



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

“Análisis condicional y prevención de fallas en válvulas de presión mediante ultrasonido pasivo en el laboratorio de mantenimiento predictivo de la Facultad de Mecánica.”

**Aucapiña Aimara, Verónica Elizabeth;
Tierra Tierra, Iván Patricio**

TRABAJO DE TITULACIÓN

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

RIOBAMBA – ECUADOR

2017

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2015-01-10

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**AUCAPIÑA AIMARA VERÓNICA ELIZABETH
TIERRA TIERRA IVÁN PATRICIO**

Titulado:

**“ANÁLISIS CONDICIONAL Y PREVENCIÓN DE FALLAS EN VÁLVULAS
DE PRESIÓN MEDIANTE ULTRASONIDO PASIVO EN EL LABORATORIO
DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE LA FACULTAD DE MECÁNICA.”**

Sea aceptado 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. Pablo Montalvo Jaramillo.
DIRECTOR

Ing. Eduardo Hernández Dávila
ASESOR

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: AUCAPIÑA AIMARA VERÓNICA ELIZABETH

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN: “ANÁLISIS CONDICIONAL Y PREVENCIÓN DE FALLAS EN VÁLVULAS DE PRESIÓN MEDIANTE ULTRASONIDO PASIVO EN EL LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE LA FACULTAD DE MECÁNICA.”

Fecha de Examinación: 2017-03-08

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán Gallegos. PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Pablo Montalvo Jaramillo. DIRECTOR			
Ing. Eduardo Hernández Dávila ASESOR			

* 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
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: TIERRA TIERRA IVÁN PATRICIO.

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN: “ANÁLISIS CONDICIONAL Y PREVENCIÓN DE FALLAS EN VÁLVULAS DE PRESIÓN MEDIANTE ULTRASONIDO PASIVO EN EL LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE LA FACULTAD DE MECÁNICA.”

Fecha de Examinación: 2017-03-08

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán Gallegos PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Pablo Montalvo Jaramillo DIRECTOR			
Ing. Eduardo Hernández Dávila ASESOR			

* 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 presentamos, 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 de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Aucapiña Aimara Verónica Elizabeth

Tierra Tierra Iván Patricio

DEDICATORIA

Con mucho amor y humildad el presente trabajo lo dedico a Dios por haberme guiado y brindado fortaleza a lo largo de mi vida y de mi formación académica.

A mis padres Guido y María, ya que fueron, son y serán el pilar fundamental de mi vida, porque supieron inculcarme valores éticos y morales encaminándome por la senda correcta, por su apoyo incondicional en los momentos difíciles.

Por todo ello gracias ya que cada uno de sus sacrificios y consejos los veo plasmados en la persona que hoy soy. A mi hermana Cristina y mis hermanos un Dios les pague por no dejarme sola, y por cada palabra brindada para continuar y seguir sin desmayar en el trayecto a cumplir una más de mis metas, demostrando de esta forma que la unión familiar es inquebrantable.

Verónica Elizabeth Aucapiña Aimara.

Este logro se lo dedico a mi pilares fundamentales de mi vida que mi madre Luz Umbelina Tierra Tierra por ser esa persona que supo guiarme en mi camino, apoyándome en todos los momentos con sus consejos, anécdotas, vivencias para así no cometer errores y cumplir con una de mis metas, le agradezco todo el sacrificio por darme la educación y confiar en mí.

A mis hermanos Luis y Byron por ese apoyo constante que me dieron durante mi carrera formativa.

Iván Patricio Tierra Tierra

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento por haberme abierto las puertas y poder de esta forma adquirir los conocimientos teóricos y prácticos base fundamental para el desarrollo de buenos profesionales.

El agradecimiento a toda mi familia y amigos que entre palabras y bromas me brindaron su apoyo porque con todo ese ánimo incondicional y su gran compañerismo me impulsaron a continuar por todo ello gracias muchachos, ya que éste es un logro conjunto con todos ustedes.

Verónica Elizabeth Aucapiña Aimara.

Agradezco a Dios por prestarme la vida para cumplir una más de mis metas, a mi madre, abuelos, hermanos y familia en general por su esfuerzo y apoyo que me han sabido dar, a mis amigos con quienes compartí el salón y vivencias únicas, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento por permitir obtener un título profesional, a los ingenieros que supieron compartir sus conocimientos formándonos como buenos profesionales.

Iván Patricio Tierra Tierra.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	1
1.3.1 <i>Objetivo general.</i>	1
1.3.2 <i>Objetivos específicos.</i>	1
2. MARCO CONTEXTUAL.....	3
2.1 Generalidades del mantenimiento predictivo	3
2.2 Parámetros y técnicas del mantenimiento predictivo	4
2.3 Teoría básica del ultrasonido	4
2.3.1 <i>Sonido.</i>	5
2.3.2 <i>Método de ultrasonido.</i>	5
2.3.3 <i>Aplicación industrial.</i>	5
2.3.4 <i>Naturaleza de las ondas ultrasónicas.</i>	5
2.3.4.1 <i>Infrasónica o sonidos no audibles por el oído humano.</i>	5
2.3.4.2 <i>Sónica o sonidos audibles.</i>	6
2.3.4.3 <i>Ultrasónica.</i>	6
2.3.5 <i>Características ultrasónicas.</i>	7
2.3.6 <i>Tipos de ondas ultrasónicas</i>	7
2.3.6.1 <i>Ondas longitudinales.</i>	7
2.3.6.2 <i>Ondas transversales.</i>	7
2.3.6.3 <i>Ondas de superficie.</i>	7
2.3.6.4 <i>Ondas de Lamb.</i>	8
2.4 Producción y transmisión de las ondas sonoras	8
2.4.1 <i>Comportamiento de las ondas ultrasónicas.</i>	8
2.4.1.1 <i>Velocidad acústica.</i>	8
2.4.1.2 <i>Presión acústica.</i>	8
2.4.1.3 <i>Impedancia acústica.</i>	8
2.4.1.4 <i>Energía acústica.</i>	8
2.4.1.5 <i>Intensidad acústica.</i>	9
2.4.1.6 <i>Longitud de onda.</i>	9
2.4.1.7 <i>Amplitud de la oscilación.</i>	9
2.4.1.8 <i>Amplitud de la oscilación.</i>	9
2.4.1.9 <i>Frecuencia.</i>	9
2.4.1.10 <i>Frecuencia.</i>	9
2.4.2 <i>Característica del haz ultrasónico.</i>	9
2.4.3 <i>Métodos y técnicas de inspección ultrasónica.</i>	9
2.5 Técnica de manejo del equipo de ultrasonido pasivo y sus componentes	10
2.5.1 <i>Manejo del equipo de ultrasonido.</i>	10
2.5.2 <i>Componentes.</i>	10
2.5.3 <i>Módulo escáner trisónico (SCM).</i>	11
2.5.4 <i>Módulo de contacto o estetoscópio (STM).</i>	11

2.5.5	<i>Módulo de largo alcance (LRM).</i>	11
2.5.6	<i>Transductor de montaje magnético (RMT).</i>	12
2.5.6.1	<i>Audífonos</i>	12
2.5.6.2	<i>Batería.</i>	12
2.5.6.3	<i>Cargador.</i>	12
2.5.6.4	<i>Estación de carga.</i>	13
2.5.7	<i>Funcionamiento del equipo de ultrasonido</i>	13
2.5.7.1	<i>Características del equipo.</i>	13
2.5.7.2	<i>Datos técnicos del UltraPROBE 15000.</i>	14
2.5.8	<i>Visualización de la información.</i>	15
2.6	<i>Determinación de patrones de sonido mediante inspección por ultrasonido pasivo</i>	15
2.6.1	<i>Aplicaciones del UltraPROBE 15000 touch:</i>	15
2.7	<i>Fallas potenciales en válvulas de presión.</i>	16
2.7.1	<i>Corrosión atmosférica.</i>	16
2.7.2	<i>Factores que influyen en la corrosión atmosférica.</i>	16
2.7.3	<i>Corrosión localizada.</i>	16
2.7.4	<i>Corrosión por fatiga.</i>	17
2.7.5	<i>Cavitación.</i>	17
2.8	<i>Clasificación de válvulas</i>	17
2.8.1	<i>Tipos de válvulas</i>	17
2.8.1.1	<i>Válvulas de compuerta.</i>	17
2.8.1.2	<i>Válvula de bola.</i>	18
2.8.1.3	<i>Válvula macho.</i>	18
2.8.1.4	<i>Válvulas de globo o asiento</i>	19
2.8.1.5	<i>Válvulas de diafragma.</i>	19
2.8.1.6	<i>Válvula de tapón.</i>	20
2.8.1.7	<i>Válvulas de mariposa.</i>	20
2.8.1.8	<i>Válvula de retención (Check).</i>	21
2.9	<i>Procedimiento de inspección por ultrasonido</i>	21
3.	ACTUALIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE AIRE COMPRIMIDO.	23
3.1	<i>Análisis del estado inicial del banco de pruebas de aire comprimido</i>	23
3.2	<i>Estudio de necesidades</i>	24
3.3	<i>Selección de elementos</i>	25
3.3.1	<i>Selección de pistón neumático</i>	25
3.3.2	<i>Carga crítica de pandeo del vástago.</i>	26
3.3.2.1	<i>Longitud efectiva en condiciones extremas.</i>	28
3.3.3	<i>Presión de trabajo del pistón neumático</i>	30
3.4	<i>Selección del diámetro de la tubería</i>	31
3.4.1	<i>Pérdidas en la tubería principal.</i>	31
3.4.2	<i>Consumo de aire.</i>	31
3.4.2.1	<i>Velocidad del aire en la tubería</i>	33
3.4.2.2	<i>Número de Reynolds</i>	34
3.4.2.3	<i>Rugosidad relativa (ϵ).</i>	35
3.4.2.4	<i>Coefficiente de fricción (λ).</i>	35

3.4.3	<i>Pérdida de la carga de la línea principal.....</i>	36
3.4.3.1	<i>Pérdidas por tuberías.</i>	36
3.4.3.2	<i>Pérdidas por accesorios.</i>	37
3.4.4	<i>Pérdidas de la carga de la línea secundaria.....</i>	39
3.4.4.1	<i>Consumo de aire por fugas.....</i>	39
3.4.4.2	<i>Velocidad del consumo de aire por fugas.....</i>	40
3.4.4.3	<i>Número de Reynolds de la línea secundaria.....</i>	40
3.4.4.4	<i>Rugosidad relativa de la línea secundaria.</i>	41
3.4.4.5	<i>Coefficiente de fricción de la línea secundaria.</i>	42
3.4.5	<i>Pérdida de la presión de la tubería secundaria.</i>	42
3.4.5.1	<i>Pérdidas por tuberías.</i>	42
3.4.5.2	<i>Pérdidas por accesorios.....</i>	43
3.5	<i>Criterios de selección para el banco de pruebas.....</i>	44
3.5.1	<i>Válvula de bola.....</i>	44
3.5.2	<i>Flujómetro o caudalímetro.</i>	44
3.5.3	<i>Tee, neplo, corrido, codo de 90° de hierro galvanizado de 1/2.....</i>	45
3.5.4	<i>Manguera de poliuretano.</i>	45
3.5.5	<i>Juego de acoples rápidos macho y hembra.....</i>	46
3.6	<i>Actualización del banco de pruebas.....</i>	46
3.7	<i>Verificación del sistema.....</i>	49
4.	METODOLOGÍA DE LA TÉCNICA DE INSPECCIÓN.....	50
4.1	<i>Técnica de inspección.</i>	50
4.2	<i>Análisis de pruebas.</i>	50
4.2.1	<i>Descripción de procedimiento.....</i>	50
4.2.2	<i>Medición de pérdidas de presión.....</i>	52
4.3	<i>Determinación de puntos de inspección en el sistema.....</i>	54
4.3.1	<i>Marcado y ubicación de los puntos de inspección.</i>	54
4.3.2	<i>Ajuste del equipo de ultrasonido.....</i>	54
4.3.3	<i>Verificación.....</i>	55
4.3.4	<i>Toma de datos.....</i>	55
4.4	<i>Puntos de fuga de 1,0 mm.....</i>	55
4.5	<i>Puntos de fuga de 2 mm.....</i>	57
4.6	<i>Punto de fuga de 3,0 mm.....</i>	59
4.7	<i>Plan de mantenimiento del módulo de pruebas.</i>	61
4.7.1	<i>Tareas de mantenimiento del compresor.....</i>	61
4.7.2	<i>Tareas de mantenimiento del cilindro neumático.....</i>	62
4.7.3	<i>Tareas de mantenimiento de la válvula de accionamiento manual.....</i>	62
5.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	63
5.1	<i>Análisis de los espectros del ultrasonido pasivo.....</i>	63
5.2	<i>Caudal de aire en cada una de las fugas.....</i>	66
5.3	<i>Espectros de ultrasonido.</i>	69
5.4	<i>Amplitud de ondas de ultrasonido.....</i>	72
5.5	<i>Eficiencia energética en los puntos de fuga en el sistema.</i>	75
5.6	<i>Pérdidas económicas por fugas de aire.....</i>	76
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77

6.1	Conclusiones	77
6.2	Recomendaciones	77

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

Pág.

1	Equipos del banco de pruebas	23
2	Materiales para el banco de pruebas	24
3	Parámetros de selección del pistón neumático	26
4	Velocidades de la tubería.....	34
5	Accesorios tubería de 1/2"	37
6	Factor k de los accesorios de la tubería secundaria	43
7	Características del flujómetro	45
8	Características el hierro galvanizado	45
9	Presiones en sistema abierto	52
10	Mediciones a 1,0 mm.....	53
11	Mediciones a 2,0 mm.....	53
12	Mediciones a 3.0 mm.....	53
13	Presiones totales	54
14	Tareas de mantenimiento del compresor	61
15	Tareas de mantenimiento del cilindro neumático	62
16	Tareas de mantenimiento de la válvula de accionamiento manual	62
17	Volumen de aire.....	66
18	Diámetro de orificio-volumen de aire	67
19	Espectro de ultrasonido	69
20	Frecuencias-diámetro de fugas	70
21	Amplitud de onda	72
22	Fugas-amplitud de onda.....	73
23	Pérdidas anuales por fugas	75
24	Pérdidas económicas.....	76

LISTA DE GRÁFICOS

Pág.

1.	Teoría básica del ultrasonido-----	4
2.	Tipos de sonidos -----	6
3.	Generación de ondas ultrasónicas -----	7
4.	Módulo escáner trisónico (SMC)-----	11
5.	Módulo de contacto o estetoscópio -----	11
6.	Módulo de largo alcance (RLM) -----	12
7.	Transductor de montaje magnético (RMT) -----	12
8.	Kit UltraPROBE 15000-----	14
9.	Válvula de compuerta -----	18
10.	Válvula de bola-----	18
11.	Válvula de globo-----	19
12.	Válvula de diafragma -----	19
13.	Válvula de tapón -----	20
14.	Válvula de mariposa-----	20
15.	Válvula de retención -----	21
16.	Estado inicial del módulo de pruebas -----	46
17.	Reducción de longitud en la tubería principal -----	46
18.	Aislamiento de las dos líneas de aire -----	47
19.	Instalación de la segunda fase-----	47
20.	Adaptación de acoples rápidos, válvulas, rotámetro-----	48
21.	Finalización de la segunda fase del banco de pruebas-----	48
22.	Puntos de inspección -----	50
23.	Manómetro a 6 bares -----	51
24.	Toma del Punto A con 1,0 mm -----	55
25.	Toma del Punto B con 1,0 mm -----	56
26.	Toma del Punto C con 1,0 mm -----	56
27.	Toma del Punto D con 1,0 mm -----	57
28.	Toma del Punto A con 2,0 mm -----	57
29.	Toma del Punto B con 2,0 mm -----	58
30.	Toma del Punto C con 2,0 mm -----	58
31.	Toma del Punto D con 2,0 mm -----	59
32.	Toma del Punto A con 3,0 mm -----	59
33.	Toma del Punto B con 3,0 mm -----	60
34.	Toma del Punto C con 3,0 mm -----	60
35.	Toma del Punto D con 3,0 mm -----	61
36.	Falla a 1,0 mm-----	63
37.	Falla a 2,0 mm-----	64
38.	Falla a 3,0 mm-----	65
39.	Volumen de aire-----	66
40.	Espectros de ultrasonidos-----	69
41.	Fugas vs Amplitudes de onda-----	72
42.	Pérdidas por fugas de aire -----	76

SIMBOLOGÍA

f	Frecuencia
dB	Decibeles
t	Tiempo
T	Periodo
V	Voltaje
P	Potencia

LISTA DE ANEXOS

- A** Ábaco de selección del diámetro del cilindro y vástago.
- B** Rugosidad absoluta de materiales.
- C** Diagrama de Moody.
- D** Coeficiente de resistencia k para válvulas.
- E** Coeficiente de resistencia k para accesorios.
- F** Ficha técnica del rotámetro.
- G** Pérdidas debido a fugas con presión de trabajo de 6 bares.

