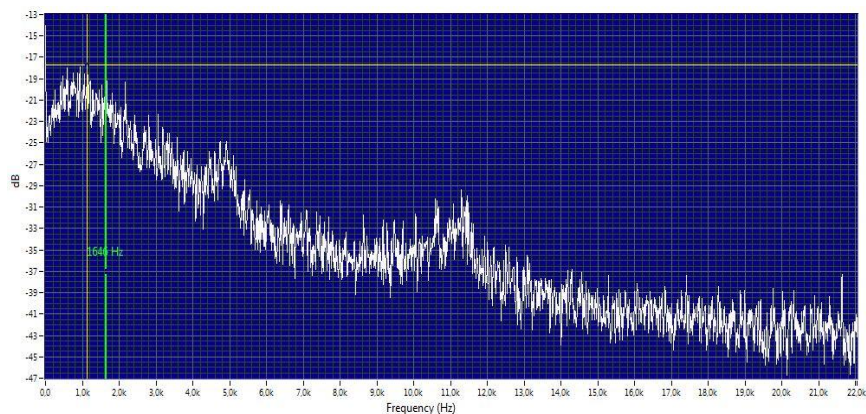
Fuente: Autores

Tabla 43. Frecuencias en fuga de 2,0 mm

<b>Fuga de 2,0 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Frecuencia (kHz)</b>
1	1,131
2	1,001
3	1,260
4	0,614
5	1,034
TOTAL	1,01

Fuente: Autores

Figura 32. Medición N°2 de una fuga de 2,0 mm



Fuente: Autores



En la figura (31) se indica el espectro de la segunda medición que se obtuvo de una fuga de 2,0 mm, donde se observa que el decibel es de -17,56 y la frecuencia de 1,001kHz, así mismo podemos observar que el primer armónico e 1,64 kHz.

- *Punto de fuga de 2,5 mm*

Tabla 44. Decibeles en fuga de 2,5 mm

<b>Fuga de 2,5 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Decibeles</b>
1	-17,99
2	-17,28
3	-17,25
4	-18,15
5	-18,74
TOTAL	-17,88

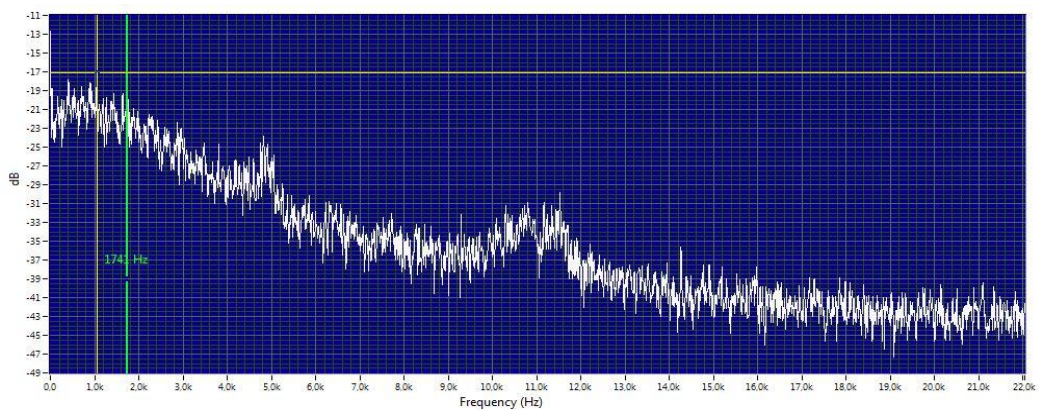
Fuente: Autores

Tabla 45. Frecuencias en fuga de 2,5 mm

<b>Fuga de 2,5 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Frecuencia (kHz)</b>
1	1,313
2	1,055
3	1,098
4	1,078
5	1,012
TOTAL	1,11

Fuente: Autores

Figura 33. Medición N°3 de una fuga de 2,5 mm



Fuente: Autores

En la figura (32) se indica el espectro de la tercera medición que se obtuvo de una fuga de 2,5 mm, donde se observa que el decibel es de -17,25 y la frecuencia de 1,098 kHz, así mismo podemos observar que el primer armónico es 1,741 kHz.

- *Punto de fuga de 3,0 mm*

Tabla 46. Decibeles en fuga de 3,0 mm

<b>Fuga de 3,0 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Decibeles</b>
1	-17,69
2	-18,24
3	-19,48
4	-19,19
5	-20,40
TOTAL	-19,00

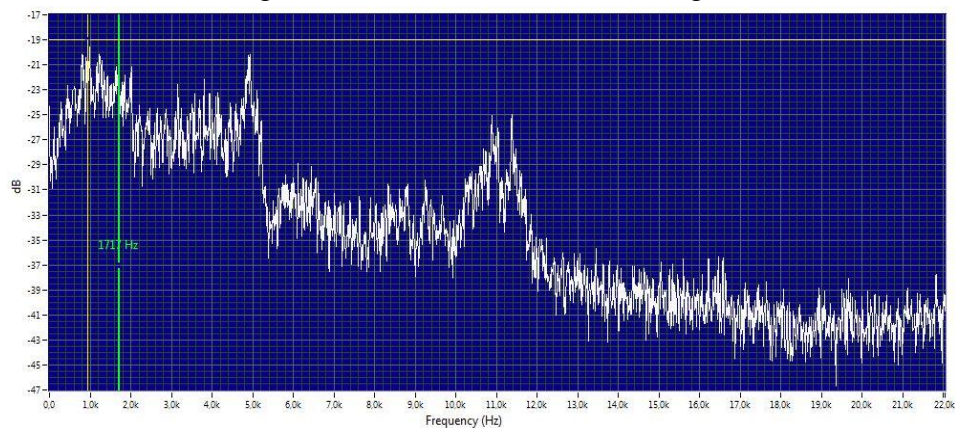
Fuente: Autores

Tabla 47. Frecuencias en fuga de 3,0 mm

<b>Fuga de 3,0 mm</b>	
<b>N° de Medición</b>	<b>Frecuencia (kHz)</b>
1	1,712
2	0,808
3	0,892
4	0,936
5	1,820
TOTAL	1,23

Fuente: Autores

Figura 34. Medición N°4 de una fuga de 3,0 mm



Fuente: Autores

En la figura (33) se indica el espectro de la cuarta medición que se obtuvo de una fuga de 3,0 mm, donde se observa que el decibel es de -19,19 y la frecuencia de 0,936 kHz, así mismo podemos observar que el primer armónico es 1,717 kHz.

#### 4.4 Comparación entre fuga de área circular y área rectangular

Con la fuga de 2,0 mm de diámetro se hizo mediciones con área circular y rectangular para observar si debido al cambio de área con el mismo diámetro se iban a presentar diferentes valores en decibeles, frecuencia, potencia, volumen de aire y potencia requerida.

Después que se realizó las mediciones con sus respectivos análisis se pudo comparar y confirmar que no existe variaciones, prácticamente los valores son casi iguales; donde si hay un poco de diferencia es en la potencia requerida. A continuación se indica cuales son valores que se obtuvo.

Tabla 48. Fuga de área circular y rectangular

Fuga de 2,0 mm con área circular y rectangular							
Área circular	Fuerza (kg)	98,50	99,20	99,20	99,50	99,80	99,24
	Presión (Bar)	1,39	1,40	1,40	1,41	1,41	1,404
	Decibeles	-17,93	-17,56	-16,99	-17,98	-17,40	-17,57
	Frecuencia (kHz)	1,13	1,00	1,26	0,61	1,03	1,01
	Volumen de aire litros/min	32,50					
	Potencia (kW)	0,9337					
	Pérdidas por fugas de aire	818					
Área rectangular	Fuerza (kg)	98,90	99,30	99,20	99,50	99,10	99,20
	Presión (Bar)	1,40	1,40	1,40	1,41	1,40	1,403
	Decibeles	-17,46	-17,56	-17,42	-17,84	-17,50	-17,56
	Frecuencia (kHz)	0,98	1,09	1,22	0,98	0,79	1,01
	Volumen de aire litros/min	32,50					
	Potencia (kW)	0,9591					
	Pérdidas por fugas de aire	840					

Fuente: Autores

Tabla 49. Resultados finales de decibeles y frecuencias

Resultados finales		
Fugas (mm)	Decibeles	Frecuencia (kHz)
0,0	0,00	0,00
1,0	-17,29	0,65
1,5	-17,53	0,70
2,0	-17,57	1,01
2,5	-17,88	1,11
3,0	-19,00	1,23
A. rectangular	-17,56	1,01

Fuente: Autores

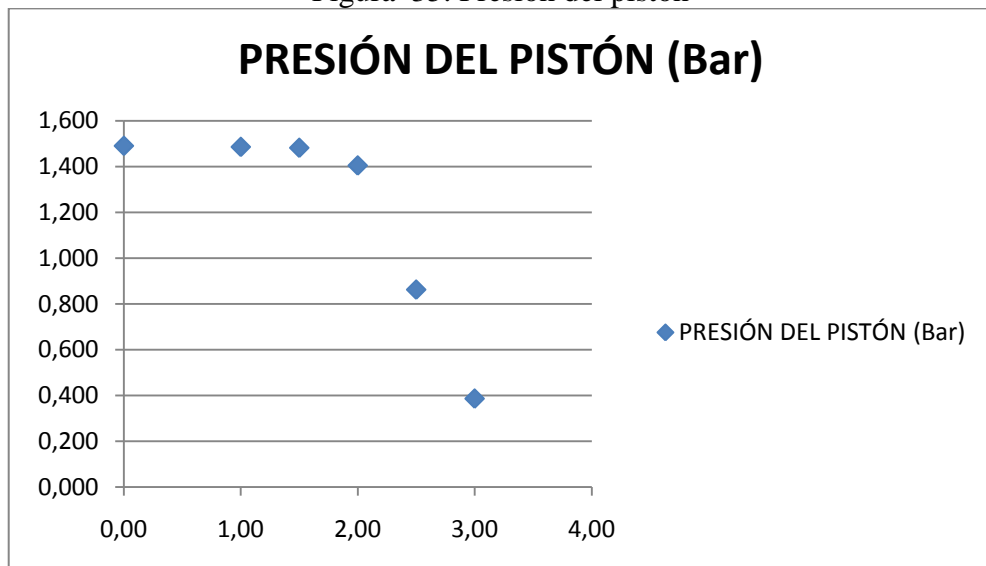
## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 Presión del consumidor final y diámetro de las fugas

Una vez que se realizó la toma de datos y los cálculos adecuados, se procedió analizar la curva de la presión del consumidor final, es decir, del pistón con cada uno de los puntos de fuga. Más adelante se comprobará el resultado de la curva mediante el método analítico de regresión polinómica y además mediante artificios matemáticos se hizo un ajuste a la curva para que corte por todos los puntos.

Figura 35. Presión del pistón



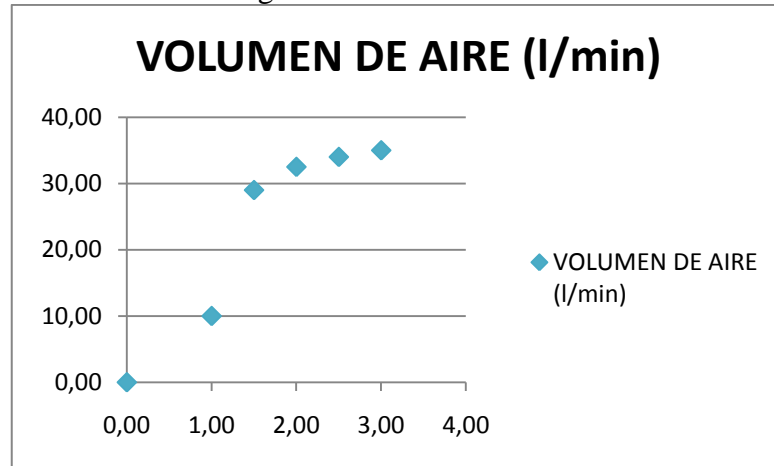
Fuente: Autores

Luego de que se analizó la curva se notó que la presión sin fugas hasta la de 2,0 mm la diferencia entre presiones es mínima y de 2,0 mm en adelante aumenta notoriamente pero cabe indicar que a mayor diámetro de fuga menor la presión en el consumidor final, pero lo más seguro es que nunca va llegar a ser cero la presión.

#### 5.2 Caudal de aire y presión del consumidor final

Primero en la figura (36) se observa cuanto caudal de aire se necesita en cada una de las fugas que presenta el sistema.

Figura 36. Caudal de aire



Fuente: Autores

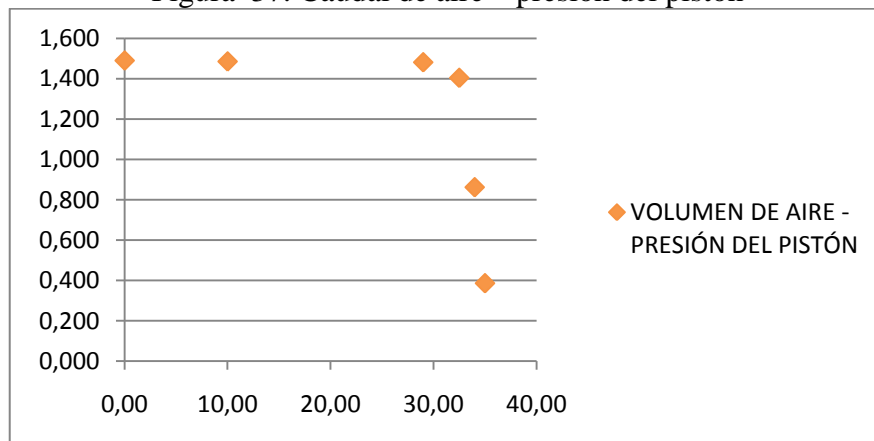
Tabla 50. Caudal de aire – diámetro de fuga

Volumen de aire	
Diámetro de las fugas (mm)	Volumen de aire l/min
0,0	0,00
1,0	10,00
1,5	29,00
2,0	32,50
2,5	34,00
3,0	35,00

Fuente: Autores

Una vez que se observó la figura (36), se procede analizar la curva de caudal de aire y presión del consumidor final, donde se observa que entre mayor caudal de aire se fugue en el sistema menor va ser la presión en el pistón.

Figura 37. Caudal de aire – presión del pistón



Fuente: Autores

Tabla 51. Caudal de aire presión del pistón

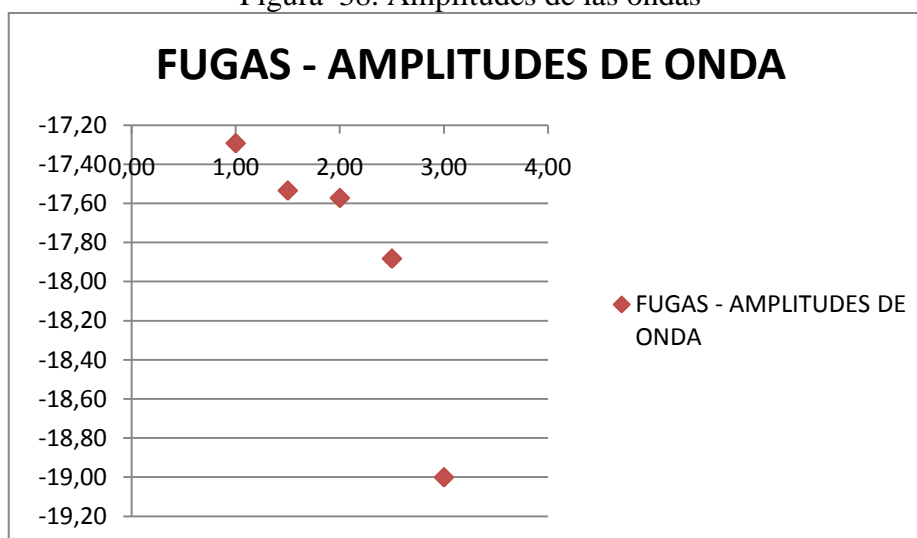
Volumen de aire - presión del pistón		
Diámetro de las fugas (mm)	Volumen de aire l/min	Presión (Bar)
0,0	0,00	1,490
1,0	10,00	1,485
1,5	29,00	1,481
2,0	32,50	1,404
2,5	34,00	0,862
3,0	35,00	0,386

Fuente: Autores

### 5.3 Amplitudes de las ondas de ultrasonido

En la figura (37) se aprecia que a medida que el diámetro de la fuga en el sistema de aire comprimido aumenta los valores de los decibeles disminuyen.