RESUMEN

El presente trabajo describe la comparación entre las válvulas en buen estado y otras que se encuentren en condiciones inadecuadas. Para realizar este análisis se construyó un módulo de pruebas en el cual se utilizó una válvula con diferentes diámetros de fuga y así ejecutar la simulación de una falla interna en el sistema. Se ejecutó la detección de fugas internas en sistema de aire comprimido mediante la técnica predictivo del ultrasonido pasivo el cual nos ayuda determinar los ultrasonidos que generan estos elementos. Se utilizó el método de inspección ABCD que consiste en medir dos lectoras aguas abajo denominadas A y B, y dos lecturas aguas arriba denominada C y D. Con el equipo de ultrasonido pasivo se realizó las inspecciones de cada punto de fuga y utilizando el software spectralyzer analizamos los espectros de cada punto de falla, parámetros como frecuencia, amplitud varía con cada diámetro de fuga. También se obtuvo el sonido característico de una fuga que es importante conocer al momento de realizar la inspección y no confundirnos. Para calcular la presión que se derrocha en el sistema se utilizó un manómetro y un pistón neumático el cual al bajar su vástago golpea una balanza digital y se mide cuál es la fuerza que nos marca el pistón neumático con cada diámetro de fuga. Se concluye que, mediante el análisis de los datos obtenidos, la técnica de ultrasonido pasivo es más efectiva en la detección de fallas internas en válvulas, esto nos permite tomar medidas preventivas inmediatamente.

PALABRAS CLAVES: <ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END) >, < ESPECTRALYZER (SOFTWARE)>, <MÓDULO ESCÁNER TRISONICO (SCM) >, < ANÁLISIS DE ESPECTROS >, < TÉCNICA DE INSPECCIÓN >, <ADQUISICIÓN DE DATOS>, <ACTUALIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS>, < EFICIENCIA ENERGÉTICA >, < MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS >

ABSTRACT

This is a comparative study of valves in good condition and valves in bad condition. A test bench was built for the analysis using a valve of several leak diameters so as to simulate an internal in the system. Internal leaks were detected in the compressed air system using the predictive technique of the passive ultrasound to determine the leak ultrasounds. The ABCD method was used, which consisted of measuring two upstream readings called A and B and two downstream readings called C and D. Each leak point was inspected with the passive ultrasound equipment and the spectrum of each leak was analyzed using the spectralyzer software. The parameters such as frequency and amplitude change in each leak diameter. The leak noise was pinpointed, since it is pivotal to be able to hear it when inspecting. A pressure gauge and a pneumatic cylinder were used to calculate the pressure loss in the system. When the piston rod is lowered, it hits the digital weighing scale showing the pneumatic cylinder force in each diameter. We conclude that the passive ultrasound technique is the most efficient when detecting internal leaks in valves allowing us to take precautions.

KEYWORDS: < NON DESTRUCTIVE TESTING >, < SPECTRALYZER (SOFTWARE) >, < TRISONIC SCANNING MODULE (SCM) >, <SPECTRAL ANALYSIS>, < INSPECTION TECHNIQUE >, < DATA ACQUISITION >, < TEST BENCH UPDATA>, < ENERGY EFFICIENCY >, < METHOD OF LEAST SQUARES >

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

“La detección de ultrasonido pasivo es una técnica de diagnóstico condicional empleado dentro del mantenimiento industrial, donde el análisis estructura el estudio de las ondas sonoras de alta frecuencia que se producen en los equipos cuando algo anormal está sucediendo.” (OLARTE C, y otros, 2010)

“La señal ultrasónica se genera principalmente por la cavitación o turbulencia del fluido al atravesar un orificio y variar bruscamente su presión. Puesto que los humanos no podemos escuchar ese rango de altas frecuencias (>20 kHz), los instrumentos de inspección de ultrasonidos tiene la capacidad de transformar electrónicamente dichos sonidos al rango audible, de forma que puedan ser fácilmente analizados e interpretados por el inspector. El término en inglés para designar esta conversión se denomina heterodvinng.” (ABEJARO SOTO, 2014)

“Las válvulas son dispositivos mecánicos que controlan el flujo de presión en una tubería o entre componentes de una máquina.”| (INC. UE SYSTEMS, 2010)

“Las válvulas juegan un papel de mucha importancias en el buen funcionamiento de las diversas plantas industriales, su buen funcionamiento garantizan el correcto manejo de fluidos como vapor, agua, etc.” (GALARZA RIVERA, 2011)

“Dependiendo del régimen de funcionamiento y las condiciones de operación instalación, una válvula puede fallar de diversos modos: acumulación de suciedad o depósitos en obturador y asientos, ejes doblados o rotos, fugas en empaquetaduras, rotura de juntas, corrosión y erosión en cuerpo, fallos en dispositivos actuadores o de control, etc.” (ABEJARO SOTO, 2014)

1.2 Justificación

El mantenimiento predictivo tiene como objetivo detectar cualquier síntoma de anomalías mediante monitoreo condicional y evaluación de los equipos, máquinas y otros activos. Es por esto que esta técnica, con su evolución ha sido importante dentro del mantenimiento industrial.

La optimización dentro de un proceso industrial es de suma importancia, ya que una falla de un sistema, máquina, componente de elevada criticidad, tiene como consecuencia la disminución del proceso de producción, es ahí la estrategia y ventaja de aplicar mantenimiento predictivo.

El ultrasonido pasivo es una técnica que ha evolucionado favorablemente dentro de los sistemas a nivel industrial, entre varias técnicas esta la detección de las fallas en válvulas de presión de fluidos de forma rápida y confiable; permitiéndonos garantizar condiciones normales operativas de un sistema, máquina y/o componente. Todo ello con el objetivo de generar procesos y procedimientos de mantenimiento, reduciendo notablemente pérdidas económicas y evitando la contaminación.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Analizar y prevenir fallas en válvulas de presión mediante ultrasonido pasivo en el laboratorio de mantenimiento predictivo de la facultad de mecánica.

1.3.2 *Objetivos específicos.*

Recolectar información en el banco de pruebas sobre los diferentes puntos de fuga a diferentes diámetros.

Actualizar el banco de pruebas de aire comprimido tomando en consideración el estado inicial del mismo.

Determinar el funcionamiento del analizador de ultrasonido UltraPROBE 15000 y generar el reporte con ayuda de un software de diagnóstico predeterminado.

Analizar los datos obtenidos de las fallas en válvulas obtenidas en las fugas generadas.

Establecer las conclusiones y recomendaciones acorde con los resultados obtenidos dentro de la investigación.

CAPÍTULO II

2. MARCO CONTEXTUAL

2.1 Generalidades del mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo, es llamado también mantenimiento según la condición (MOC), debido a que da respuesta a la necesidad de disminuir los costos de mantenimiento generados por el mantenimiento correctivo y preventivo. La filosofía del mantenimiento parte del conocimiento del estado de los equipos. (FERNÁNDEZ CABANAS, y otros, 1998)

Es así que por un lado es posible, que se reemplacen los elementos cuando éstos no se encuentren en buenas condiciones operativas, eliminando de esta manera las paradas por inspecciones no programadas y, por otro lado, se evitará las averías imprevistas, mediante la detección de cualquier anomalía funcional y la monitorización o seguimiento de su evolución. (FERNÁNDEZ CABANAS, y otros, 1998)

Muchos de los componentes de las maquinas demuestran síntomas de su fallo antes de que el mismo llegue a ocurrir. Es por eso que mediante el seguimiento de los parámetros funcionales se llega a detectar de manera prematura el fallo de algún componente del equipo, con lo cual se asegura el funcionamiento correcto del mismo, al observar y predecir la vida residual de los componentes importantes de los equipos que conforman la industria. (FERNÁNDEZ CABANAS, y otros, 1998)

Todas estas técnicas encargadas de dar seguimiento a los parámetros característicos de las maquinas son llamadas Técnicas de verificación mecánica. (FERNÁNDEZ CABANAS, y otros, 1998)

El mantenimiento predictivo analiza las causas del modo de fallo y los efectos que ocasionan pérdidas económicas a la empresa. Utilizando tecnología de nueva generación para la detección prematura de dichas fallas, que generan paradas no programadas dentro del plan de mantenimiento.

2.2 Parámetros y técnicas del mantenimiento predictivo

Los parámetros de control del funcionamiento de la máquina, el tipo de inspección, la instrumentación necesaria, etc., dependerán fundamentalmente del equipo de producción y de su función. La extensión e intensidad de la aplicación del Mantenimiento Predictivo o Mantenimiento por Condición. (PAULLÁN GUARACA, y otros, 2013)

Los equipos a los que actualmente se les pueden aplicar distintas técnicas de control de estado comprobada eficacia son básicamente los siguientes:

- Máquinas rotativas
- Motores eléctricos
- Equipos estáticos
- Instrumentación.” (PAULLÁN GUARACA, y otros, 2013)

2.3 Teoría básica del ultrasonido

Se denomina ultrasonido pasivo a la tecnología que permite captar el ultrasonido producido por diferentes fuentes. El ultrasonido se emplea para detectar fallas, grietas, soldaduras deficientes, huecos, corrosiones, desgastes, anomalías, roturas en elementos, tales como: estructuras ejes, tuberías, válvulas, etc.” (INC. UE SYSTEMS, 2010)

Figura. 1 Teoría básica del ultrasonido



Fuente: <http://inacapmttoindustrial.blogspot.com/2011/05/tipos-de-pruebas-no-destructivas.html>

2.3.1 *Sonido.* Es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico. Este tipo de ondas pueden estimular el oído humano y generar una sensación sonora. (CUAUTITLÁN, 2010)

2.3.2 *Método de ultrasonido.* El método del ultrasonido en la ingeniería es utilizado para el ensayo de los materiales, es una técnica de ensayo no destructivo que tiene diversas aplicaciones, en especial para conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras.

Al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior de la pieza y que depende de las discontinuidades del material examinado. (CUAUTITLÁN, 2010)

El equipamiento utilizado para la aplicación de este tipo de técnicas es capaz de generar, emitir y captar haces de ondas muy bien definidas, al encontrar en su trayectoria un cambio en las propiedades físicas del medio en las que se propagan es decir discontinuidades internas, superficiales y sub-superficiales. (CUAUTITLÁN, 2010)

2.3.3 *Aplicación Industrial.* “El ultrasonido es una técnica versátil, es capaz de detectar defectos superficiales y sub superficiales en diversos productos tanto metálicos como no metálicos como pueden ser: aceros, fundiciones, tuberías, válvulas, cerámicas, compuestos, etc.” (OLARTE C, y otros, 2011)

2.3.4 *Naturaleza de las ondas ultrasónicas.* Los ultrasonidos son ondas del mismo tipo que los sonidos audibles, estas se van a diferenciar en su frecuencia de operación así como en la forma en la que se propagan. (GÓMEZ DE LEÓN, 2006)

Dicho de otra forma, los ultrasonidos van a operar con frecuencias ubicadas por encima de la zona audible del espectro acústico.

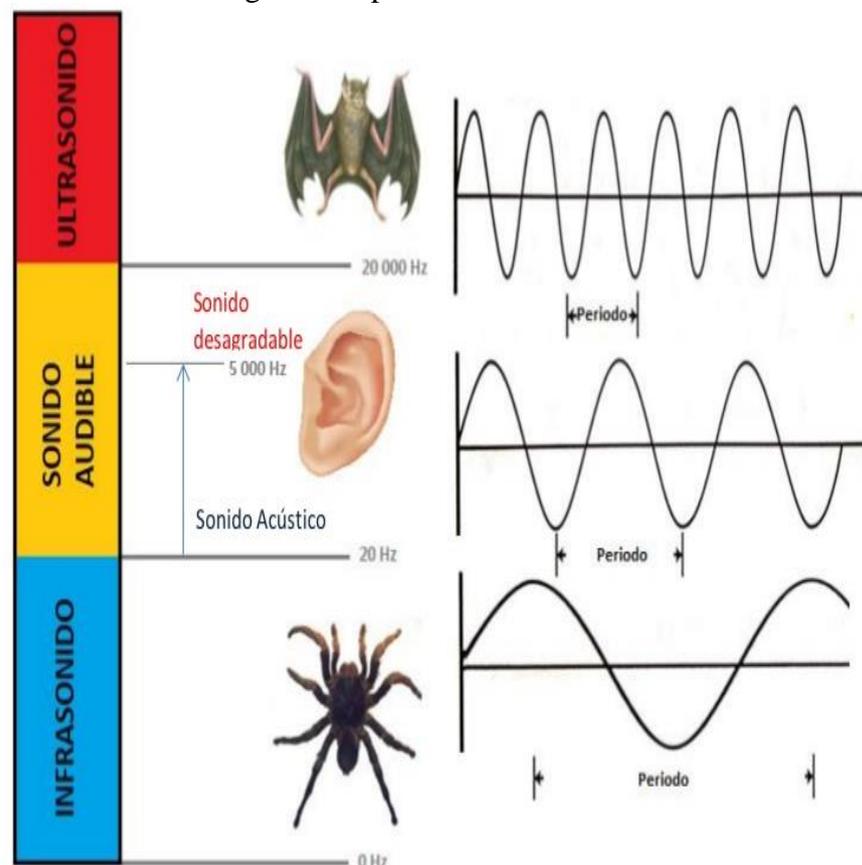
2.3.4.1 *Infrasónica o sonidos no audibles por el oído humano.* Son las frecuencias de oscilación menores a 16 Hz/s.

2.3.4.2 *Sónica o sonidos audibles.* Son las frecuencias de oscilación comprendida, entre 16 y 20.000 Hz/s.

Una onda acústica que se encuentra dentro de esta zona no puede ser audible ya que no tiene el mínimo de presión acústica que se necesita para que sea registrada por el oído humano, o también por llegar a sobrepasar la presión máxima soportable por el oído. Ya que la frecuencia máxima soportada es de 20 Hz.

2.3.4.3 *Ultrasónica.* Son frecuencias de oscilación superior a 20 kHz. (GÓMEZ DE LEÓN, 2006)

Figura. 2 Tipos de sonidos

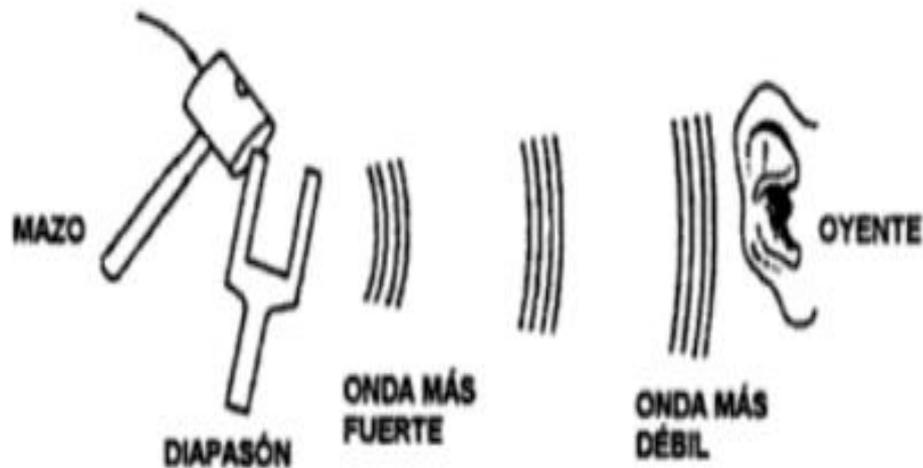


Fuente: <http://es.slideshare.net/carloscordova/presentacion-de-servicios-ascalon-mpd-soluciones-predictivas>

Las frecuencias más altas logradas hasta el momento son del orden de 1.000 MHz. Las frecuencias utilizadas en los ensayos para el control de heterogeneidades en ensayos de materiales metálicos se realizan con frecuencias generalmente comprendidas entre 1 y 25 MHz. (GÓMEZ DE LEÓN, 2006)

2.3.5 *Características ultrasónicas.* Las ondas ultrasónicas pueden propagarse dentro de todos los medios donde haya fracciones de materia, átomos o moléculas capaces de vibrar, por lo que su propagación podrá tener lugar en los gases, líquidos y sólidos. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

Figura. 3 Generación de ondas ultrasónicas



Fuente: (GÓMEZ DE LEÓN, 2006)

2.3.6 *Tipos de ondas ultrasónicas*

2.3.6.1 *Ondas longitudinales.* Es la onda de verdadera carácter audible, en ella las oscilaciones tienen lugar en la dirección de propagación de la onda, debido a que están activas en ellas fuerzas de compresión y dilatación. Se denominan también “Ondas de presión o compresión” y, debido también a que su densidad de partículas fluctúa, se les ha dado el nombre de ondas de densidad. Y transmite el sonido a través de los cuerpos sólidos y líquidos. (CUAUTILÁN, 2010)

2.3.6.2 *Ondas transversales.* Si el medio es capaz de transmitir esfuerzos de cizalladura, lo que ocurre en la mayoría de los cuerpos sólidos, las partículas pueden oscilar también en dirección transversal a la de propagación de la onda, originándose así las ondas transversales. (CUAUTILÁN, 2010)

2.3.6.3 *Ondas de superficie.* Son llamadas también de Rayleigh y se propagan solamente la periferia plana o curva de un sólido semi-infinito, siguiendo las irregularidades de la superficie o contorno del mismo. (CUAUTILÁN, 2010)

2.3.6.4 *Ondas de Lamb*. Son ondas que se propagan con un movimiento de partícula en forma de elipse y transmisión de onda guiada. El sonido se transmite en sólidos más no en líquidos y gases. (CUAUTITLÁN, 2010)

2.4 Producción y transmisión de las ondas sonoras

“Cuando un medio elástico es perturbado por una acción instantánea o continua, hace que esta perturbación se propague a través del referido medio, mediante lo que se llama movimiento ondulatorio u onda. Esta propagación no supone traslación real de la materia, sino transmisión de energía. (CUAUTITLÁN, 2010)

2.4.1 *Comportamiento de las ondas ultrasónicas*. En si las ondas ultrasónicas consisten en vibraciones oscilatorias tanto de partículas atómicas como de las moléculas de una sustancia. Dichas ondas de ultrasonido llegan a comportarse como ondas de sonido audible. (CUAUTITLÁN, 2010)

2.4.1.1 *Velocidad acústica*. Es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada. Es una característica del material y es una constante para un material dado, y para una frecuencia y longitud de onda cualquiera. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.2 *Presión acústica*. La presión acústica o alterna tiene lugar en los sólidos, líquidos y gases, se la puede definir como la diferencia de presiones altas y bajas que se presentan en un punto determinado y bajo una secuencia periódica determinada. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.3 *Impedancia acústica*. Es la relación entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración. Cuando una onda ultrasónica, viaja a través del material o del medio, este llega a un límite y a un segundo medio, parte de la energía continua a través del segundo medio el resto es reflejado al primer medio. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.4 *Energía acústica*. Es la energía que se transmite a través de las ondas sonoras en un medio a la velocidad de onda, donde parte de esta energía se disipa al medio en forma de energía térmica. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.5 *Intensidad acústica.* Es la cantidad de energía que pasa por unidad de áreas en la unidad de tiempo y viene dada por el producto de la energía acústica y la velocidad acústica. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.6 *Longitud de Onda.* Es la distancia en tres dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. Es inversamente proporcional a la frecuencia. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.7 *Amplitud de la oscilación.* Es el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.8 *Amplitud de la oscilación.* Es el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.1.9 *Frecuencia.* Es el número de oscilaciones de una partícula dada por segundo. La frecuencia, dentro de una misma onda, es la misma para todas, las partículas y es igual a la frecuencia del generador, la cual se puede elegir arbitrariamente (RUIZ RUBIO, y otros, 1987).