Figura 38. Amplitudes de las ondas



Fuente: Autores

Tabla 52. Amplitudes de ondas

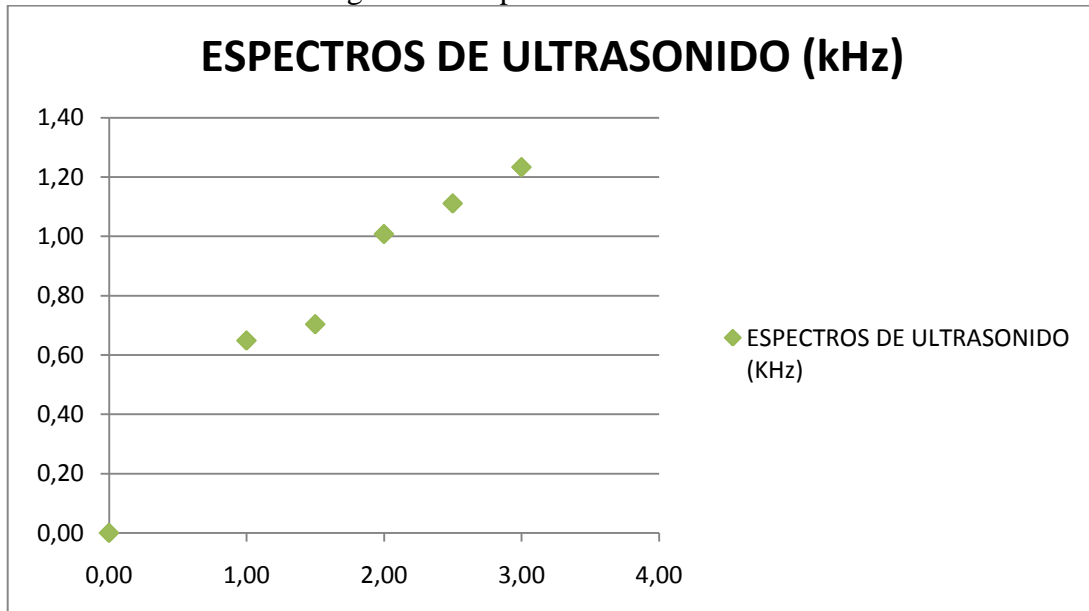
Amplitudes de onda	
Fugas (mm)	Decibeles
1,0	-17,29
1,5	-17,53
2,0	-17,57
2,5	-17,88
3,0	-19,00

Fuente: Autores

## 5.4 Espectros de ultrasonido

A continuación se observa que el diámetro de fuga y la frecuencia son directamente proporcionales, es decir, que a mayor diámetro de fuga mayor las frecuencias.

Figura 39. Espectros de ultrasonido



Fuente: Autores

Tabla 53. Espectros de ultrasonido

Espectros de ultrasonido	
Fugas (mm)	Frecuencia (kHz)
0,0	0,00
1,0	0,65
1,5	0,70
2,0	1,01
2,5	1,11
3,0	1,23

Fuente: Autores

## 5.5 Análisis de la calidad de la energía

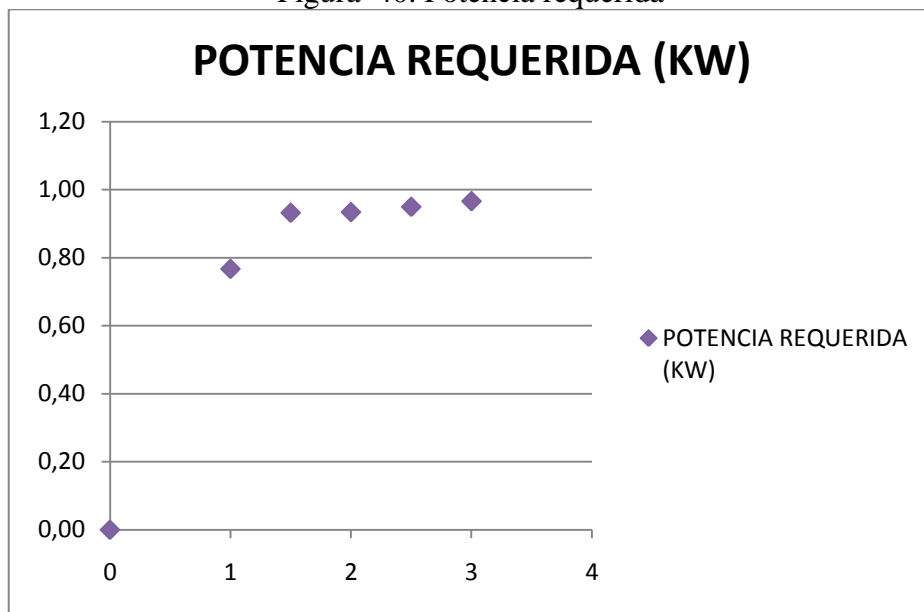
Ahora se procede analizar la potencia requerida por el compresor en cada punto de fuga mediante el equipo FLUKE 435 SERIE 2. En cada fuga se tomó valores del tiempo de descarga del compresor, cuantos ciclos se produjeron y la potencia.

Tabla 54. Potencia requerida para la compresión

Potencia requerida para la compresión (kW)			
Fugas (mm)	Potencia requerida (kW)	Tiempo de descarga	Ciclos
0,0	0,00	0,00	0
1,0	0,7668	1,31 minutos	5
1,5	0,9317	32 segundos	6
2,0	0,9337	24 segundos	7
2,5	0,9492	18 segundos	8
3,0	0,9658	17 segundos	8

Fuente: Autores

Figura 40. Potencia requerida



Fuente: Autores

Se realizó mediciones con el equipo de análisis de calidad de energía, tomando en cuenta un tiempo de media hora en cada punto de fuga, donde se notó que la potencia requerida y los diámetros de fuga son directamente proporcionales, es decir, se observa que la potencia aumenta a medida que la fuga es mayor.

## 5.6 Relación entre amplitud de onda de ultrasonido y potencia requerida

Una vez que se analizó la curva se puede observar los decibeles que se obtuvieron en cada fuga con la potencia requerida. Más adelante se comprobará el resultado de la curva mediante el método analítico de regresión polinómica y además mediante artificios matemáticos se hizo un ajuste a la curva para que corte por todos los puntos.

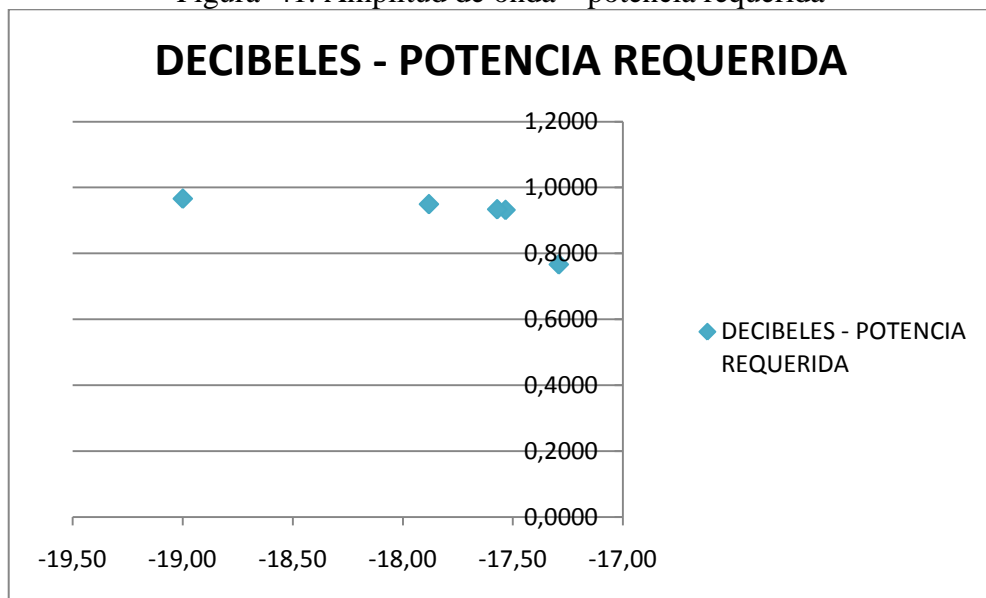


Tabla 55. Amplitud de onda – potencia requerida

Decibeles - potencia requerida	
Decibeles	Potencia requerida (kW)
0,00	0,00
-17,29	0,7668
-17,53	0,9317
-17,57	0,9337
-17,88	0,9492
-19,00	0,9658

Fuente: Autores

Figura 41. Amplitud de onda – potencia requerida



Fuente: Autores

### 5.7 Eficiencia energética en los puntos de fuga

Se realizará el cálculo de cuánto se pierde económicamente al año en la industria por cada fuga de aire comprimido que existe en un sistema. Para este cálculo se necesita la potencia que requiere el compresor, el costo de kW-h en la industria y cuantas horas trabaja el compresor al año, la fórmula que se utiliza es:

$$P_f = P_{req.} \times C_{kW-h} \times H_{trab.} \quad (27)$$

Dónde:

$P_f$  = Pérdida por Fugas (USD)

$P_{req.}$  = Potencia Requerida (kW-h)

$C_{KW-h}$  = Costo del kW-h

$H_{trab.}$  = Horas de trabajo del Compresor al año

Tabla 56. Pérdidas anuales por fugas

Pérdidas anuales por fugas				
Fuga (mm)	Potencia (kW)	Horas de trabajo	Costo del kW-h	Pérdidas por fugas de aire (USD)
0,0	0,000	8760	0,10	0
1,0	0,767	8760	0,10	672
1,5	0,932	8760	0,10	816
2,0	0,934	8760	0,10	818
2,5	0,949	8760	0,10	831
3,0	0,966	8760	0,10	846
Área rectangular	0,959	8760	0,10	840

Fuente: Autores

## 5.8 Comparación de los resultados con los métodos analíticos

A continuación se demostrará mediante el método analítico de regresión polinómica los resultados de las siguientes curvas: (CHAPRA S., 1987)

**5.8.1 Presión del consumidor final y diámetro de las fugas:** A continuación se encontrará la ecuación de ajuste y para realizar el cálculo del método se colocará los datos que pertenecen a esta curva, cabe indicar que la curva es de segundo orden ( $m=2$ ) y el número de datos es 6 ( $n= 6$ ).

Tabla 57. Regresión polinomial fuga - presión del pistón

Regresión polinomial: fuga - presión del consumidor final								
$X_i$	$Y_i$	$X_1^2$	$X_2^3$	$X_3^4$	$X_i * Y_i$	$X_1^2 * Y_i$	$S_t$	$S_r$
0,0	1,49	0,000	0,000	0,000	0	0	0,0932	0,0015
1,0	1,485	1,000	1,000	1,000	1,485	1,485	0,0902	0,0135
1,5	1,481	2,250	3,375	5,063	2,2215	3,33225	0,0878	0,0001
2,0	1,404	4,000	8,000	16,000	2,808	5,616	0,0481	0,0222
2,5	0,862	6,250	15,625	39,063	2,155	5,3875	0,1041	0,0012
3,0	0,386	9,000	27,000	81,000	1,158	3,474	0,6379	0,0007
10,000 0	7,108 0	22,500 0	55,000 0	142,125 0	9,827 5	19,294 8	1,061 3	0,039 1

Fuente: Autores

Mediante la siguiente fórmula se obtiene la suma total de los cuadrados ( $S_t$ ), donde  $\bar{Y} = 1,1847$ .

$$S_t = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (28)$$

$$S_t = 1,0613$$

Luego se plantea el sistema donde se determina los coeficientes  $a_0, a_1, a_2$

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_i & \sum X_i^2 \\ \sum X_i & \sum X_i^2 & \sum X_i^3 \\ \sum X_i^2 & \sum X_i^3 & \sum X_i^4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum Y_i X_i \\ \sum X_i^2 Y_i \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} 6 & 10 & 22,50 \\ 10 & 22,50 & 55 \\ 22,50 & 55 & 142,13 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,11 \\ 9,83 \\ 19,29 \end{bmatrix}$$

Una vez que se obtuvo la matriz se procede a resolver las ecuaciones con la técnica de eliminación de Gauss.

$$a_0 \times (n) + (a_1) \times \sum X_i + a_2 \times (\sum X_i^2) = \sum Y_i \quad (30)$$

$$a_0 = \frac{7,108 - 10a_1 - 22,50a_2}{6}$$

$$a_0 \times (\sum X_i) + (a_1) \times \sum X_i^2 + a_2 \times (\sum X_i^3) = \sum X_i Y_i \quad (31)$$

$$a_1 = \frac{9,828 - 10a_0 - 55,00a_2}{22,50}$$

$$a_0 \times (\sum X_i^2) + (a_1) \times \sum X_i^3 + a_2 \times (\sum X_i^4) = \sum X_i^2 Y_i \quad (32)$$

$$a_2 = \frac{19,295 - 22,50a_0 - 55,00a_1}{142,125}$$

Ahora se procede a reemplazar el resultado de la ecuación (31) en el resultado de la (30) para obtener la siguiente ecuación:

$$a_0 = \frac{7,108 - 10 \times \left( \frac{9,828 - 10a_0 - 55,00a_2}{22,50} \right) - 22,50a_2}{6}$$

$$a_0 = \frac{61,65 + 43,75a_2}{35}$$

Ahora procede a reemplazar el resultado de la ecuación (31) en el resultado de la (32) para obtener la siguiente ecuación.

$$a_2 = \frac{19,295 - 22,50a_0 - 55,00 \times \left( \frac{9,828 - 10a_0 - 55,00a_2}{22,50} \right)}{142,125}$$

$$a_2 = \frac{43,75a_0 - 106,40}{172,81}$$

Ahora se procede a reemplazar la ecuación de  $a_2$  en la de  $a_0$  para obtener el valor de  $a_0$

$$a_0 = \frac{61,65 + 43,75 \left( \frac{43,75a_0 - 106,40}{172,81} \right)}{35}$$

$$a_0 = 1,451$$

Ahora se reemplaza el valor de  $a_0$  la ecuación de  $a_2$  para obtener su valor

$$a_2 = \frac{43,75 \times (1,451) - 106,40}{172,81}$$

$$a_2 = -0,248$$

Ahora se reemplaza el valor de  $a_0$  y  $a_2$  en la ecuación de  $a_1$  para obtener su valor

$$a_1 = \frac{9,828 - 10 \times (1,451) - 55 \times (-0,248)}{22,50}$$

$$a_1 = 0,398$$

Se resolvió el sistema y se obtuvo los valores de:  $a_0 = 1,451$ ;  $a_1 = 0,398$ ;  $a_2 = -0,248$ . Por lo tanto la ecuación de ajuste es:

$$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 \quad (33)$$

$$Y = -0,248x^2 + 0,398x + 1,451$$

Con los valores de  $a_0, a_1, a_2$  y mediante la siguiente fórmula se obtiene la suma de los cuadrados de los residuos ( $S_r$ )

$$S_r = \sum_{i=1}^n (Y_i - a_0 - a_1 \times X_i - a_2 \times X_i^2)^2 \quad (34)$$

$$S_r = 0,0391$$

El error estándar del estimado con base en la regresión de polinomios ( $S_{y/x}$ ) es:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m+1)}} \quad (35)$$

$$S_{y/x} = 0,1140$$

Una vez que se determinó  $S_t$  y  $S_r$ , se calcula el coeficiente de correlación ( $r^2$ )

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (36)$$

$$r^2 = 0,9632 \approx 1$$

Estos resultados indican que el 96,32 % de la incertidumbre original la resolvió el modelo. Este resultado soporta la conclusión de que la ecuación cuadrática representa un excelente ajuste.