2.4.1.10 *Frecuencia.* Es el número de oscilaciones de una partícula dada por segundo. (RUIZ RUBIO, y otros, 1987)

2.4.2 *Característica del haz ultrasónico.* En algunos aspectos, un haz ultrasónico es similar a un haz de luz, ambos son ondas y obedecen a la ecuación general de onda. Cada onda viaja con características deferentes las cuales dependen del medio por el cual estas se propaguen y no de las características de la onda. (CUAUTITLÁN, 2010)

2.4.3 *Métodos y técnicas de inspección ultrasónica.* Los métodos más importantes y utilizados para la inspección por ultrasonido son el método de transmisión y el método de eco-pulsado. La diferencia principal entre estos dos métodos es que el método de transmisión involucra solo la medición de la atenuación de la señal, mientras que el método de eco pulsado puede ser utilizado para medir el tiempo de tránsito y la atenuación o disminución de la señal. (CUAUTITLÁN, 2010)

2.5 Técnica de manejo del equipo de ultrasonido pasivo y sus componentes

El ultrasonido es una técnica nueva que se ha incorporado en la industria con equipos de inspección, el principio del equipo es obtener el sonido que es imperceptible para el oído humano. Transformándolo a un sonido audible ya que mantiene la representación del sonido, es decir que conserve que un rodamiento tenga el sonido de un rodamiento, una fuga tenga el sonido de una fuga, etc. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.1 *Manejo del equipo de ultrasonido.* “El UltraPROBE 15000 es un instrumento versátil con muchas características que hace que la inspección sea fácil, rápida y precisa. Es muy simple de usar como una herramienta de inspección sencilla, ya que este instrumento tiene funciones que una vez que hayan sido entendidas, lo llevaran a una inspección precisa y el análisis de datos efectiva con un margen de error aceptable. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.2 *Componentes.* El UltraPROBE 15000 consta de los siguientes componentes:

- Módulo escáner trisónico (SCM)
- Módulo de contacto (estetoscopio)
- Módulo de largo alcance
- Varilla de extensión (STM)
- Transductor de montura magnética
- Batería y centro de carga
- Cargador de batería
- Audífonos
- Generador de tonos (WTG-1) (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.3 *Módulo escáner trisónico (SCM)*. Este módulo se utiliza para captar los ultrasonidos que se transmiten por medio del aire, como los emitidos por las fugas de presión o vacío y las descargas eléctricas.” (INC. UE SYSTEMS, 2010)

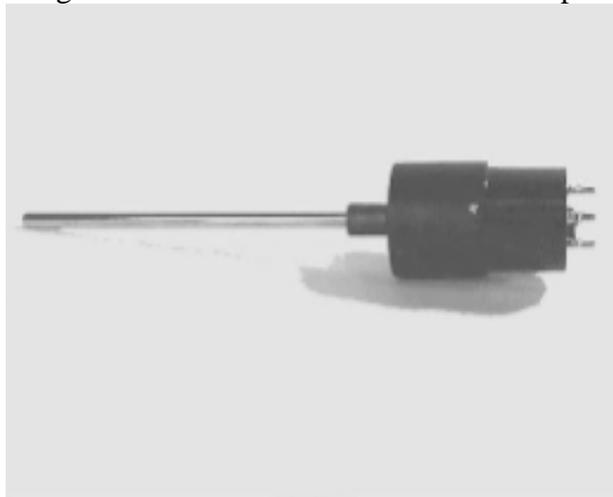
Figura. 4 Módulo escáner trisónico (SMC)



Fuente: ES-Manual-UP15000

2.5.4 *Módulo de contacto o estetoscopio (STM)*. Este módulo se utiliza para captar los ultrasonidos que se transmiten por medio del aire, como los emitidos por las fugas de presión o vacío y las descargas eléctricas. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

Figura. 5 Módulo de contacto o estetoscopio



Fuente: ES-Manual-UP15000

2.5.5 *Módulo de largo alcance (LRM)*. Este módulo de forma cónica permite el incremento de la distancia de detección de las emisiones ultrasónicas superior al módulo de escáner. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

Figura. 6 Módulo de largo alcance (RLM)



Fuente: ES-Manual-UP15000

2.5.6 *Transductor de montaje magnético (RMT).* El RMT es un módulo de contacto con montaje magnético que se comunica con el equipo por medio un cable. Este elemento se monta sobre la superficie metálica y da una señal al UltraPROBE. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

Figura. 7 Transductor de montaje magnético (RMT)



Fuente: ES-Manual-UP15000

2.5.6.1 *Audífonos.* Estos audífonos de alta resistencia están diseñados para bloquear sonidos intensos que se encuentran en entornos industriales para poder escuchar fácilmente los sonidos recibidos por el UltraPROBE. Es un hecho que los audífonos estándar proporcionan más de 23 dB en la atenuación de ruido. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.6.2 *Batería.* El UltraPROBE 15,000 usa baterías de iones de litio. Cargar completamente esta batería toma alrededor de 4 horas, sin embargo podrá cargar la unidad en cualquier momento, para intervalos cortos o por periodos más largos. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.6.3 *Cargador.* Este es el cargador de batería estándar para el UP15000 con una entrada de línea de 120VAC y 60Hz. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.6.4 *Estación de carga.* Esta estación permite la carga de las baterías de litio sin necesidad de conectar con el instrumento. Las baterías serán removidas y colocadas en la estación de carga para su recarga completa y poder realizar inspecciones con la batería adicional. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.7 *Funcionamiento del equipo de ultrasonido.* El funcionamiento de un detector ultrasónico es complejo pero entender cómo trabaja es simple. Las ondas de presión de alta frecuencia generan sonidos más allá que el que puede escuchar el oído humano, el detector transforma estas ondas de alta frecuencia en ondas de baja frecuencia para que sean escuchadas mediante los audífonos conectados al equipo. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

La calidad del sonido se mantiene durante esta transformación de manera que lo que escuchamos en el rango de baja frecuencia representa exactamente la fuente original del ultrasonido. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.5.7.1 *Características del equipo.* El equipo de ultrasonido cuenta con las siguientes características.

- Tecnología de pantalla táctil de fácil uso.
- Análisis espectral integrado en el equipo (FFT y serie de tiempo).
- Grabación de datos, sonidos e imágenes en tarjeta SD.
- Medición de temperatura con termómetro infrarrojo incorporado.
- Ajuste de emisividad incorporado.
- Cámara digital incorporada.
- Flash integrado.
- Múltiples pantallas de datos, [dB], temperatura, análisis espectral, etc.
- Puntero laser.
- Introducción de rutas de inspección.
- Software DMS ultratend y Spectralyzer incluido.
- Emisor de ultrasonidos.
- Prevee al usuario un aparato ergonómico y fácil de manipular

- Lo primero es obtener un sonido de rango que no es audible por el oído humano a un espectro de sonido que si lo es, y además que un rodamiento suene como tal.
- Todas las aplicaciones del ultrasonido en este equipo para realizar de manera eficiente las inspecciones. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

Figura. 8 Kit UltraPROBE 15000



Fuente: <http://www.uesystems.eu/wp-content/uploads/ES-Manual-UP15000.pdf>

2.5.7.2 *Datos técnicos del UltraPROBE 15000.* Entre los principales datos técnicos del UltraPROBE 15000 están.

- Temperatura IR: -20°C a 500°C.
- Cámara: 2.0 Mega Pixeles.
- Puntero Laser: Salida Europea solo <1mW- longitud de onda 640 nm – producto laser clase II.
- Puntero láser: Todos excepto salida europea <5mW – longitud de onda 640nm – producto laser 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 estetoscopio, 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: 1×10^{-2} std. cc/s to 1×10^{-3} 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, 2010).

2.5.8 *Visualización de la información.* La representación de los espectros en el instrumentos de medición puede ser desplegada en diferentes formas, pero hay que tener en cuenta que esto depende del tipo de transductor utilizado y de la tecnología del equipo de inspección. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.6 Determinación de patrones de sonido mediante inspección por ultrasonido pasivo

Ultrasonido ofrece una capacidad de diagnóstico predictivo. Cuando los cambios empiezan a ocurrir, en el rango de ultrasonido, todavía hay tiempo para planear su mantenimiento. En el área de detección de fugas, ultrasonido ofrece un método rápido y preciso para localizar fugas pequeñas y grandes.

Debido que el ultrasonido es una señal de onda corta, los elementos ultrasónicos de una fuga serán más fuertes y pueden ser localizados. En el entorno ruidoso de las fábricas, el ultrasonido es aún más útil. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.6.1 *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. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

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 (O₂, NO, etc.).” (INC. UE SYSTEMS, 2010)

2.7 Fallas potenciales en válvulas de presión.

“A diario las válvulas se encuentran en servicio, que están sometidas a diferentes fuerzas y ambientes agresivos que a medida del tiempo van reduciendo sus propiedades físicas y mecánicas.” (CABRERA, 2001)

2.7.1 *Corrosión atmosférica.* Este tipo de desgaste se produce por el ataque químico o electroquímico en la superficie del material, lo que ocasiona la pérdida del metal y sus características mecánicas.

2.7.2 *Factores que influyen en la corrosión atmosférica.*

- Presencia de oxígeno que cumple la función de agente oxidante en el proceso de corrosión.
- Contaminantes atmosféricos que están presentes en la atmósfera, incrementa la velocidad de corrosión, los principales contaminantes son: el cloruro de sodio, óxido de azufre y sílice. (CABRERA, 2001)

2.7.3 *Corrosión localizada.* Este tipo de corrosión se produce de una forma no uniforme, es decir a diferente velocidad en cada tramo de la superficie. Se manifiesta en unos puntos más que en otros. Las reacciones en la corrosión localizada son químicas y electroquímicas. En los casos de ataque localizado la cantidad de material afectado no

guarda relación con la magnitud de problemas que puede ocasionar. Aunque la cantidad afectada sea pequeña este tipo de corrosión resulta muy peligrosa. (CABRERA, 2001)

2.7.4 *Corrosión por fatiga.* La corrosión por fatiga es la disminución de la resistencia a la fatiga, por acción de un ambiente corrosivo. En un ambiente de este tipo, la resistencia a la fatiga por corrosión es mucho menor que el límite de la fatiga. (CABRERA, 2001)

2.7.5 *Cavitación.* Este tipo de desgaste se produce por el choque de burbujas de gas que se forman en regiones donde la presión local cae por debajo de la presión de flujo de vapor. Cuando las burbujas entra en una zona de alta presión colapsan en una superficie sólida continuamente, este colapso continuo de las burbujas causan un esfuerzo cíclico en la superficie. (PUENTES BARRERA, 2015)

2.8 Clasificación de válvulas

Hay un número de válvulas diferentes. Estos elementos mecánicos controlan flujo o presión en una tubería o entre componentes de un equipo. Válvulas automáticas operan por presión contra un resorte en la misma. (ROSALER, 1997)

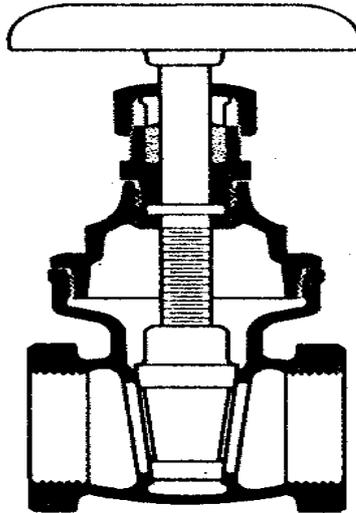
Válvulas mecánicas tienen partes móviles que abren y cierran o permiten operación intermitente con un dispositivo e tiempo, o proporciona una simple función de abierto o cerrado. El tipo de válvula depende de la función que va realizar dicho elemento.

- De cierre.
- Válvulas económicas.
- De estrangulación
- Para impedir el flujo inverso (de retención). (ROSALER, 1997)

2.8.1 *Tipos de válvulas*

2.8.1.1 *Válvulas de compuerta.* Son las más utilizadas, adecuadas para abrir o cerrar completamente la circulación de fluido. Es económica y puede operar por mucho tiempo sin problemas. Puede tolerar altas presiones. (ROSALER, 1997)

Figura. 9 Válvula de compuerta



5

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>

2.8.1.2 *Válvula de bola.* Las válvulas de bola son unas de las más utilizadas en la industria de procesos. Son excelentes como válvulas de bloqueo, aunque con configuraciones especiales se pueden utilizar a estas válvulas para regular flujos.” (ROSALER, 1997)

Figura. 10 Válvula de bola



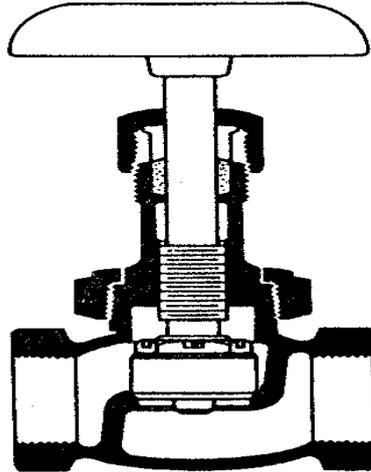
Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_industrial

2.8.1.3 *Válvula macho.* Estas válvulas son utilizadas comúnmente en el servicio de corte y estrangulación. (ROSALER, 1997)

Dado que el flujo es suave y sin interrupción, existe poca turbulencia dentro de ella y por tanto la caída de presión es pequeña.