Como la curva no pasa por todos los puntos se utilizará artificios matemáticos para ajustar la ecuación inicial  $Y = -0,248x^2 + 0,398x + 1,451$ , para que cada uno de los puntos se intercepte. Donde se encontrará  $Y'$  con la siguiente fórmula:

$$Y' = \ln(1,5 - y) \quad (37)$$

Tabla 58. Ajuste de la curva fuga – presión del consumidor final

Ajuste de la curva regresión polinomial: fuga - presión del consumidor final								
$X_i$	$Y'$	$X_1^2$	$X_2^3$	$X_3^4$	$X_i * Y'$	$X_1^2 * Y'$	$S_t$	$S_r$
0,0	-4,605	0,000	0,000	0,000	0	0	4,1195	0,0029
1,0	-4,200	1,000	1,000	1,000	-4,19970508	-4,19970508	2,6380	0,0000
1,5	-3,963	2,250	3,375	5,063	-5,94497445	-8,91746167	1,9260	0,2260
2,0	-2,343	4,000	8,000	16,000	-4,68681418	-9,37362835	0,0539	0,0154
2,5	-0,449	6,250	15,625	39,063	-1,12354249	-2,80885622	4,5203	0,4667
3,0	0,108	9,000	27,000	81,000	0,32387142	0,97161427	7,2010	0,1677
10,000	-15,4531	22,5000	55,0000	142,1250	-15,6312	-24,3280	20,4587	0,8788

Fuente: Autores

Mediante la ecuación (28) se obtendrá la suma total de los cuadrados ( $S_t$ ), donde  $\bar{Y} = -2,5755$ .

$$S_t = 20,4587$$

Luego con la ecuación (29), se determinan los coeficientes  $a_0, a_1, a_2$ :

$$\begin{bmatrix} 6 & 10 & 22,50 \\ 10 & 22,50 & 55 \\ 22,50 & 55 & 142,13 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -15,45 \\ -15,63 \\ -24,33 \end{bmatrix}$$

Una vez que se obtuvo la matriz se procede a resolver las ecuaciones con la técnica de eliminación de Gauss, con las ecuaciones (30), (31), (32) respectivamente.

$$a_0 \times (6) + a_1 \times (10) + a_2 \times (22,50) = -15,45$$

$$a_0 = \frac{-15,45 - 10a_1 - 22,50a_2}{6}$$

$$a_0 \times (10) + a_1 \times (22,50) + a_2 \times (55,00) = -15,63$$

$$a_1 = \frac{-15,63 - 10a_0 - 55,00a_2}{22,50}$$

$$a_0 \times (22,50) + a_1 \times (55,00) + a_2 \times (142,125) = -24,33$$

$$a_2 = \frac{-24,33 - 22,50a_0 - 55,00a_1}{142,125}$$

Ahora se procede a reemplazar  $a_1$  en  $a_0$  donde se obtiene la siguiente ecuación.

$$a_0 = \frac{-15,45 - 10 \times \left( \frac{-15,63 - 10a_0 - 55,00a_2}{22,50} \right) - 22,50a_2}{6}$$

$$a_0 = \frac{-191,33 + 43,75a_2}{35}$$

Luego se reemplaza  $a_1$  en  $a_2$  para obtener la siguiente ecuación.

$$a_2 = \frac{-24,33 - 22,50a_0 - 55,00 \times \left( \frac{-15,63 - 10a_0 - 55,00a_2}{22,50} \right)}{142,125}$$

$$a_2 = \frac{43,75a_0 + 312,22}{172,81}$$

Se reemplaza la nueva ecuación de  $a_2$  en la nueva ecuación de  $a_0$  para obtener su valor

$$a_0 = \frac{-191,33 + 43,75 \left( \frac{43,75a_0 + 312,22}{172,81} \right)}{35}$$

$$a_0 = -4,6587$$

Ahora se reemplaza el valor de  $a_0$  la ecuación de  $a_2$  para obtener su valor

$$a_2 = \frac{43,75 \times (-4,6587) + 312,22}{172,81}$$

$$a_2 = 0,6299$$

Ahora el valor de  $a_0$  y  $a_2$  en la ecuación de  $a_1$  para obtener su valor

$$a_1 = \frac{-15,63 - 10 \times (-4,6587) - 55 \times (0,6299)}{22,50}$$

$$a_1 = -0,1643$$

Resuelto el sistema se obtuvo los valores de:  $a_0 = -4,6587$ ;  $a_1 = -0,1643$ ;  $a_2 =$

0,6299 Por lo tanto con la ecuación (33) se obtiene la nueva ecuación de ajuste que es:

$$Y = 0,6299x^2 - 0,1643x - 4,6587$$

Con los valores de  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y mediante la ecuación (34) se obtiene la suma de los cuadrados de los residuos ( $S_r$ )

$$S_r = 0,8788$$

Se obtiene el error estándar del estimado con base en la regresión de polinomios ( $S_{y/x}$ ) con la ecuación (35):

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{0,8788}{6 - (2 + 1)}}$$

$$S_{y/x} = 0,5412$$

Una vez que se determinó  $S_t$  y  $S_r$ , se calcula el coeficiente de correlación ( $r^2$ ), mediante la ecuación (36).

$$r^2 = \frac{20,4587 - 0,8788}{20,4587}$$

$$r^2 = 0,9571 \approx 1$$

Estos resultados indican que el 95,71 % de la incertidumbre original la resolvió el modelo. Este resultado soporta la conclusión de que la ecuación cuadrática representa un excelente ajuste. Ahora con los valores que se obtuvo continuamos para encontrar nuestra fórmula de ajuste de curva final.

$$\ln(1,5 - Y) = 0,6299x^2 - 0,1643x - 4,6587$$

$$Y = e^{0,6299x^2 - 0,1643x - 4,6587} - 1,5$$

$$Y = -e^{(0,6299x^2 - 0,1643x - 4,6587)} + 1,5 \quad (38)$$



Cabe indicar que esta ecuación de ajuste solo será válida o utilizada para valores de X que se encuentren dentro del rango de 0,00 mm hasta 3,00 mm de diámetro de fuga.

**5.8.2 Amplitud de onda y potencia requerida:** A continuación se encontrará la ecuación de ajuste y para realizar el cálculo del método se coloca los datos que pertenecen a esta curva, cabe indicar que la curva es de segundo orden (m=2) y el número de datos es 6 (n= 6).

Tabla 59. Regresión polinomial amplitud de onda – potencia requerida

Regresión polinomial: amplitud de onda - potencia requerida								
$X_i$	$Y_i$	$X_1^2$	$X_2^3$	$X_3^4$	$X_i * Y_i$	$X_1^2 * Y_i$	$S_t$	$S_r$
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0	0	0,5744	0,0000
-17,29	0,77	299,013	-5170,537	89408,932	-13,2595056	229,283371	0,0001	0,0096
-17,53	0,93	307,441	-5390,673	94520,064	-16,3364278	286,442925	0,0302	0,0025
-17,57	0,93	308,775	-5425,798	95342,114	-16,4069764	288,303389	0,0309	0,0025
-17,88	0,95	319,766	-5718,054	102250,246	-16,9735944	303,521815	0,0366	0,0019
-19,00	0,97	361,000	-6859,000	130321,000	-18,3502	348,6538	0,0432	0,0004
-89,2800	4,5472	1595,9955	-28564,0624	511842,3569	-81,3267	1456,2053	0,7154	0,0168

Fuente: Autores

Mediante la ecuación (28) se obtiene la suma total de los cuadrados ( $S_t$ ), donde  $\bar{Y} = 0,7579$ .

$$S_t = 0,7154$$

Luego con la ecuación (29), determinamos los coeficientes  $a_0, a_1, a_2$ :

$$\begin{bmatrix} 6 & -89,28 & 1595,996 \\ -89,28 & 1595,996 & -28564,062 \\ 1595,996 & -28564,062 & 511842,357 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,547 \\ -81,327 \\ 1456,205 \end{bmatrix}$$

Una vez obtenida la matriz se procede a resolver las ecuaciones con la técnica de eliminación de Gauss, mediante las ecuaciones (30), (31), (32), respectivamente.

$$a_0 = \frac{4,547 + 89,28a_1 - 1595,996a_2}{6}$$

$$a_1 = \frac{-81,327 + 89,28a_0 + 28564,062a_2}{1595,996}$$

$$a_2 = \frac{1456,205 - 1595,996 a_0 + 28564,062 a_1}{511842,357}$$

Ahora se reemplaza  $a_1$  en  $a_0$  donde se obtiene la siguiente ecuación.

$$a_0 = \frac{4,547 + 89,28 \times \left( \frac{-81,327 + 89,28 a_0 + 28564,062 a_2}{1595,996} \right) - 1595,996 a_2}{6}$$

$$a_0 = \frac{-3,881 + 2996,223 a_2}{1605,058}$$

Ahora se reemplaza  $a_1$  en  $a_2$  donde se obtiene la siguiente ecuación.

$$a_2 = \frac{1456,205 - 1595,996 a_0 + 28564,062 \times \left( \frac{-81,327 + 89,28 a_0 + 28564,062 a_2}{1595,996} \right)}{511842,357}$$

$$a_2 = \frac{2996,223 a_0 + 1067,885}{992716,463}$$

Se reemplazar la nueva ecuación de  $a_2$  en la nueva ecuación de  $a_0$  para obtener su valor.

$$a_0 = \frac{-3,881 + 2996,223 \left( \frac{2996,223 a_0 + 1067,885}{992716,463} \right)}{1605,058}$$

$$a_0 = -0,0002$$

Ahora se sustituye el valor de  $a_0$  la ecuación de  $a_2$  para obtener su valor.

$$a_2 = \frac{2996,223 \times (-0,0002) + 1067,885}{992716,463}$$

$$a_2 = 0,0011$$

Se sustituye el valor de  $a_0$  y  $a_2$  en la ecuación de  $a_1$  para obtener su valor

$$a_1 = \frac{-81,327 + 89,28 \times (-0,0002) + 28564,062 \times (0,0011)}{1595,996}$$

$$a_1 = -0,031$$

Resolviendo el sistema se obtuvo los valores de:  $a_0 = -0,0002$ ;  $a_1 = -0,031$ ;  $a_2 = 0,0011$ . Por lo tanto con la ecuación (33) se obtiene la ecuación de ajuste que es:

$$Y = 0,0011x^2 - 0,031x - 0,0002$$

Con los valores de  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y mediante la ecuación (34) se obtiene la suma de los cuadrados de los residuos ( $S_r$ )

$$S_r = 0,0168$$

Con la ecuación (35) se obtiene el error estándar del estimado con base en la regresión de polinomios ( $S_{y/x}$ ) que es:

$$S_{y/x} = 0,0748$$

Una vez que se determinó  $S_t$  y  $S_r$ , se calcula el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) con la ecuación (36).

$$r^2 = 0,9766$$

Este resultado indica que el 97,66 % de la incertidumbre original la resolvió el modelo. Este resultado soporta la conclusión de que la ecuación cuadrática representa un excelente ajuste.

Mediante artificios matemáticos se va ajustar la ecuación inicial para que cada uno de los puntos se intercepte con la curva. Primero se lleva al origen los puntos, donde se obtiene  $X'$  y  $Y'$ .

$$X' = (x_i + 17,292) \times (-1)$$

$$Y' = (Y_i - 0,7686)$$

Con  $X'$  y  $Y'$  asemeja a esta ecuación:

$$Y' = a \times x'^b \tag{39}$$

Ahora se procede a calcular  $X''$  y  $Y''$  cuyos valores se utilizará para realizar el método de regresión lineal, el cual ayudará para encontrar la ecuación que se va ajustar para que la curva pase por los puntos.

$$X'' = \ln(x_i')$$

$$Y'' = \ln(y_i')$$

Tabla 60. Regresión lineal amplitud de onda – potencia requerida

<b>Regresión lineal: amplitud de onda - potencia requerida</b>					
$X''$	$Y''$	$X''^2$	$X'' * Y''$	$S_t$	$S_r$
-1,42	-1,80	2,013	2,557	0,0057	0,0779
-1,27	-1,79	1,620	2,279	0,0040	0,0640
-0,53	-1,70	0,278	0,898	0,0007	0,0083
0,54	-1,61	0,287	-0,864	0,0127	0,0099
-2,6841	-6,9088	4,1985	4,8699	0,0230	0,1602

Fuente: Autores

Mediante la ecuación (28) se obtiene la suma total de los cuadrados ( $S_t$ ), donde  $\bar{Y} = -1,7272$ .

$$S_t = 0,0230$$

Luego se plantea el sistema para determinar los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} 4 & -2,6841 \\ -2,6841 & 4,1985 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6,9088 \\ 4,8699 \end{bmatrix}$$

Una vez obtenida la matriz se procede a resolver las ecuaciones con la técnica de eliminación de Gauss.

$$a_0 \times (n) + (a_1) \times \sum X_i = \sum Y_i \quad (41)$$

$$a_0 \times (4) + (a_1) \times -2,6841 = -6,9088$$

$$a_0 = \frac{-6,9088 + 2,6841a_1}{4}$$

$$a_0 \times (\sum X_i) + (a_1) \times \sum X_i^2 = \sum X_i Y_i \quad (42)$$

$$a_0 \times (-2,6841) + (a_1) \times 4,1985 = 4,8699$$

$$a_1 = \frac{4,8699 + 2,6841a_0}{4,1985}$$

Ahora se procede a reemplazar el resultado de la ecuación (42) en el resultado de la ecuación (41) para obtener el valor de  $a_0$

$$a_0 = \frac{-6,9088 + 2,6841 \times \left( \frac{4,8699 + 2,6841a_0}{4,1985} \right)}{4}$$

$$a_0 = -1,6617$$

Ahora se sustituye el valor de  $a_0$  en el resultado de la ecuación (42) para obtener el valor de  $a_1$

$$a_1 = \frac{4,8699 + 2,6841(-1,6617)}{4,1985}$$

$$a_1 = 0,0976$$

Resolviendo el sistema se obtuvo los valores de:  $a_0 = -1,6617$ ;  $a_1 = 0,0976$ . Por lo tanto la ecuación de ajuste es:

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (43)$$

$$Y'' = 0,0976X'' - 1,6617$$

Con los valores de  $a_0$ ,  $a_1$  y mediante la ecuación (34) se obtiene la suma de los cuadrados de los residuos ( $S_r$ )

$$S_r = \sum_{i=1}^n (Y_i - a_0 - a_1 \times X_i - a_2 \times X_i^2)^2$$

$$S_r = 0,1602$$

El error estándar del estimado con base en la regresión de polinomios ( $S_{y/x}$ ) es:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-2}} \quad (44)$$

$$S_{y/x} = 0,2830$$

Con los valores que se obtuvo se continúa para encontrar la fórmula de ajuste de curva final. Primero se reemplaza en la ecuación.

$$\ln a = -1,6617 \quad ; \quad a = e^{-1,6617} \quad ; \quad b = 0,0976$$

$$Y' = e^{-1,6617} * X^{0,0976}$$

Ahora se procede a sustituir la ecuación para concluir con la obtención de la ecuación final, la cual servirá para la obtención de la potencia requerida para la compresión y poder saber cuánto se pierde económicamente por cada fuga.

$$Y = [e^{-1,6617} * (-X - 17,292)^{0,0976}] + 0,7668 \quad (45)$$

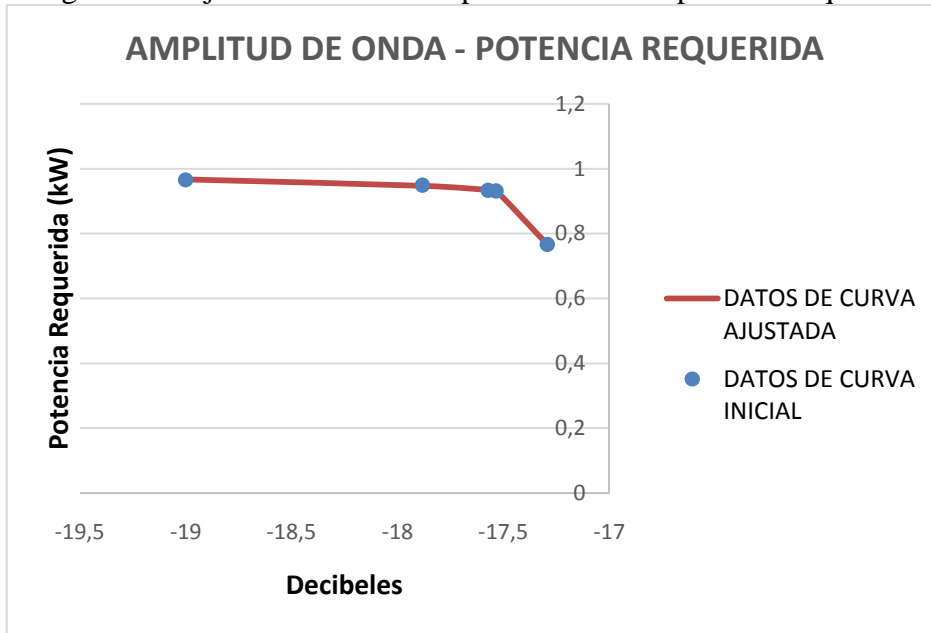
Cabe indicar que esta ecuación de ajuste solo será válida o utilizada para valores de X que se encuentre dentro del rango de -17,292 decibeles hasta  $-\infty$  decibeles.