2.8.1.4 *Válvulas de globo o asiento.* Son llamadas válvulas de globo por la forma esférica de su cuerpo. Actualmente su diseño ya no es tan esféricos, conservan el nombre por el tipo de mecanismo. Una de las características de estas válvulas es que incluye operación frecuente, estrangulamiento al grado deseado, para gases y aire, y alta resistencia. (ROSALER, 1997)

Figura. 11 Válvula de globo



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>

2.8.1.5 *Válvulas de diafragma.* Estas válvulas son utilizadas para el corte y para líquidos que contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión. En estas válvulas de diafragma se aísla el fluido de las partes del mecanismo de operación. Esto las hace adecuadas para los servicios corrosivos o viscosos, ya que evitan cualquier contaminación hacia o del exterior.” (ROSALER, 1997)

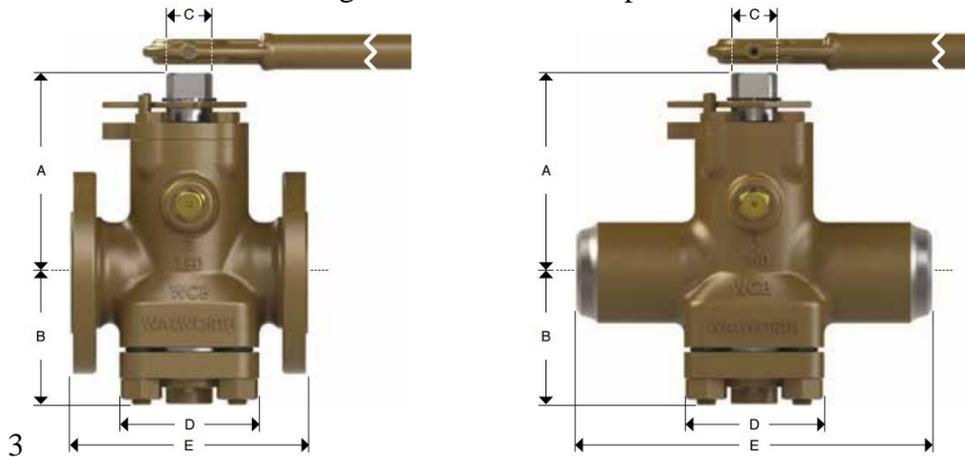
Figura. 12 Válvula de diafragma



Fuente: http://www.valvulasymedidores.com/valvulas_de_diafragma.html

2.8.1.6 *Válvula de tapón*. Este tipo de válvula es el más antigua y fueron utilizadas por los romanos, las válvulas de tapón se usan en cañerías de gas porque son suras en el cierre. Toleran altas presiones y presencia de arena, presentan gran torque por lo que es difícil de manejar. (ROSALER, 1997)

Figura. 13 Válvula de tapón



Fuente: http://www.cavinse.com/assets/catalogos/walworth/macho_acero.pdf

2.8.1.7 *Válvulas de mariposa*. Este tipo de válvulas es muy versátil. Tiene una gran capacidad de adaptación a las múltiples necesidades de la industria tamaño, presiones, temperaturas, conexiones etc. El funcionamiento de esta válvula es sencillo solo necesita una rotación del 90° del disco para abrirla. Las válvulas de mariposa están preparadas para conducir cualquier tipo de fluido, gas, líquido y hasta sólidos. (ROSALER, 1997)

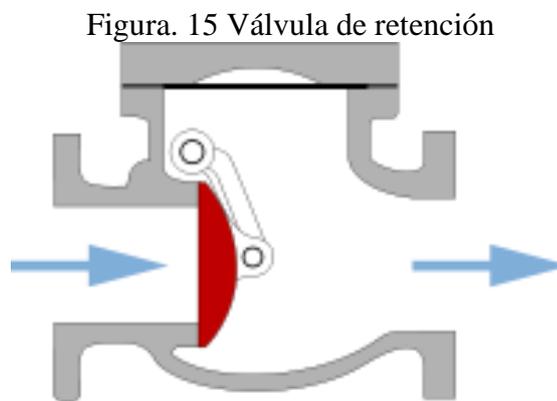
Figura. 14 Válvula de mariposa



Fuente: <http://galeon.com/elregante/valvulas.html>

2.8.1.8 *Válvula de retención (Check)*. Este tipo de válvula también se le conoce como válvula check, válvula de contraflujo, válvula de no retorno entre otros nombre. Tiene por objetivo cerrar completamente el paso del fluido en circulación en un sentido. (ROSALER, 1997)

La principal aplicación de la válvula de retención es en la descarga de bombas tiene como función prevenir que el flujo bombeado regrese una vez que la bomba se detiene, también evita que el flujo de retorno provoque un giro inverso de las bombas y ocasionen daños a los equipo. (ROSALER, 1997)



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_antirretorno

2.9 Procedimiento de inspección por ultrasonido

Escuche con el instrumento antes de tocar la superficie de prueba. Si el ruido de fondo es evidente intente lo siguiente.

- Use el módulo de escaneo (trisonico).
- Inicie con el selector de sensibilidad a 0 (máximo).
- Comience a escanear con el módulo
- Si detecta mucho ultrasonido en el área, reducir la sensibilidad y continuar con la inspección.
- Si es difícil aislar la fuga debido a los ultrasonidos que se encuentran en el entorno, coloque la sonda de hule sobre el módulo de escaneo y continúe en el área e inspección.
- Trate de escuchar un sonido de “escape” mientras observe el Módulo

- Siga el sonido donde es más fuerte. El equipo mostrará una lectura más alta cuando se aproxime a la fuga.
- Con el fin de centrarse en la fuga, reduzca la sensibilidad y mueva el instrumento más cerca del sitio donde se sospecha que la fuga se encuentre y esté en condición de confirmar la fuga. (INC. UE SYSTEMS, 2010)

CAPÍTULO III

3. ACTUALIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE AIRE COMPRIMIDO.

3.1 Análisis del estado inicial del banco de pruebas de aire comprimido

Para realizar la actualización del banco de pruebas se tomó en cuenta el estado inicial en el que se encontraba y realizar el respectivo análisis para su modificación.

Tales como reducción de dimensiones, ya que para la implementación de la segunda fase se requirió hacer dichos cambios.

Los mismos que no afectaron de ninguna manera el funcionamiento normal de la primera fase del sistema. Pudiéndose así continuar con la implementación.

El banco de pruebas de aire comprimido que será utilizado para la actualización cuenta con las siguientes características:

Tabla 1 Equipos del banco de pruebas

Equipos para el banco de pruebas	
Cantidad	Equipos
1	Cilindro de doble efecto con amortiguador de 1/2"
1	Compresor de 2 Hp
1	Válvula de accionamiento manual de 5/2 de 1/2"
4	Válvula de bola o esférica de 1/2"
1	Flujómetro o caudalímetro
1	Manómetro de 3/8"
1	Balanza digital.

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

También se tomó en cuenta los materiales utilizados anteriormente en el banco de pruebas, los mismos que podrían ser utilizados en la actualización.

Tabla 2 Materiales para el banco de pruebas

Materiales para el banco de pruebas	
Cantidad	Materiales
2,5 m	Tubería de hierro galvanizado de 1/2"
4	Tee de hierro galvanizado de 1/2"
4	Tapón hembra de PVC de 1/2"
2	Racor recto de 1/2" x 10mm
3 m	Tubo de poliuretano $\varnothing_{exterior} = 10mm$
2	Regulador de flujo tipo C de 3/8" x 10mm
1	Codo de hierro galvanizado de 1/2" x 90
2	Neplo corrido de hierro galvanizado de 1/2"
1	Universal de hierro galvanizado de 1/2"

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Una vez que se realizó la comprobación del estado inicial del equipo se tomó en consideración los cálculos realizados para la selección del pistón neumático, los cuales se los volverá a tomar en cuenta para la implementación de la segunda fase.

3.2 Estudio de necesidades

Por la necesidad de detectar fallas en válvulas se ha tomado en consideración realizar una actualización en el banco de pruebas de aire comprimido que inicialmente se lo ha venido usando para la detección de fallas en tuberías.

Con dicha modificación se busca realizar una mejora del banco de pruebas, así como también adaptarlo no sólo para el análisis de falla en tuberías sino también en fallas progresivas en válvulas.

Para lo cual se ha visto la necesidad de realizar los siguientes cambios.

- Reducción de las longitudes de la tubería principal de 25cm a 12cm de longitud.

- Adquisición e instalación de válvulas que permitirán el aislamiento de la tubería principal con la tubería secundaria, para evitar filtraciones del corriente de aire en las dos líneas.
- Instalación de uniones tipo T para el respectivo acoplamiento de la tubería secundaria.
- Adquisición e instalación de un rotámetro para determinar presiones dentro de la línea secundaria del módulo de pruebas.

3.3 Selección de elementos

Se requiere de un criterio técnico a la hora de seleccionar los elementos y accesorios necesarios en el banco de pruebas. Dichos elementos deben prestar facilidad de montaje y ergonomía a la hora de realizar la toma de datos.

3.3.1 *Selección de pistón neumático.* Se asume que la fuerza máxima 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 donde: (MADRID, y otros, 2015)

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

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

Donde:

$$F_{max.requerida} = F_1.$$

$\lambda =$ Factor de carga a velocidad normal.

$\mu =$ Rendimiento interno por rozamiento de juntas.

$F_T =$ Fuerza teorica del cilindro.

$F_2 = \text{Fuerza real del cilindro.}$

Datos:

$$F_{max.requerida} = F_1 = 200lb.$$

$$\lambda = 0,7.$$

$$\mu = 0,9.$$

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

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

$$F_T = 317.46 \text{ lbf } \text{ ó } 1412,13 \text{ N}$$

Los parámetros para a selección del vástago de cilindro serán encontrados al tomar la presión estándar en línea uso normal industrial de $P_{cilindro} = 6 \text{ bar}$ y $F_T = 1412,13 \text{ N}$ que fue calculado anteriormente con lo cual se obtiene los siguientes datos. Anexo A

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

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

Tabla 3 Parámetros de selección del pistón neumático

Parámetros de selección del pistón neumático			
Tipo de cilindro	P max. Trabajo	T máxima	T mínima
Doble efecto, amortiguador fijo	10 bar	80°C	20°C

Fuente: (PNEUMATIC, 2007)

3.3.2 *Carga critica de pandeo del vástago.* Los siguientes datos $F_r = 1412,13 \text{ N}$ y $\phi_{vastago} = 20mm$ cuyos datos se utilizan en la tabla del Anexo C, donde se encuentra la máxima carrera permitida antes de que inicie el pandeo del vástago donde:

$$L_{critica\ pando} = 0,80\ m$$

A continuación se calcula el radio de giro (r_{giro}), para realizar este cálculo primero encontraremos el área del vástago (A_v), y el movimiento de inercia (I),

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

Donde:

$A_v = \text{Área del vástago.}$

$\phi_v = \text{Diámetro del vástago.}$

$$A_v = \frac{\pi * (20mm)^2}{4}$$

$$A_v = 314,16\ mm^2 \quad \text{ó} \quad 0,00031416\ m^2$$

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

Donde:

$I = \text{Momento de inercia.}$

$\phi_v = \text{Diámetro del vástago.}$

$$I = \frac{\pi * (20mm)^4}{64}$$

$$I = 7853,98mm^4 \quad \text{ó} \quad 0,0000000785m^4$$

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

Donde:

$r_g =$ Radio de giro.

$I =$ Momento de inercia.

$A_v =$ Área de vástago.

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

$$r_g = 4,999 \text{ mm } \text{ ó } 0,00499 \text{ m}$$

3.3.2.1 *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).

$$l_e = 2 * l \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

$l_e =$ Longitud equivalente.

$l =$ Longitud efectiva en condiciones extremas.

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

$$l_e = 200\text{mm} \text{ ó } 0,20 \text{ m}$$

Para determinar la *relación de esbeltez*, se especificara las características del material del pistón, **acero** $E = 200000 \text{ N/mm}^2$ y $S_y = 345 \text{ N/mm}^2$

Donde:

$E =$ Módulo de elasticidad .

$S_y =$ Resistencia de fluencia.

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

Donde:

$l_e =$ Longitud equivalente.

$r_g =$ Radio de giro.

$E =$ Módulo de elasticidad.

$S_y =$ Resistencia de fluencia.

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * (200000 \text{ N/mm}^2)}{345 \text{ N/mm}^2}}$$

$$\tau_0 = 106,972$$

$$\tau = \frac{l_e}{r_g}$$

Donde:

$l_e =$ 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 Jhonson.

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \left[\frac{S_y^2}{4 * \pi^2 *} * \left(\frac{l_e}{r_g} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

$r_g =$ Radio de giro.

$l_e =$ Longitud equivalente.

$E =$ Módulo de elasticidad.

$S_y =$ Resistencia de fluencia.

$P_{cr} =$ Presión crítica.

$A =$ Área.

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

$$P_{cr} = 100807,8154 \text{ N} \quad \text{ó} \quad 10279,5364 \text{ kgf}$$

El vástago del cilindro llegará a pandearse siempre y cuando sobrepase una fuerza de **100807,8154 N ó 10279,5364 kgf** caso contrario mantendrá su posición original (recto).

3.3.3 *Presión de trabajo del pistón neumático.* Los cálculos para el pistón neumático se los realizará mediante cálculos preliminares de la presión de trabajo a la cual será sometida.

Así también se deberá encontrar tanto la velocidad de entrada como la de salida.

$$P_{cr} = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

P_{cr} = Presión de trabajo.

F = Fuerza teórica del cilindro.

A = Área del cilindro.

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

$$P_{cr} = 4,53\text{bar} \text{ ó } 453000 \text{ Pa}$$

3.4 Selección del diámetro de la tubería

Para la selección del diámetro de la válvula se ha tomado en consideración, que el porcentaje de pérdidas de presión no puede ser mayor al 10%. Por este motivo se podrá asumir que el diámetro de la tubería a usarse será de $\phi = 1/2 \text{ plg}$. Para determinar las pérdidas se ha tomado en consideración los valores obtenidos tanto pérdidas en la tubería como las pérdidas de los accesorios tanto en la tubería principal como en la tubería secundaria.

3.4.1 *Pérdidas en la tubería principal.* Las pérdidas de la tubería principal serán determinadas mediante los siguientes cálculos.

3.4.2 *Consumo de aire.* El consumo de aire se lo calculara de la siguiente forma:

Volumen de salida

$$V_S = \frac{\pi * \phi_c^2}{4} * \frac{(P_{tr}+1)}{P_{at}} * L_c * n \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

$V_S =$ Volumen de salida.

$\Phi_c =$ Diámetro del cilindro.

$P_{tr} =$ Presión de trabajo.

$P_{at} =$ Presión atmosférica. (Dato referencial de la ciudad de Riobamba)

$L_c =$ Longitud de carrera.

$$V_S = \frac{3.1416 * (6,3\text{cm})^2}{4} * \frac{(4,53 \text{ kgf/cm}^2 + 1)}{0,757 \text{ kgf/cm}^2} * 10 \text{ cm} * \frac{2}{60 \text{ seg}}$$

$$V_S = 0,000075 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{Ó} \quad V_S = 4,55 \text{ l/min.}$$

Volumen de entrada

$$V_e = \frac{\pi * (\Phi_c^2 - \Phi_v^2)}{4} * \frac{P_{tr} + 1}{P_{at}} * L_c * n \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

$V_S =$ Volumen de salida.

$\Phi_c =$ Diámetro del cilindro.

$\Phi_v =$ Diámetro del vástago.

$P_{tr} =$ Presión de trabajo.

$P_{at} =$ Presión atmosférica. (Dato referencial de la ciudad de Riobamba)

$L_c =$ Longitud de carrera.

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

$$V_e = 0,000068 \text{m}^3/\text{seg} \text{ Ó } V_e = 4,09 \text{l}/\text{min}$$

Volumen total

$$V_t = V_s + V_e \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

$V_t = \text{Volumen total.}$

$V_s = \text{Volumen e salida.}$

$V_e = \text{Volumen de entrada.}$

$$V_t = 0,000075 \text{m}^3/\text{s} + 0,000068 \text{m}^3/\text{seg}$$

$$V_t = 0,000143 \text{m}^3/\text{s} \text{ Ó } V_t = 8,58 \text{l}/\text{min}$$

3.4.2.1 *Velocidad del aire en la tubería.* Con el dato obtenido del volumen total de aire en el sistema se puede calcular la velocidad del aire en la tubería.

$$v = \frac{V_{total}}{A} \quad \text{Ecuación (14)}$$

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

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

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

Podemos observar que $v = 1,126 \text{ m/s}$ cuyo dato se encuentra en $v_{\text{máx}} = 5,00 \text{ m/s}$ y $v_{\text{mín}} = 0,30 \text{ m/s}$

Tabla 4 Velocidades de la tubería

Material de la tubería	Velocidad (m/s)	
	Máxima.	Mínima.
Concreto simple hasta 45 cm de diámetro.	3.00	0.30
Concreto reforzado de 60 cm de diámetro ó mayores.	3.50	0.30
Concreto pres forzados.	3.50	0.30
Acero con revestimiento.	5.00	0.30
Acero galvanizado.	5.00	0.30
Asbesto cemento.	5.00	0.30
Hierro fundido.	5.00	0.30
Hierro dúctil.	5.00	0.30
Polietileno de alta densidad.	5.00	0.30
PVC.	5.00	0.30

Fuente: Cálculo hidráulico de tuberías industriales, PDVS

3.4.2.2 *Número de Reynolds.* Con el cálculo del número de Reynolds (Re), se determina si el fluido es laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho * v * \phi_{tub}}{\mu_{aire}} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

$Re =$ Número de Reynolds.

$\rho =$ Densidad del aire.

$v =$ Velocidad del aire en la tubería.

$\phi_{tub} =$ Diámetro de la tubería.

$\mu_{aire} =$ Coeficiente de rozamiento de la tubería.

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

$$Re = 958,76$$

$Re < 2000 \approx$ Régimen laminar

3.4.2.3 *Rugosidad relativa* (ε). Para el cálculo de la rugosidad relativa (ε) se tomará la siguiente formula. Donde la rugosidad absoluta (k) será tomado del Anexo B cuyo valor oscila entre 0,06mm y 0,024mm para hierro galvanizado $k = 0,12\text{mm}$.

$$\varepsilon = \frac{k}{\phi} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde

$\varepsilon =$ Rugosidad relativa.

$k =$ Rugosidad absoluta.

$\phi =$ Diámetro de la tubería.

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

$$\varepsilon = 0,00944$$

3.4.2.4 *Coeficiente de fricción* (λ). El coeficiente fricción se lo calcula en vista que el régimen es laminar y se lo realiza con la siguiente fórmula

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde:

$\lambda =$ Coeficiente de fricción.

$Re =$ Número de Reynolds.

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

$$\lambda = 0,0668$$

Nota: El coeficiente de fricción también se lo puede obtener con los datos del número de Reynolds y la rugosidad relativa en el diagrama de Moody.

3.4.3 *Pérdida de la carga de la línea principal.* Para calcular la pérdida en la tubería principal se utilizará la ecuación con la que se llegara a comprobar si el diámetro de la tubería es menor al 10%, de no ser así se tomara una tubería de mayor diámetro.

$$H = H_{rL} + H_{ra} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

$H =$ Pérdidas totales de la tubería principal.

$H_{rL} =$ Pérdidas por tuberías.

$H_{ra} =$ Pérdidas por accesorios.

3.4.3.1 *Pérdidas por tuberías.* Las pérdidas por tuberías serán calculadas mediante la ecuación de Darcy. También se tomara en consideración que la $L_{Total} = 0,46m$

$$H_{rL} = \lambda * \frac{L_{Total}}{\phi} * \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

H_{rL} = Pérdida de energía debido a la fricción.

λ = Coeficiente de fricción.

L_{Total} = Longitud total de tubería.

ϕ = Diámetro de la tubería.

V = Velocidad del aire en la tubería.

$$H_{rL} = 0,0668 * \frac{0,46m}{0,0127m} * \frac{(1,126 m/s)^2}{2 (9,8 m/s^2)}$$

$$H_{rL} = 0,156m$$

3.4.3.2 *Pérdidas por accesorios.* Estas pérdidas se las determina tomando en cuenta el factor K de cada uno de los accesorios utilizados en la línea principal. Los valores del factor K serán tomados de los Anexo D y Anexo E.

El valor del factor K del rotámetro se lo calcula con la siguiente ecuación.

$$K = f \frac{L_{rot}}{D} \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$K = 0,0668 \left(\frac{9,4m}{1,27m} \right)$$

$$K = 0,494$$

Tabla 5 Accesorios tubería de 1/2"

Accesorio de la tubería	Cantidad	Factor K	Total Factor K
Unión T flujo recto	4	0,54	2,16
Válvula de bola	2	0,16	0,32
Codo de 90°	1	0,81	0,81
Unión universal	1	1	1
Rotámetro	1	0,49	0,49
ΣK			4,62

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

$$H_a = \frac{\sum K \cdot v^2}{2g} \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$H_a = \frac{4,62 * (1,126 \text{ m/s})^2}{2 (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$H_a = 0,2988\text{m}$$

$$H = H_{rL} + H_{ra}$$

$$H = 0,156\text{m} + 0,2988\text{m}$$

$$H = 0,4548\text{m}$$

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho} - H = \frac{P_2}{\lambda} \quad \text{Ecuación (22)}$$

$$\Delta P = \rho * H$$

Donde:

$\Delta P =$ Pérdida de cargas en líneas secundarias.

$\rho =$ Densidad del aire.

$$\Delta P = 1,18 \text{ kgf/m}^3 * 0,4548\text{m}$$

$$\Delta P = 0,5367 \text{ kgf/m}^2$$

$$\Delta P = 0,000526\text{bar} \text{ ó } 5,26 \text{ Pa}$$

Para verificar si se encuentra dentro del parámetro permitido de 10% realizamos los siguientes cálculos.

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

$$0,0000526 \text{ bar} \rightarrow x$$

$$x = \frac{0,0000526 \text{ bar} * 100\%}{4,53 \text{ bar}}$$

$$x = 0,00116\%$$

0,00116% < 10%; cumple con la condición

3.4.4 *Pérdidas de la carga de la línea secundaria.* Para calcular la pérdida de la carga de la línea secundaria se tomara en cuenta los siguientes aspectos.

3.4.4.1 *Consumo de aire por fugas.* La pérdida de volumen de aire y de consumo de potencia requerida en kW de las distintas fugas son obtenidas del Anexo G.

$$\phi_1 = 1,00\text{mm.}$$

$$v_{\phi_1} = 1,2 \text{ lt/s} \text{ ó } 0,0012 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{\phi_1} = 0,75\text{kW}$$

$$\phi_2 = 2,00\text{mm.}$$

$$v_{\phi_2} = 5,00 \text{ lt/s} \text{ ó } 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{\phi_2} = 1,34\text{kW}$$

$$\phi_3 = 3,00\text{mm.}$$

$$v_{\phi_3} = 11,1 \text{ lt/s} \text{ ó } 0,0111 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{\phi_3} = 3,10\text{kW}$$

3.4.4.2 *Velocidad del consumo de aire por fugas.* Para el cálculo de la velocidad de consumo de aire por fugas se toma en consideración la sumatoria de todas las velocidades de los diferentes diámetros de las fugas.

$$V_T = v_{\phi 1} + v_{\phi 2} + v_{\phi 3} \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$V_T = 0,0012 \text{ m}^3/\text{s} + 0,005 \text{ m}^3/\text{s} + 0,0111 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_T = 0,0173 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ó } 17300 \text{ cm}^3/\text{s} \text{ ó } 17,3 \text{ lt}/\text{s}$$

Procedemos a calcular la velocidad de consumo de aire con la siguiente formula.

$$v = \frac{V_T}{A} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

v = Velocidad de consumo de las 3 fugas.

V_T = Volumen total de las 3 fugas.

A = Área de la tubería.

$$v = \frac{0,0173 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * (0,0127\text{m})^2}$$

$$v = 34,14 \text{ m}/\text{s}$$

3.4.4.3 *Número de Reynolds de la línea secundaria.* Con los datos obtenidos podemos calcular el número de Reynolds con lo cual se determinará si el flujo es laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho * v * \phi}{\mu_{aire}} \quad \text{Ecuación (25)}$$

Donde:

$Re =$ Número de Reynolds.

$\rho =$ Densidad del aire.

$v =$ Velocidad del consumo de aire de las fugas.

$\phi =$ Diámetro de la tubería.

$\mu_{aire} =$ Coeficiente de rozamiento del aire.

$$Re = \frac{1,18 \frac{kg}{m^3} * 34,14 \frac{m}{s} * 0,0127m}{0,0000176 \frac{kg}{m * s}}$$

$$Re = 29069,43$$

$$Re = 2,906 * 10^4$$

$Re > 2000$; Régimen turbulento

3.4.4.4 *Rugosidad relativa de la línea secundaria.* La rugosidad (ε) se calculara tomando en cuenta el valor de la rugosidad absoluta (k) tomada del Anexo B.

$$\varepsilon = \frac{k}{\phi} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde:

$\varepsilon =$ Rugosidad relativa.

$k =$ Rugosidad absoluta.

$\phi =$ Diámetro de la tubería.

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

$$\varepsilon = 0,0070$$

3.4.4.5 *Coefficiente de fricción de la línea secundaria.* El coeficiente de fricción (λ) será encontrado en el diagrama de Moody, ya que es tenemos los datos del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad relativa (ε), Anexo C.

$$\lambda = 0,038$$

3.4.5 *Pérdida de la presión de la tubería secundaria.* Para realizar el cálculo de la pérdida de presión de la tubería secundaria se tomara en cuenta los siguientes datos.

Datos:

$$\phi_{tubería} = 1/2 \text{ plg } \text{ ó } 0,0127m.$$

$$L_{Tot2} = 1,32m \text{ (Donde se a tomado la longitud total de tubería secundaria).}$$

3.4.5.1 *Pérdidas por tuberías.* Las pérdidas por tuberías son calculadas al aplicar la ecuación de Darcy tomando en consideración la longitud total de la tubería de la línea secundaria.

$$H_{rL} = \lambda * \frac{L_{Total}}{\phi} * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación (27)}$$

Donde:

$$H_{rL} = \text{Pérdida de energía de la tubería secundaria.}$$

$$\lambda = \text{Coeficiente de fricción.}$$

$$L_{Total} = \text{Longitud total de la tubería.}$$

ϕ = Diámetro de de la tubería.

v^2 = Velocidad del consumo de aire.

$$H_{rL} = 0,038 * \frac{1,32m}{0,0127m} * \frac{(34,14 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$H_{rL} = 234,86m$$

3.4.5.2 *Pérdidas por accesorios.* Para las pérdidas por accesorios se ha tomado también el factor K de cada uno de los accesorios, dichos valores son obtenidos de los Anexo D y Anexo E.

Tabla 6 Factor K de los accesorios de la tubería secundaria

Accesorio de la tubería	Cantidad	Factor K	Total Factor K
Unión T flujo recto	2	0,54	1,08
Válvula de bola	2	0,08	0,16
Codo de 90°	6	0,81	4,86
Rotámetro	1	0,49	0,49
ΣK			6,59

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

$$H_a = \frac{\Sigma K * v^2}{2g} \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$H_a = \frac{6,59 * (34,14 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$H_a = 391,88m$$

$$H = H_{rL} + H_{ra}$$

$$H = 234,86m + 391,88m$$

$$H = 626,74m$$

Con la fórmula de Bernoulli podremos calcular las pérdidas totales de la carga en la línea secundaria.

$$\frac{P_1}{\rho} - H = \frac{P_2}{\lambda} \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$\Delta P = \rho * H$$

Donde:

$\Delta P =$ Pérdidas de cargas en líneas secundarias.

$\rho =$ Densidad del aire.

$$\Delta P = 1,18 \text{ kg/m}^3 * 626,74 \text{ m}$$

$$\Delta P = 739,56 \text{ kgf/m}^2$$

$$\Delta P = 0,0725 \text{ Bar} \text{ ó } 7253,53 \text{ Pa}$$

3.5 Criterios de selección para el banco de pruebas

Para la actualización de la segunda fase del módulo de pruebas se debe tomar en consideración los criterios de selección de los elementos y accesorios que serán utilizados en el mismo

3.5.1 *Válvula de bola.* El análisis en el módulo de pruebas se lo realizó con válvulas tipo bola, tomando en consideración las características, ventajas y desventajas detalladas en el capítulo anterior.

3.5.2 *Flujómetro o caudalímetro.* El Flujómetro utilizado para la implementación es de Gama de acrílico con las siguientes características:

Tabla 7 Características del Fluómetro

Modelo	Rango de Medición		Rosca	Exactitud
	Air °C	NL/min(Gas)		
DFG-6T	20	0.4 – 4	M18x1.5 G1/4" 1/4" BSP	±4%

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

3.5.3 *Tee, neplo, corrido, codo de 90° de hierro galvanizado de 1/2"*. El hierro galvanizado es el hierro que se recubre de una capa de cinc para evitar que se produzca la corrosión en el metal.

Tabla 8 Características el hierro galvanizado

Hierro galvanizado	
Características	Detalle
Características físicas	Resistente a la corrosión gracias a la capa de cinc. Tiene un color gris y es 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
Incompatibilidad	En ambientes ácidos la capa de cinc pierde su eficacia y se empieza a producir la corrosión del metal

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

3.5.4 *Manguera de poliuretano*. Manguera flexible de TPU (poliuretano PU), para el transporte de aire comprimido en la aplicación de automatización industrial, redes de aire en general.

Las características generales de las mangueras son las siguientes:

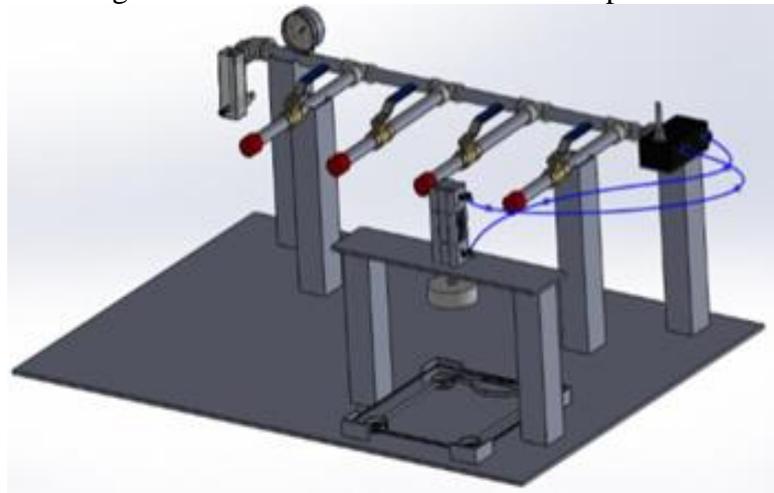
- Fácil manipulación
- Alta resistencia a productos químicos
- Buena flexibilidad
- Alta resistencia a temperaturas
- Uso industrial

3.5.5 *Juego de acoples rápidos macho y hembra.* El juego de acoples usados en el módulo de pruebas es de acero cromado de ¼ plg de diámetro tanto en los acoples machos y hembras.

3.6 Actualización del banco de pruebas

La implementación de la segunda fase del banco de pruebas se la realiza en el sistema de aire comprimido ya establecido, se realiza los cambios respectivos sin que ello afecte al normal funcionamiento del mismo.

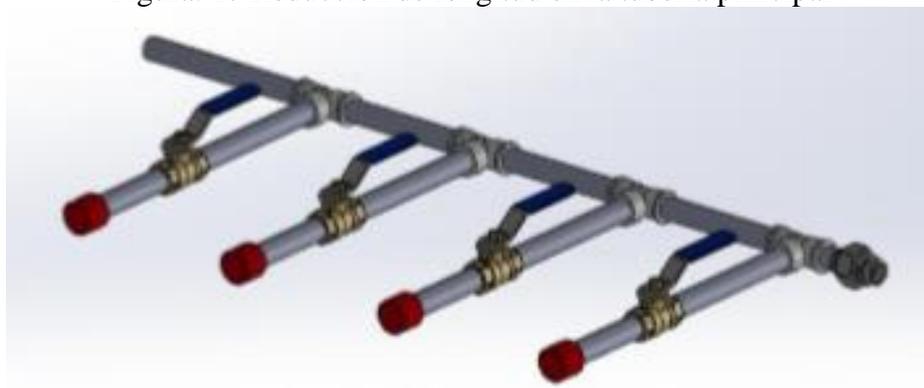
Figura. 16 Estado inicial del Módulo de pruebas



Fuente: (MADRID, y otros, 2015)

Comenzamos por reducir la longitud de los nepllos corridos de la tubería principal, los cuales contaban con una longitud de 20 cm por nepllos corridos de 10 cm de longitud en cada intersección de la tubería secundaria.

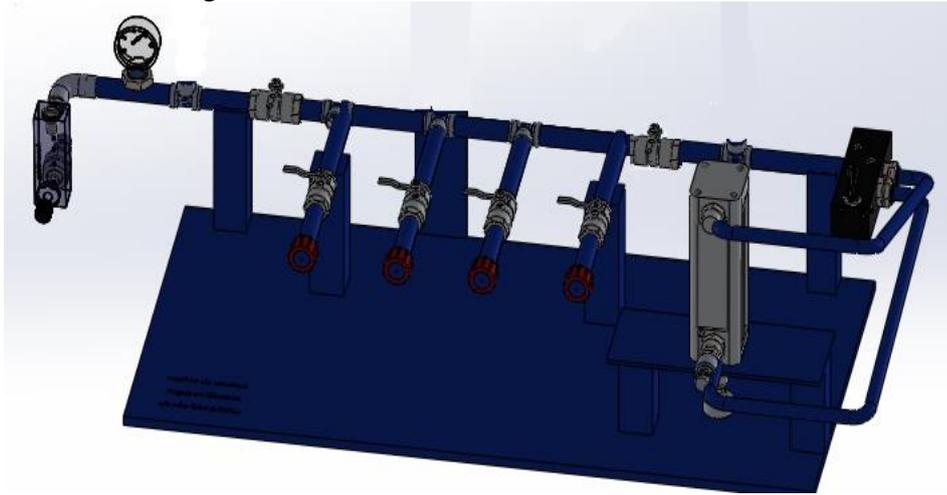
Figura. 17 Reducción de longitud en la tubería principal



Fuente: (MADRID, y otros, 2015)

Una vez realizada la reducción de las longitudes procedemos a realizar las diferentes conexiones de la nueva línea de aire del sistema, para lo cual se colocará dos válvulas globo unidas con neplós corridos de 5 cm de longitud a los extremos de la tubería principal. Con el fin de aislar dicha sección al paso de aire que afecte a la toma de datos posteriores.

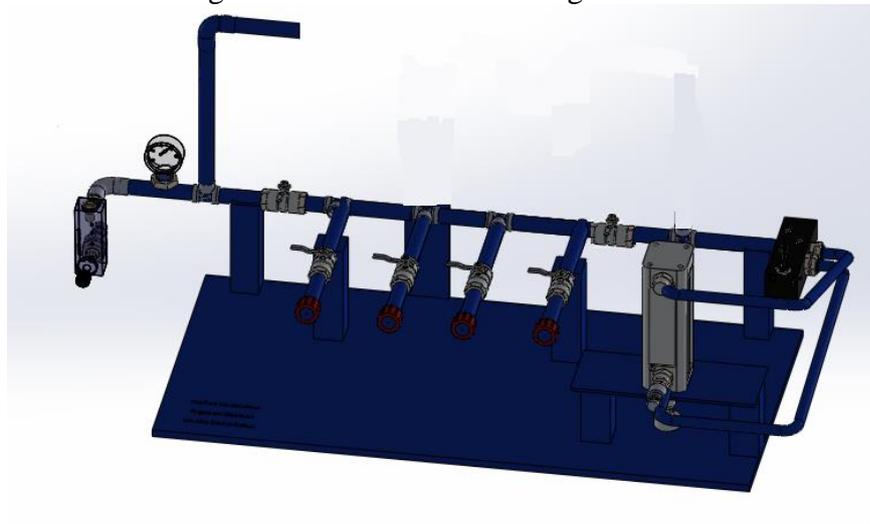
Figura. 18 Aislamiento de las dos líneas de aire



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Cuando se ha terminado el acople de las válvulas continuamos con la instalación de los accesorios como son Tee de hierro galvanizado, válvula globo que permite el paso y cierre de aire hacia la línea de inspección, y más elementos que son necesarios para la adaptación de la segunda fase.