Tabla 61. Ajuste de la curva amplitud de onda – potencia requerida

<b>Valores de ajuste de la curva</b>	
<b>Decibeles</b>	<b>Potencia Requerida (kW)</b>
-17,29	0,7668
-17,53	0,9320
-17,57	0,9344
-17,88	0,9470
-19,00	0,9667

Fuente: Autores

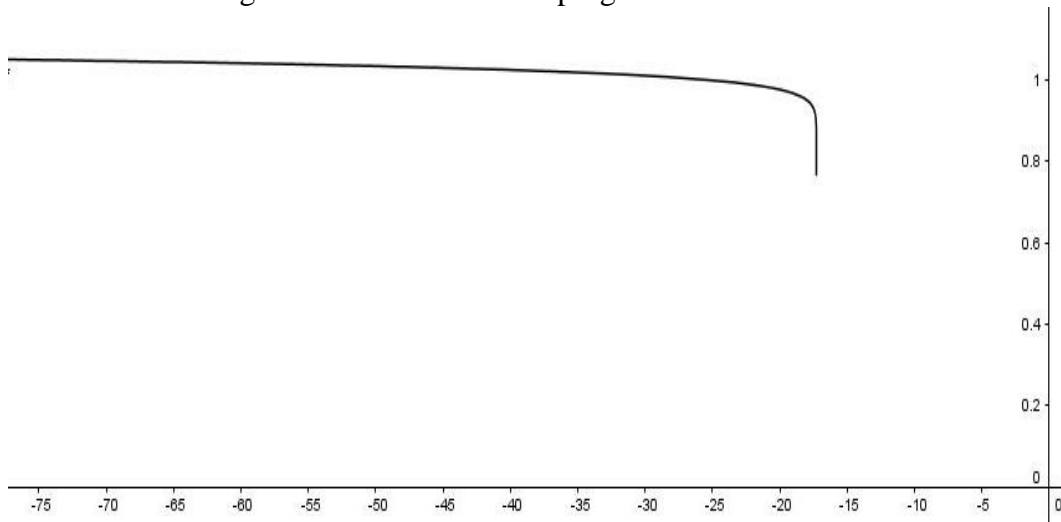
Figura 42. Ajuste de la curva amplitud de onda – potencia requerida



Fuente: Autores

Se utiliza el programa GEOGEBRA para colocar la ecuación obtenida y observar la curva.

Figura 43. Ecuación en el programa GEOGEBRA



Fuente: Autores

## 5.9 Aplicación práctica del equipo de ultrasonido pasivo

Una vez que se concluyó las mediciones y el análisis de las mismas en un módulo de pruebas en el laboratorio de mantenimiento predictivo, se realizó nuevas mediciones en el ámbito real en un laboratorio de la Facultad de Mecánica.

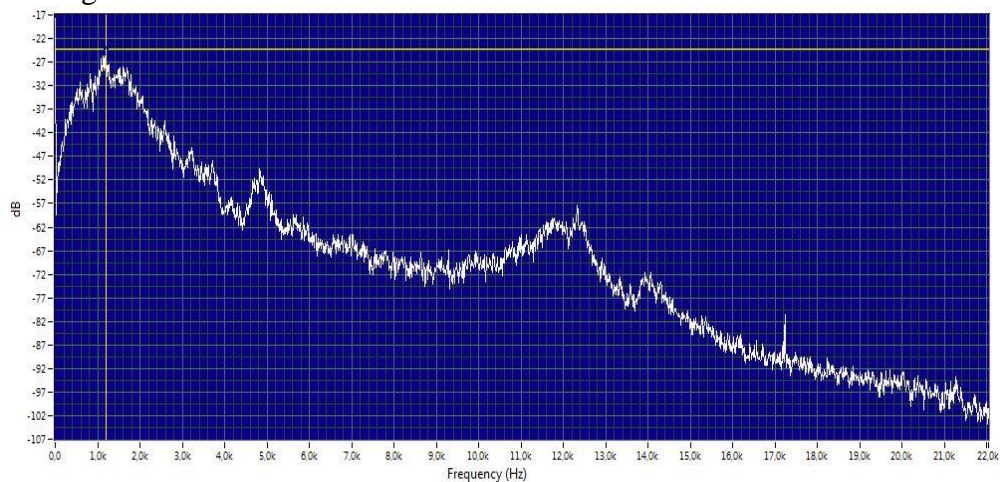
Figura 44. Mediciones en el laboratorio de la facultad de mecánica



Fuente: Autores

Se observó que hay cuatro fugas en el laboratorio, a continuación se indica el resultado de las mediciones. En la figura (45) se indica el espectro de la medición N°2, donde se observa que el decibel es de -24,37.

Figura 45. Medición N°2 en el laboratorio de la facultad de mecánica



Fuente: Autores

Tabla 62. Mediciones en el laboratorio de la facultad de mecánica

<b>Mediciones en el laboratorio con ultrasonido pasivo</b>		
<b>N° Medición</b>	<b>Decibeles</b>	<b>Potencia (kW)</b>
1	-12,68	-
2	-24,37	0,9966
3	-32,03	1,0136
4	-12,06	-

Fuente: Autores



Con la ecuación 45 encontrada de amplitud de onda (decibeles) y potencia requerida, se obtiene cuál es la potencia requerida y con esos valores se procede a calcular cuánto se pierde económicamente en el laboratorio por las fugas existentes.

Tabla 63. Pérdidas anuales por fugas en el laboratorio de la facultad de mecánica

<b>Pérdidas anuales por fugas en el laboratorio</b>				
<b>N° de Medición</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Horas de trabajo</b>	<b>Costo del kW-h</b>	<b>Pérdidas por fugas de aire en \$</b>
1	-	8760	0,10	-
2	0,9966	8760	0,10	873,02
3	1,0136	8760	0,10	887,91
4	-	8760	0,10	-
<b>TOTAL</b>				<b>1760,93</b>

Fuente: Autores

## C|APÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

Los requerimientos de aire comprimido establecen las directrices para el diseño y la construcción del módulo de pruebas.

Con el fin de obtener los datos necesarios para realizar la investigación se analizó la forma práctica que sirva para el estudio de los distintos comportamientos que tienen las fugas y se optó por el diseño y la construcción de un módulo de pruebas en el cual se va a simular las fugas.

Con las diferentes fugas provocadas en el módulo de pruebas se recolecto datos como: presión del sistema, presión del consumidor, decibeles, frecuencia, caudal dichos datos son el principal punto de partida para la ejecución de la investigación.

Con los datos obtenidos mediante las mediciones en el módulo de pruebas se procedió al análisis e interpretación de resultados observando que los parámetros como presión, caudal, potencia del sistema, potencia del consumidor final (pistón neumático), potencia requerida para la compresión, decibeles y frecuencia varían con cada diámetro de fuga y se concluyó que la fuga que mayores pérdidas energéticas presenta es la de 3mm esto debido a que la potencia del consumidor final es de 0,386 bar y el caudal de aire que se desperdicia es de 35,0 l/min dando como resultado que el pistón descienda muy lentamente y con una presión muy baja comparándola con la presión del sistema sin fugas.

Se determinó las conclusiones y recomendaciones basándonos en los resultados producto de la investigación realizada y también en los inconvenientes que se presentaron en el proceso de consecución de la investigación.

## **6.2 Recomendaciones**

Cuando se empieza con una investigación en el ámbito de aire comprimido se debe prestar especial atención a las fugas ya que las mismas son un consumidor del caudal y la presión que la unidad compresora entrega al sistema.