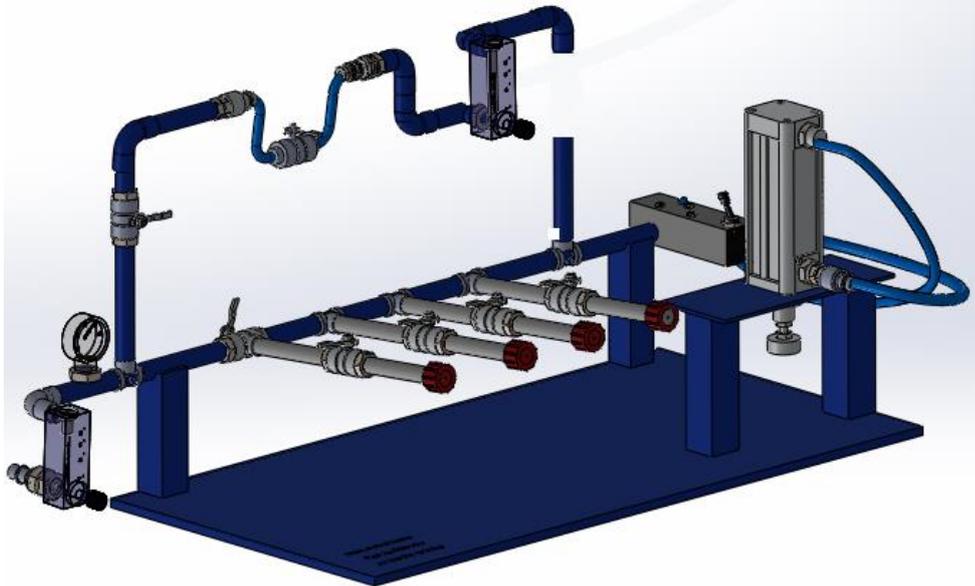
Figura. 19 Instalación de la segunda fase



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Continuamos con la instalación de acoples rápidos tipo hembra que nos permitirá la colocación de las válvulas objeto de nuestro estudio

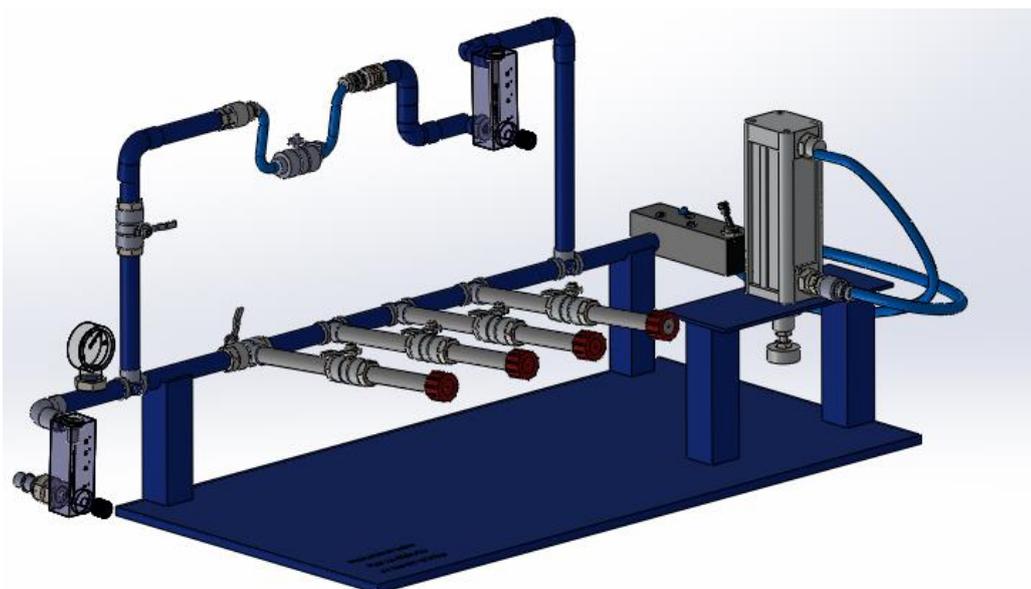
Figura. 20 Adaptación de acoples rápidos, válvulas, rotámetro



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Una vez realizada dichas conexiones finalizamos con el cierre del sistema mediante la instalación de una segunda Tee de hierro galvanizado concluyendo así con el cierre hermético del mismo.

Figura. 21 Finalización de la segunda fase del banco de pruebas



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

3.7 Verificación del sistema

En la verificación del sistema se comprobó la existencia de fugas de aire a lo largo de las dos secciones pudiendo encontrar varias fugas de aire en las uniones de válvulas y tees, para la cual se procedió a su desarmado y nueva colocación con la cantidad suficiente de teflón, de esta manera a la siguiente verificación se pudo observar la inexistencia de fugas manteniendo de esta manera el sistema en perfectas condiciones para la toma de datos.

CAPÍTULO IV

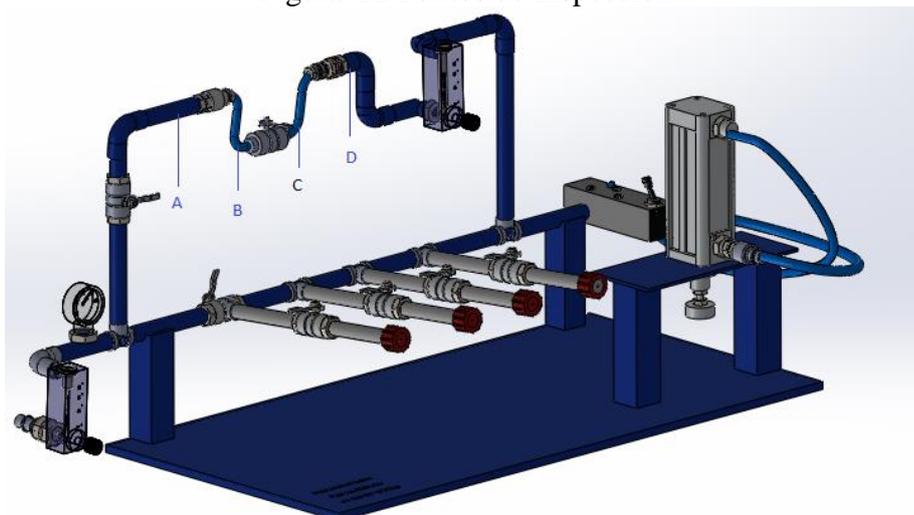
4. METODOLOGÍA DE LA TÉCNICA DE INSPECCIÓN.

4.1 Técnica de inspección.

Para el análisis de válvulas con ultrasonido tenemos que utilizar la técnica de ABCD, que consiste en tomar dos lecturas aguas debajo de la válvula denominada A y B, y dos lecturas aguas arriba denominadas C y D.

Cabe recalcar que las fugas internas en válvulas generan un flujo turbulento mediante el cambio de presión existente en el área de la fuga.

Figura. 22 Puntos de Inspección



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

4.2 Análisis de pruebas.

4.2.1 *Descripción de procedimiento.* Se realizó las pruebas en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el Laboratorio de Análisis de Vibraciones. En lo que respecta a materiales el módulo se diseñó con hierro galvanizado para toda la tubería y accesorios, para realizar este análisis se efectuó orificio en las válvulas de bola de 0mm, 1mm, 2mm, 3mm. Luego se procedió a realizar las pruebas pertinentes las cuales se hizo de la siguiente manera:

- Se verifica que todos los elementos del módulo estén en posición y las válvulas cerradas para realizar las mediciones.
- Se realizó cinco mediciones por cada punto de fuga para luego sacar una media y obtener un resultado más preciso.
- Se regula el sistema a una presión 6 bares para realizar las mediciones en cada fuga.

Figura. 23 Manómetro a 6 bares



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

- Con el equipo de ultrasonido pasivo se realizó un barrido completo en el sistema y no existieron fugas, al bajar el pistón la balanza midió una fuerza de 116,30kg en todas las pruebas, la frecuencia y decibeles indicó un valor de cero.
- Luego se insertó la válvula con una fuga de 1mm se observó en el flujómetro y marco un caudal de aire de 27,5l/min, descendió el pistón y se pudo establecer la fuerza, se procedió a medir con el equipo de ultrasonido pasivo las frecuencias y decibeles.
- Se realizó el mismo procedimiento en cada punto de fuga para obtener los valores.
- Una vez obtenido los valores de cada punto de fuga se procede a realizar los cálculos, en lo que corresponde a la presión con las fuerzas indicadas en la balanza, se calculó las cinco presiones en cada punto de fuga.
- Utilizamos el programa UE SPECTRALYZER en el cual se descargó las mediciones y se observó los espectros de cada punto de fuga inspeccionado con sus respectivos parámetros.

4.2.2 *Medición de pérdidas de presión.* Para obtener los datos de cada punto de fuga se realizó lo siguiente.

Con una presión constante en el sistema de 6 bares y una balanza digital, cuando descendió el vástago del pistón golpeando en la balanza y nos indica la fuerza con la que descendió el mismo.

Se realizó cinco mediciones para sacar una media y obtener un valor más exacto.

Tabla 9 Presiones en Sistema abierto

Sistema Abierto		
N° de Medición	Fuerza (kg)	fugas(mm)
1	116,7	0,00
2	116,3	0,00
3	116,3	0,00
4	116,0	0,00
5	116,0	0,00
TOTAL	116,26	0,00

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Se colocó un acrílico cilíndrico de diámetro 7,5 cm para que el golpe sea uniforme esto nos sirvió para calcular el área de impacto.

$$A = 2 * \pi * r * h$$

$$A = 2 * 3,1415 * 3,75cm * 3cm$$

$$A = 70,69cm^2$$

Con el área que se obtuvo procedemos a calcular la presión que existe en el sistema sin ninguna fuga.

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{116,26kg}{70,69cm^2}$$

$$P = 1,65 \text{ bar}$$

- Punto de fuga 1,0mm

Tabla 10 Mediciones a 1,0 mm

Fuga de 1,0 mm		
N° de Medición	Fuerza (kg)	Presión (Bar)
1	114,7	1,62
2	114,4	1,62
3	114,6	1,62
4	114,4	1,62
5	114,7	1,62
TOTAL	114,56	1,62

Fuente: Aucapiña V. Tierra I..

- Punto de fuga 2,0mm

Tabla 11 Mediciones a 2,0 mm

Fuga de 2,0 mm		
N° de Medición	Fuerza (kg)	Presión (Bar)
1	115,3	1,63
2	115,3	1,63
3	115,4	1,63
4	115,0	1,63
5	115,0	1,63
TOTAL	115,20	1,63

Fuente: Aucapiña V. Tierra I..

- Punto de fuga 3,0mm

Tabla 12 Mediciones a 3.0 mm

Fuga de 3,0 mm		
N° de Medición	Fuerza (kg)	Presión (Bar)
1	115,7	1,64
2	115,6	1,64
3	115,6	1,64
4	115,5	1,63
5	115,5	1,63
TOTAL	115,58	1,64

Fuente: Aucapiña V. Tierra I..

Con el área de impacto y la media que se obtuvo de las cinco mediciones de cada punto de fuga se obtiene los siguientes valores.

Tabla 13 Presiones totales

Presión	
Fugas(mm)	Presión(bar)
0,0	1,65
1,0	1,62
2,0	1,63
3,0	1,64

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

4.3 Determinación de puntos de inspección en el sistema.

4.3.1 *Marcado y ubicación de los puntos de inspección.* Para la determinación y ubicación de los puntos de inspección, se realizaron inspecciones visuales y se hizo un seguimiento cuidadoso de la línea principal.

Es importante tener en cuenta que los cambios de sección producen modificaciones en la velocidad de flujo, lo que genera un flujo laminar a turbulento y como consecuencia la velocidad de impacto de las partículas es mayor y aumenta la erosión.

Para la determinación de los puntos de inspección también se tomó en cuenta los elementos del sistema: codos, cambios de sección, válvulas.

Con estos criterios determinamos 5 puntos de inspección en el sistema.

4.3.2 *Ajuste del equipo de ultrasonido.* Se realizaron los siguientes pasos para la utilización del equipo de ultrasonido.

- Se enciende el instrumento.
- Se ubica el icono de ajustes (setup) en la pantalla principal.
- Se toca el icono para entrar en el modo de ajustes.
- Par seleccionar o cambiar los ajustes; se toca el cuadro de selección o el círculo en la pantalla. En nuestro caso se selecciona inspección de válvulas.
- Ajustar el tiempo de grabación. Utilizando las flechar selectoras.

- Sensibilidad default. El usuario podrá seleccionar la sensibilidad para el punto de prueba, en algunas ocasiones será alto en otras bajo para que la inspección sea correcta.

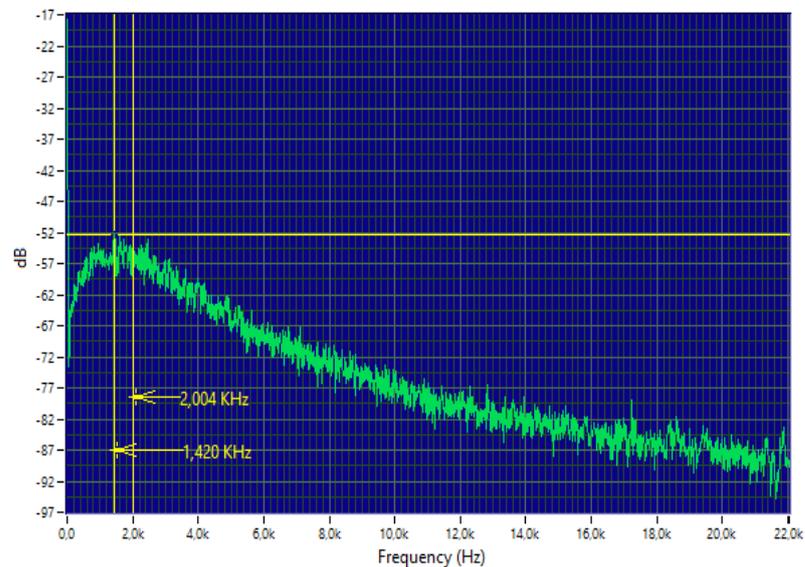
4.3.3 *Verificación.* Con el fin de utilizar el equipo de ultrasonido pasivo correctamente procedemos a verificar todas sus funciones y estén en rango adecuado para realizar las mediciones en los puntos de fuga y las lecturas sean las adecuadas para el análisis.

4.3.4 *Toma de datos.* Se realiza la toma de datos en el módulo de pruebas en el laboratorio de mantenimiento predictivo. De los diferentes diámetros de fuga $\varnothing = 1,0\text{mm}$; $\varnothing = 2,0\text{mm}$; $\varnothing = 3,0\text{mm}$ y los cuatro puntos correspondientes a cada diámetro.

4.4 Puntos de fuga de 1,0 mm

- Punto A

Figura. 24 Toma del Punto A con 1,0 mm

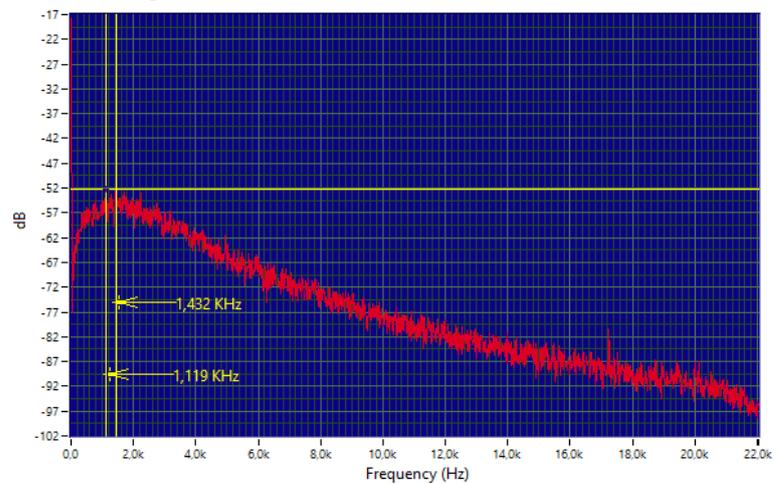


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 24 se indica el espectro del punto A, donde se puede observar que tiene una amplitud de -52,51 y la frecuencia de 1,420 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 2,004 kHz

- Punto B

Figura. 25 Toma del Punto B con 1,0 mm

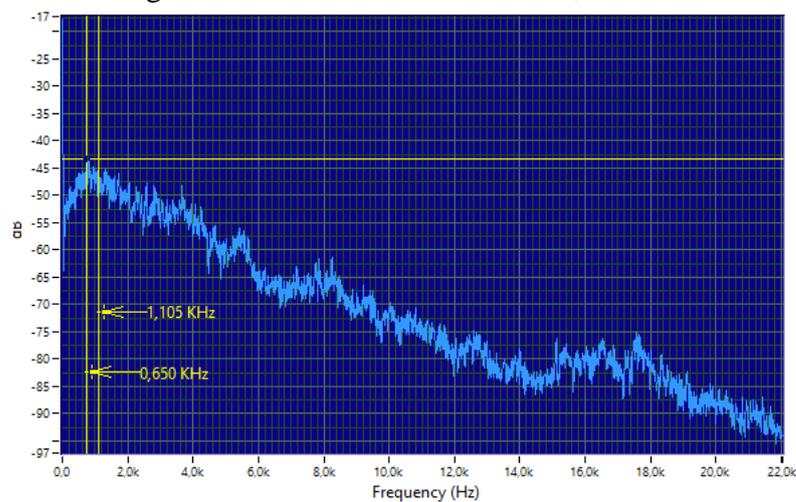


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 25 se indica el espectro del punto B, donde se observa que tiene una amplitud de -52,43 y la frecuencia de 1,119 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,432kHz.