Realizar el diseño del módulo partiendo de las fugas que se van a presentar esto debido a que en nuestro caso de estudio las fugas que tenemos en el sistema son grandes y consumen en determinados casos la mayoría del caudal y presión del sistema.

Utilizar del modelo matemático (ecuación N° 45) producto de la investigación realizada en donde se puede reemplazar la amplitud de la onda de ultrasonido para obtener como resultado la potencia requerida para la compresión y de esta manera obtener una idea de la cantidad de dinero que se está perdiendo a causa de las fugas encontradas.

## BIBLIOGRAFÍA

**APLICACIONES INDUSTRIALES.** Lescaillep, Dr. Enoc Duliep. 2001. **2, La Habana, Cuba : s.n., Enero de 2001, Vol. 23. 1815-5901.**

**CAMRY.** Manual de la Balanza. *Model EB 9003.* [En línea] [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.]

**Catálogos, Consuta de. 2011.** Sistemas Neumáticos y Oleohidráulicos. *Neumática Convencional; ejercicios.* [En línea] Agosto de 2011. [Citado el: 29 de junio de 2015.] <http://blog.utp.edu.co/ricosta/files/2011/08/ejercicio-catalogo-SMC1.pdf>.

**CHAPRA S., CANALE R. 1987.** *Métodos Numéricos para Ingenieros.* Naucalpan de Juárez; México : Libros McGraw-Hill de México S.A. de C.V., 1987. 968-451-847-1.

**CUNALATA, Oscar Gabriel TOAPANTA. 2010.** Implementación de un análisis de mantenimiento basado en condición de los compresores recíprocos y de tornillo. [En línea] 13 de mayo de 2010. [Citado el: 29 de junio de 2015.] <http://dSPACE.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/260/3/15T00437.pdf>.

**ECURED.** Válvula de Bola. [En línea] [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.] [http://www.ecured.cu/index.php/V%C3%A1lvula\\_de\\_bola](http://www.ecured.cu/index.php/V%C3%A1lvula_de_bola).

**GRUPO DE GESTIÓN EFICIENTE DE ENERGÍA, KAI.** Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido. [En línea] [Citado el: 29 de junio de 2015.] <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/aire.pdf>.

**INC. UE SYSTEMS, ULTRAPROBE 15000.** MANUAL DE INSTRUCCIONES. [En línea] [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.] <http://www.uesystems.eu/wp-content/uploads/ES-Manual-UP15000.pdf>.

**INC. UESYSTEMS, ULTRAPROBE 15000.** Datos del Equipo de ultrasonido pasivo. [En línea] [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.] <http://www.uesystems.eu/wp-content/uploads/ES-UP15000.pdf>.

**INDUSTRIAL, Automatización. 2010.** Distribución de Aire Comprimido. *Neumatica, hidraulica, microcontroladores y autómatas.* [En línea] 2 de septiembre de 2010. [Citado el: 29 de junio de 2015.] <http://industrial-automatica.blogspot.com/2010/09/distribucion-de-aire-comprimido.html>.

**INDUSTRIAL, LEON.** Pérdidas por Fricción en accesorios. [En línea] [Citado el: 29 de junio de 2015.] <http://www.leonindustrial.com.ar/gallery/215.pdf>.

**JIMENEZ, Salvador de las HERAS. 2003.** *Instalaciones Neumáticas.* s.l. : UOC(UNIVERSITAT OBERTA DE CATALUNYA), 2003. 9788497880022.

**LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO. OLARTE W, BOTERO M. 2011.** 47, PEREIRA, COLOMBIA : SCIENTIA ET TECHNICA, 2011, Vol. 17. 0122-1701.

**METAL WORK, PNEUMATIC. 2007.** Racores Automáticos. [En línea] 2007. [Citado el: 29 de junio de 2015.] <http://www.ecuatorianaindustrial.com/media/pdf/METAL%20WORK/PDF%20RACORES/N4/N41/N411.pdf>.

**MICRO.** Micro Válvulas. *Válvula Direccionales*. [En línea] [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.] <http://www.microautomacion.com/catalogo/02Valvulas.pdf>.

**MOTT, ROBERT L. 1996.** *Mecánica de Fluidos aplicada*. Naucalpan de Juárez-Mexico : Prentice Hall Hispanoamericana, S.A, 1996. 968-880-542-4.

**MURILLO M, TOSCANO L. 2011.** Auditoria del sistema del aire comprimido en una empresa de textiles. [En línea] 15 de septiembre de 2011. [Citado el: 29 de junio de 2015.]

**ONUDI, Dirección Principal de.** Análisis Energético. [En línea] [Citado el: 29 de junio de 2015.] [http://www.unido.org/fileadmin/import/71421\\_4Exercices.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/import/71421_4Exercices.pdf).

**PARKER.** Catalogos. [En línea] [Citado el: 29 de junio de 2015.] <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.223a4a3cce02eb6315731910237ad1ca/?vgnextoid=062eeea74775e210VgnVCM10000048021dacRCRD&vgnnextfmt=default>.

**PERALTA D, FERNANDEZ D, GALIO G. 2011.** Implementación de un sistema de control y administración de aire comprimido en un CRM, como soporte a la toma de decisiones. [En línea] 7 de Febrero de 2011. [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.]

**Pneumatic, Metal Work. 2007.** Cilindros Neumáticos. *Cilindro serie "ISO 15552" (EX ISO 6431)*. [En línea] OCTUBRE de 2007. [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.] <http://www.metalwork.it/ita/img/prodotti/cilindri/11IT06%20ISO6431%20STD.pdf>.

**PNEUMATIC, METAL WORK. 2007.** Micro regulador de Flujo. *Serie MRF N*. [En línea] 2007. [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.] [http://www.metalwork.es/img/9910702%20COMP%20SPA%20IM02%2010\\_07.pdf](http://www.metalwork.es/img/9910702%20COMP%20SPA%20IM02%2010_07.pdf).

**Pneumatic, Metal Work. 2007.** Valves Series 70. [En línea] 2007. [Citado el: 29 de junio de 2015.]

**PORTEN.** Manual del Operador. *Instrucciones de Operación*. [En línea] [Citado el: 29 de JUNIO de 2015.] [www.portentools.com](http://www.portentools.com).

**RIVERA J, PALACIO J. 2008.** Implementación de programa de mantenimiento predictivo mediante la técnica de ultrasonido pasivo en la cooperativa colanta Ltda. [En línea] 2008. [Citado el: 29 de junio de 2015.] [http://www.researchgate.net/publication/37368291\\_Implementacin\\_de\\_programa\\_de\\_mantenimiento\\_predictivo\\_mediante\\_la\\_tcnica\\_de\\_ultrasonido\\_en\\_la\\_Cooperativa\\_Colanta\\_Ltda](http://www.researchgate.net/publication/37368291_Implementacin_de_programa_de_mantenimiento_predictivo_mediante_la_tcnica_de_ultrasonido_en_la_Cooperativa_Colanta_Ltda).

**SEAS.** Neumática. *Unidad 3: Actuadores Neumáticos*. [En línea] [Citado el: 29 de junio de 2015.] [http://oscus.seas.es/docs/t3\\_neumatica.pdf](http://oscus.seas.es/docs/t3_neumatica.pdf).

**SHIGLEY, JOSEPH EDWARD. 1984.** *ELEMENTOS DE MÁQUINAS Vol.1.* Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984.  
852160369X/9788521603696.

**TROYA, Mario Henry Chérrez. 2010.** Rediseño del sistema de aire comprimido de la estación de bombeo-faisanes del pilioducto esmeraldas-quito-macul. [En línea] 10 de julio de 2010. [Citado el: 29 de junio de 2015.]  
<http://dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/905/1/15T00446.pdf>.

**WIT, DE.** Manómetro lleno de Glicerina. [En línea] [Citado el: 29 de junio de 2015.]  
<http://dominion.com.mx/fichas/manometro-dewit-317.pdf>.

**ZHIMNAYCELA C., CAMPOSANO D. 2011.** Implementación de un sistema de aire comprimido para un taller de mecánica automotriz. [En línea] 2011. [Citado el: 29 de junio de 2015.]  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/21356/1/Proyecto%20Camp-Zhim.pdf>.