- Punto C

Figura. 26 Toma del Punto C con 1,0 mm

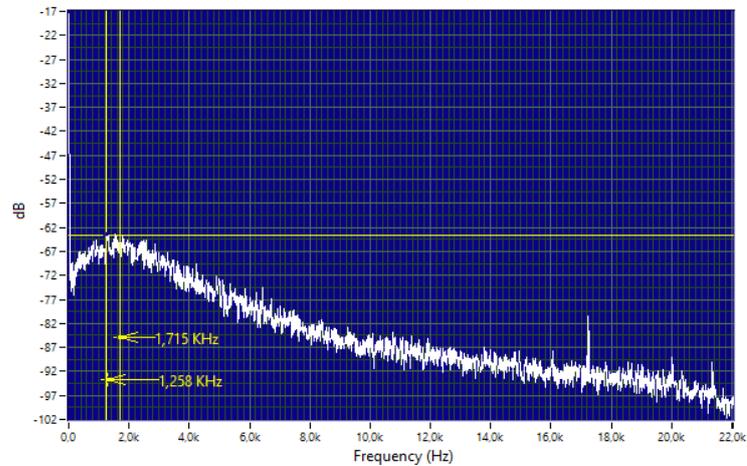


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 26 se indica el espectro del punto C, donde se observa que tiene una amplitud de -43,59 y la frecuencia de 0,650 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,105 kHz.

- Punto D

Figura. 27 Toma del Punto D con 1,0 mm



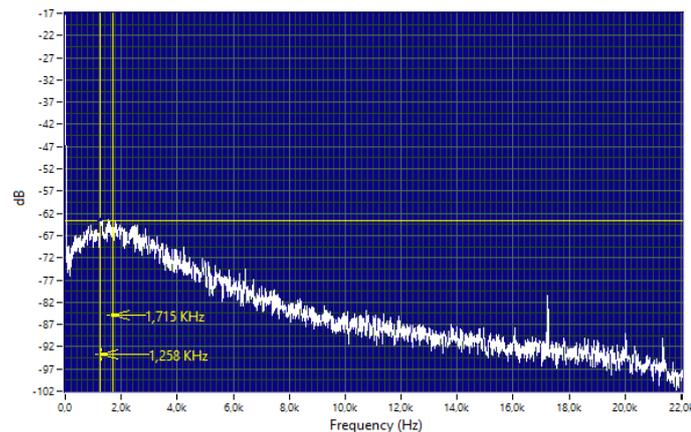
Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 27 se indica el espectro del punto D, donde se observa que tiene una amplitud de -63,83 y la frecuencia de 1,258 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,715 kHz.

4.5 Puntos de fuga de 2 mm

- Punto A

Figura. 28 Toma del Punto A con 2,0 mm

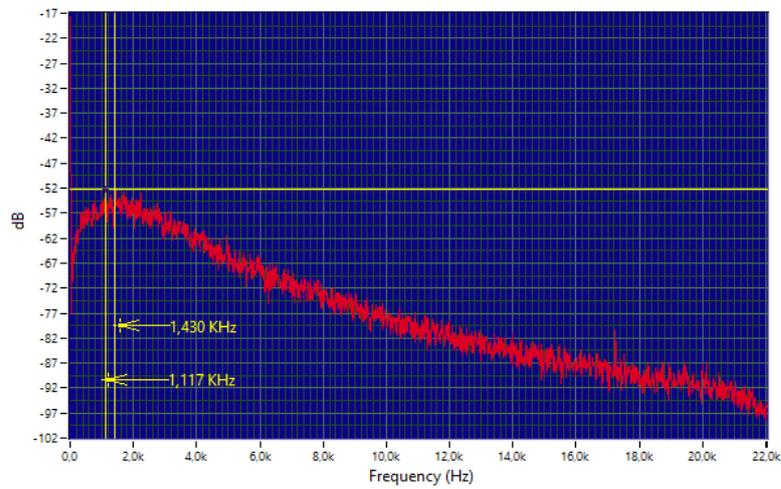


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 28 se indica el espectro del punto A, donde se observa que tiene una amplitud de -52,45 y la frecuencia de 1,258 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,715 kHz.

- Punto B

Figura. 29 Toma del Punto B con 2,0 mm

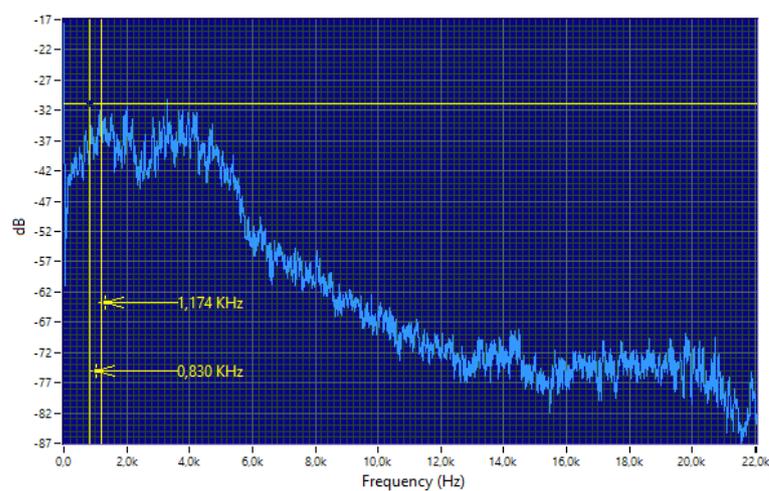


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 29 se indica el espectro del punto B, donde se observa que tiene una amplitud de -52,40 y la frecuencia de 1,117 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,430 kHz.

- Punto C

Figura. 30 Toma del Punto C con 2,0 mm

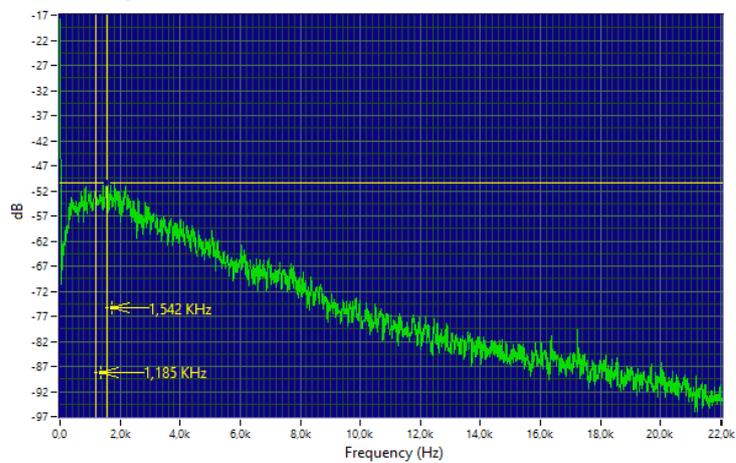


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 30 se indica el espectro del punto C, donde se observa que tiene una amplitud de -30,01 y la frecuencia de 0,830 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,174 kHz.

- Punto D

Figura. 31 Toma del Punto D con 2,0 mm



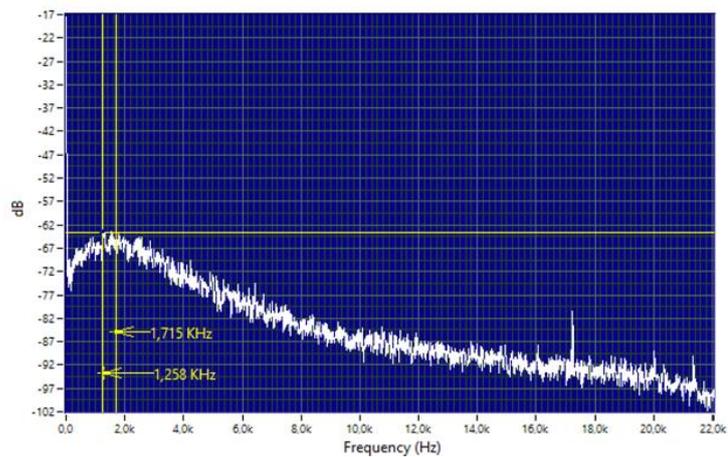
Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 31 se indica el espectro del punto D, donde se observa que tiene una amplitud de -53,73 y la frecuencia de 1,185 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,542 kHz.

4.6 Punto de fuga de 3,0 mm

- Punto A

Figura. 32 Toma del Punto A con 3,0 mm

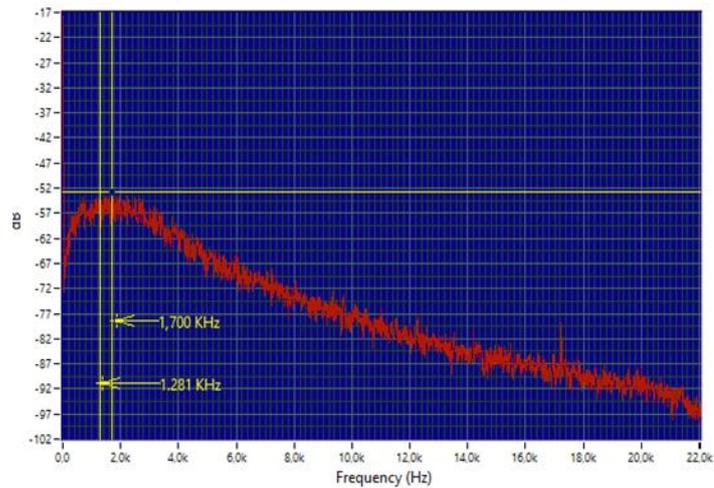


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 32 se indica el espectro del punto A, donde se observa que tiene una amplitud de -52,45 y la frecuencia de 1,258 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,715 kHz.

- Punto B

Figura. 33 Toma del Punto B con 3,0 mm

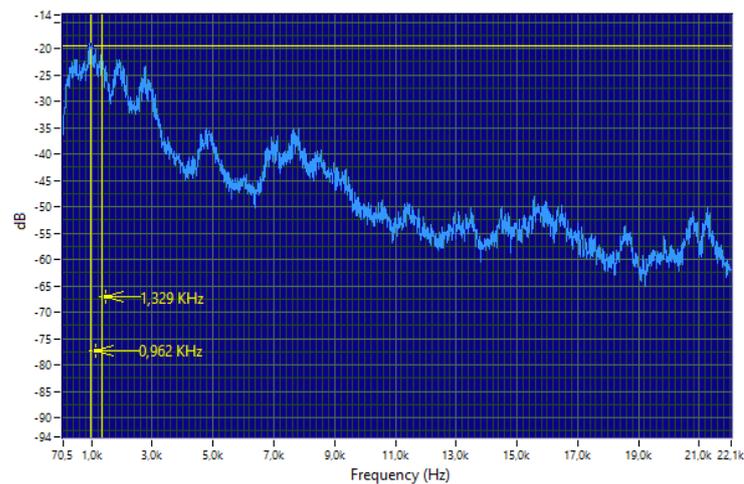


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 33 se indica el espectro del punto B, donde se observa que tiene una amplitud de -52,98 y la frecuencia de 1,281 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,700 kHz.

- Punto C

Figura. 34 Toma del Punto C con 3,0 mm

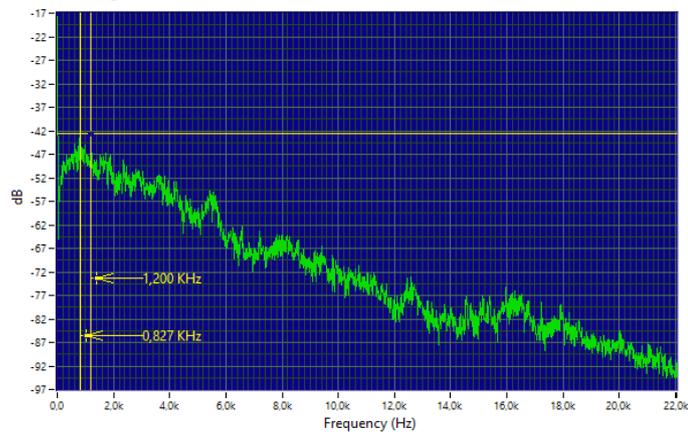


Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 34 se indica el espectro del punto C, donde se observa que tiene una amplitud de -16,85 y la frecuencia de 0,962 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,329 kHz.

- Punto D

Figura. 35 Toma del Punto D con 3,0 mm



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 35 se indica el espectro del punto D, donde se observa que tiene una amplitud de -48,42 y la frecuencia de 0,827 kHz. El primer armónico determinado posee una frecuencia de 1,200 kHz.

4.7 Plan de mantenimiento del módulo de pruebas.

El objetivo del plan de mantenimiento es realizar todas las actividades que requiera cada elemento del módulo con su respectiva frecuencia y no exista inconvenientes.

4.7.1 *Tareas de mantenimiento del compresor.* La tarea de mantenimiento se realizó en base a la regularidad que el módulo va ser utilizado en el semestre por esto algunas tareas se realizan antes y después de realizar la práctica.

Tabla 14 Tareas de Mantenimiento del compresor

N°	Tareas	Frecuencia
1	Limpieza de la carcasa	Después de utilizar el equipo
2	Abrir la llave de drenaje para eliminar el condensado	Antes y después de cada utilización
3	Cambio de aceite y filtros	Cada 1000 horas de funcionamiento
4	Revisión de todas las conexiones eléctricas.	Mensualmente
5	Verificar el nivel de aceite	Mensualmente
6	Control de temperatura	Mensualmente

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

4.7.2 *Tareas de mantenimiento del cilindro neumático.* Para establecer intervalos o frecuencias debemos tomar en cuenta la condición de trabajo a la que estén expuesto dicho elemento neumático y también se debe tomar en cuenta las condiciones ambientales.

No cabe duda de que el mantenimiento debe ser periódico, para evitar de esta manera el deterioro de los componentes del sistema.

Tabla 15 Tareas de Mantenimiento del Cilindro Neumático

N°	Tareas	Frecuencias
1	Limpieza de la carcasa	Después de su utilización
2	Inspección de superficie en la que actué el vástago del pistón	Antes y después de su utilización
3	Revisión de las mangueras	Antes y después de su utilización
4	Revisión de los racores que conecta el pistón con las mangueras	Antes y después de su utilización
5	Revisión del ascenso y descenso del pistón	Antes y después de su utilización

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

4.7.3 *Tareas de mantenimiento de la válvula de accionamiento manual.* Las tareas para la válvula de accionamiento manual son las siguientes.

Tabla 16 Tareas de Mantenimiento de la Válvula de Accionamiento Manual

N°	Tareas	Frecuencias
1	Limpieza de la carcasa de la válvula	Después de su utilización
2	Inspección de la válvula que no exista fugas	Antes y después de su utilización
3	Revisión de los racores de conexión de la válvula con las mangueras 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 los silenciadores de la válvula	Antes y después de su utilización

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

CAPÍTULO V

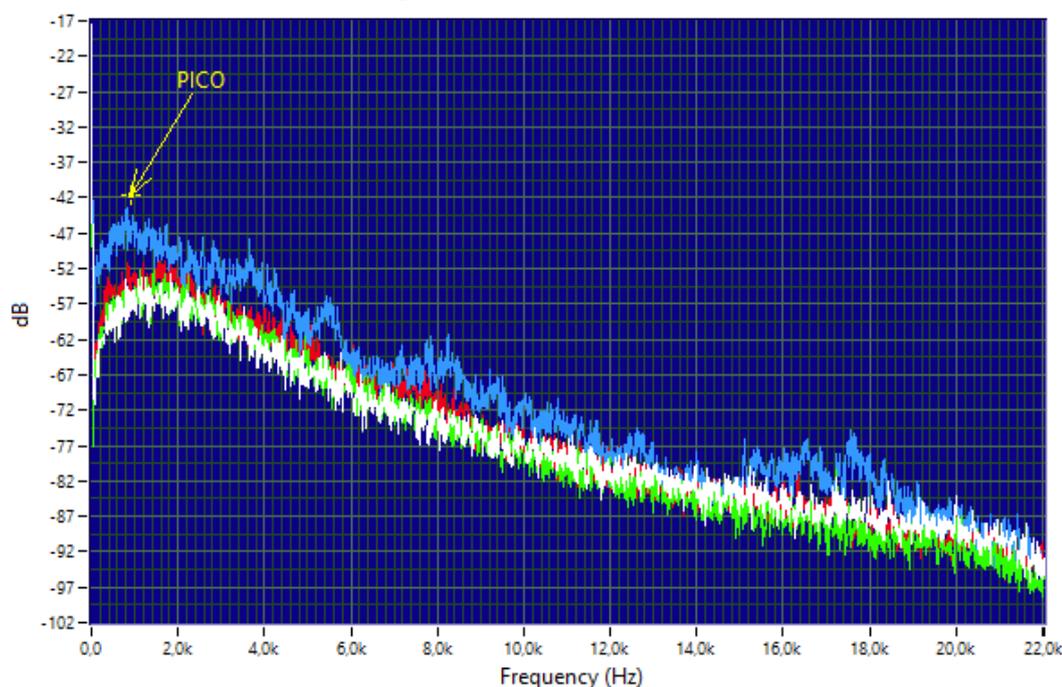
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 Análisis de los espectros del ultrasonido pasivo.

Se analiza la evolución de la falla en una válvula de bola que está sometida a diferentes diámetros de fuga de 0mm, 1mm, 2mm, 3mm. A una presión de 6 bares en el sistema.

Falla de diámetro 1 mm

Figura. 36 Falla a 1,0 mm



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

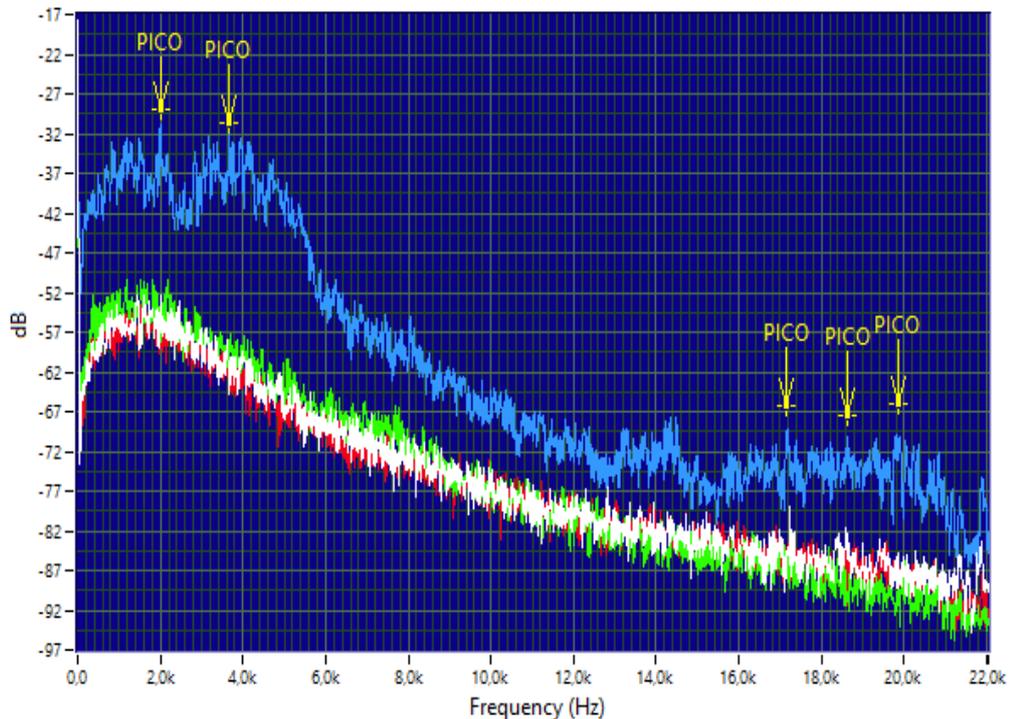
En la Figura 36 se analiza el espectral de las mediciones obtenidas en la válvula de prueba, donde se puede observar lo siguiente: Punto A color blanco, Punto B color verde, Punto C color celeste, Punto D color rojo y este código de colores nos sirve para diferenciar las características de los diferentes puntos de inspección. El espectro de color blanco que corresponde a la línea base de la válvula, la cual se toma como referencia para evaluar las distintas características que se van desarrollando. Se muestra como hay un incremento de amplitud sobre la línea base.

De acuerdo a este espectro podemos confirmar la presencia de una fuga en la válvula y visualizamos como el punto C tiene una medida superior a la del punto A y B.

Esto es porque en el punto C, que es punto inmediato posterior aguas debajo de la válvula, es la zona donde se acaba de formar la turbulencia de la fuga.

Falla de diámetro 2,0 mm

Figura. 37 Falla a 2,0 mm



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 37 se observa cómo evoluciona la falla en la válvula con relación a un espectro de diámetro de fuga de un 1mm en el cual los picos son menos frecuentes.

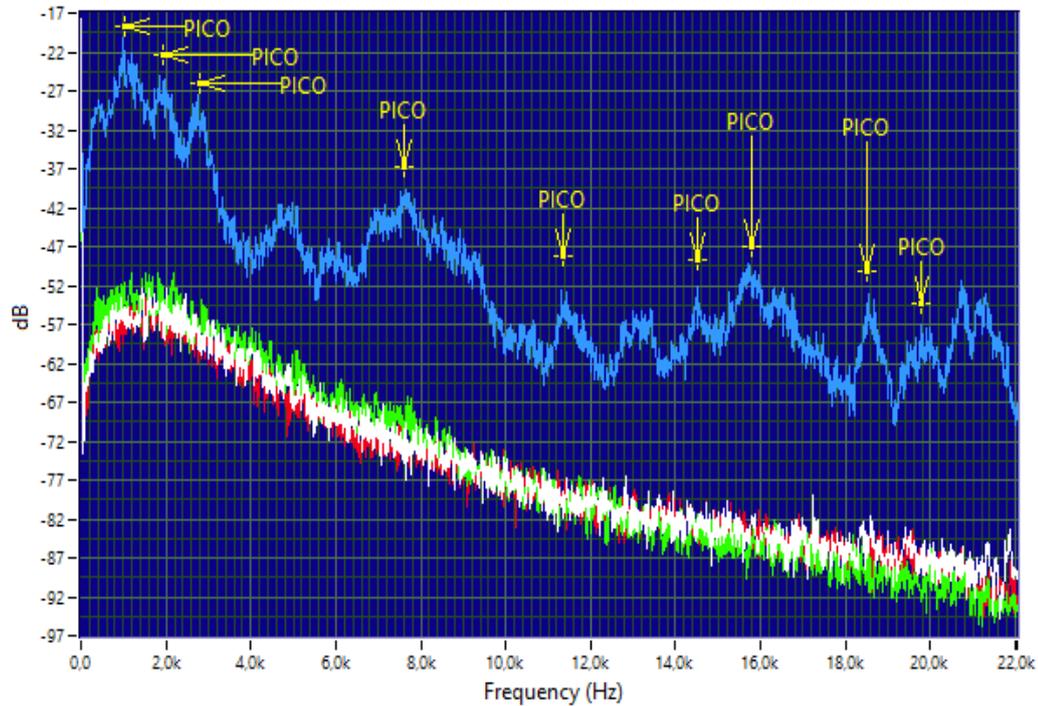
Se evidencia como se hace visible armónicos de alta frecuencia de 16kHz a 20kHz, empezado a generar ruido por motivo de la falla y el espectro del punto C supera la línea base de manera considerable. En el punto C es donde sufre un cambio de flujo de laminar a turbulento y se detecta la fuga.

Para poder visualizar de mejor manera la evolución de esta falla se ha desarrollado un punto de fuga de 2mm.

La mayoría de los picos pertenecen a la frecuencia de fallo esto nos da una idea que el componente tiene problemas y que debemos corregir de inmediato.

Falla de diámetro de 3,0 mm

Figura. 38 Falla a 3,0 mm



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

En la Figura 38 se observa el incremento de picos de 16kHz a 20kHz y además se nota como el nivel de amplitud de este espectro (punto C) sobrepasa el nivel de línea base de una manera considerable. En este espectro analizamos el aumento de la frecuencia, amplitud con respecto a la línea base para determinar una falla en la válvula.

De acuerdo a este espectro podemos confirmar la presencia de una fuga en la válvula y visualizamos como el punto C tiene una medida superior a la del punto A y B.

En el punto C es la zona donde se acaba de formar la turbulencia de la fuga por diferencia de presiones y empieza a generar ruido por motivo de la falla.

Para poder apreciar de mejor manera la evolución de esta falla de ha desarrollado un punto de fuga de 3mm en el elemento.

5.2 Caudal de aire en cada una de las fugas

En la Figura podemos visualizar de mejor manera que el volumen de aire y el diámetro de fugas son directamente proporcionales.

Se ha calculado tres puntos de fuga con el objetivo de verificar la cantidad de volumen de aire que circula por los diferentes diámetros establecidos.

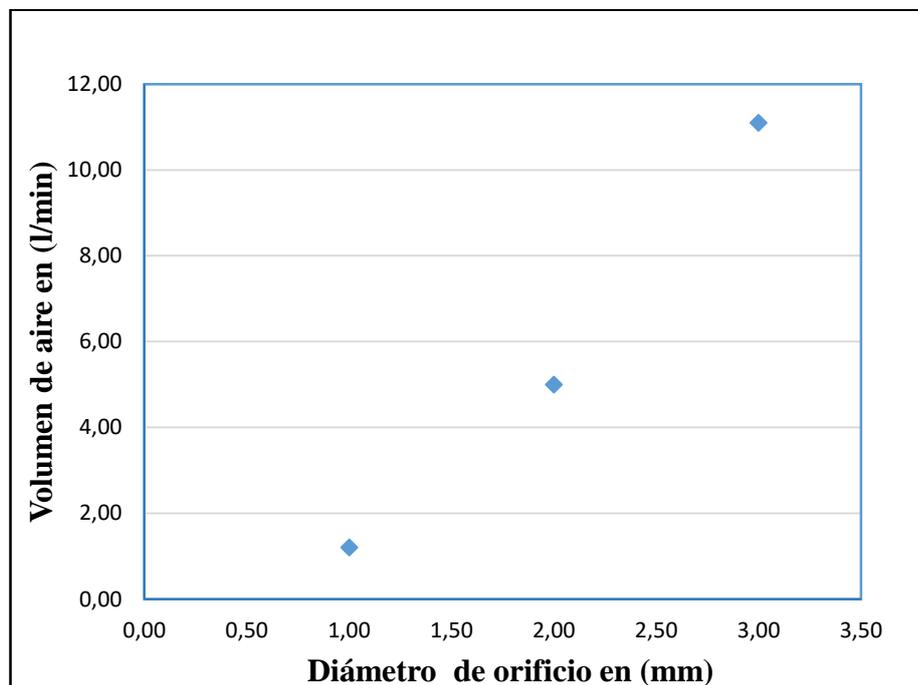
El diámetro de mayor medida que tenemos en esta investigación es de 3mm y el volumen de aire que se desperdicia es de 11,10 l/s.

Tabla 17 Volumen de aire

Diámetro de orificio en mm	Volumen aire en l/s
1,0	1,20
2,0	5,00
3,0	11,10

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Figura. 39 Volumen de aire



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

A continuación se hallará la ecuación de ajuste y para realizar el cálculo se ubicará los datos de la gráfica (Figura.39), cabe indicar que el número de datos es 3 (n=3).

Tabla 18 Diámetro de orificio-Volumen de aire

Regresión Lineal: Diámetro de orificio-Volumen de aire								
X	Y	X ²	X * Y	X - \bar{X}	Y - \bar{Y}	(X - \bar{X}) ²	(Y - \bar{Y}) ²	(X - \bar{X}) * (Y - \bar{Y})
1	1,2	1	1,2	-1	-4,566	1	20,848	4,566
2	5	4	10	0	-0,766	0	0,5867	0
3	11,1	9	33,3	1	5,334	1	28,4515	5,334
6	17,3	14	44,5	0	0,002	2	49,8866	9,9

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Con la siguiente ecuación hallaremos el valor de a

$$a = \frac{n * \sum xy - \sum x * \sum y}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = 4,95$$

El valor de a es la pendiente de la recta y es positiva esto nos indica que la recta es creciente.

Una recta es creciente si los valores de X y Y aumentan.

Una vez determinado el valor a , se calcula el valor de b

$$b = \frac{\sum y - a * \sum x}{n}$$

$$b = -4,133$$

Se adquirió los valores de $a = 4,95$ y $b = -4,133$. Por lo tanto la ecuación de ajuste es:

$$Y = ax + b$$

$$Y = 4,95x - 4,133$$

Se calcula la Covarianza

$$S_{xy} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{n}$$

$$S_{xy} = \frac{9,9}{3}$$

$$S_{xy} = 3,3.$$

Se halla la desviación estándar.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n}}$$

$$S_x = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$S_x = 0,816$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{n}}$$

$$S_y = 4,077$$

Se reemplaza S_x y S_y en la ecuación para obtener el coeficiente de correlación. (r^2)

$$r^2 = \frac{S_{xy}}{S_x * S_y}$$

$$r^2 = \frac{3,3}{0,816 * 4,077}$$

$$r^2 = 0,982$$

Este resultado indica 98,2% de los datos tiene una buena relación entre las variables y respalda que la ecuación lineal representa un excelente ajuste.

5.3 Espectros de ultrasonido.

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

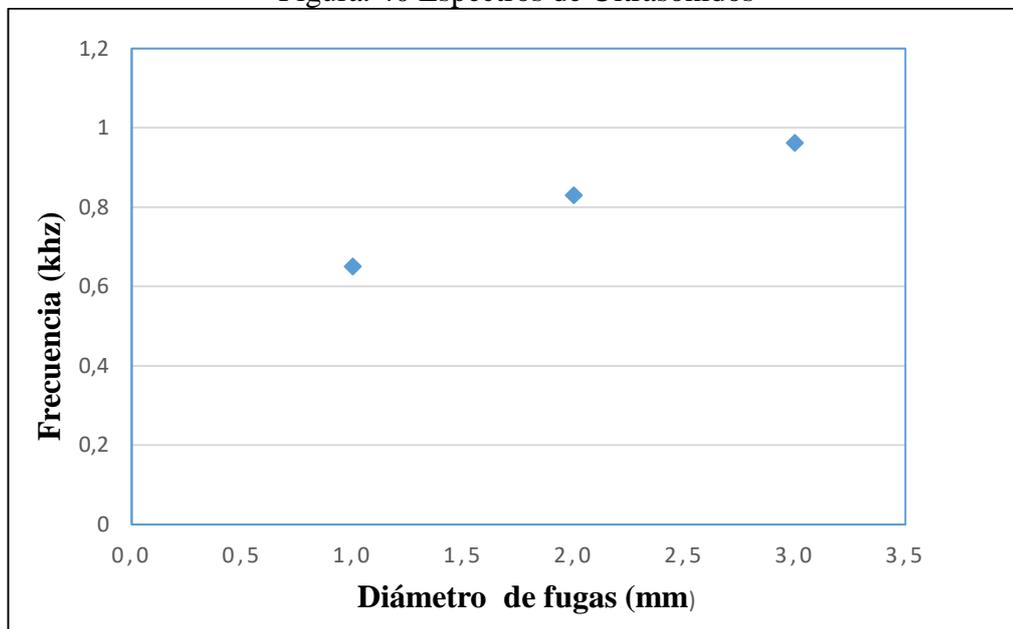
En los diferentes diámetros de fuga establecidos se observa claramente como la frecuencia va creciendo de forma considerable.

Tabla 19 Espectro de ultrasonido

Espectro de ultrasonido	
Diámetro de fugas(mm)	Frecuencia (kHz)
1,0	0,65
2,0	0,83
3,0	0,962

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Figura. 40 Espectros de Ultrasonidos



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

A continuación, se hallará la ecuación de ajuste y para realizar el cálculo se colocará los datos de la gráfica (Figura.40), cabe indicar que el número de datos es 3 (n=3).

Tabla 20 Frecuencias-Diámetro de fugas

Regresión Lineal: Frecuencias – Diámetro de fugas								
X	Y	X ²	X * Y	X - \bar{X}	Y - \bar{Y}	(X - \bar{X}) ²	(Y - \bar{Y}) ²	(X - \bar{X}) * (Y - \bar{Y})
1	0,65	1	0,65	-1	-0,164	1	0,026896	0,164
2	0,83	4	1,66	0	0,016	0	0,000256	0
3	0,962	9	2,886	1	0,148	1	0,021904	0,148
6	2,442	14	5,196	0	0	2	0,049056	0,310

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Con la siguiente ecuación se determina el valor de a

$$a = \frac{n * \sum xy - \sum x * \sum y}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = 0,158$$

El valor de a es la pendiente de la recta y es positiva esto nos indica que la recta es creciente.

Una recta es creciente si los valores de X y Y aumentan.

Una vez determinado el valor a , se calcula el valor de b

$$b = \frac{\sum y - a * \sum x}{n}$$

$$b = 0,50$$

Se adquirió los valores de $a = 0,158$ y $b = 0,50$. Por lo tanto la ecuación de ajuste es:

$$Y = ax + b$$

$$Y = 0,158x + 0,50$$

Se calcula la Covarianza

$$S_{xy} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{n}$$

$$S_{xy} = \frac{0,310}{3}$$

$$S_{xy} = 0,103$$

Se halla la desviación estándar.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n}}$$

$$S_x = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$S_x = 0,816$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{n}}$$

$$S_y = 0,1278$$

Se reemplaza S_x y S_y en la ecuación para obtener el coeficiente de correlación. (r^2)

$$r^2 = \frac{S_{xy}}{S_x * S_y}$$

$$r^2 = \frac{0,103}{0,816 * 0,1278}$$

$$r^2 = 0,991$$

Este resultado indica 99,1% de los datos tiene una buena relación entre las variables y respalda que la ecuación lineal representa un excelente ajuste.

5.4 Amplitud de ondas de ultrasonido

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

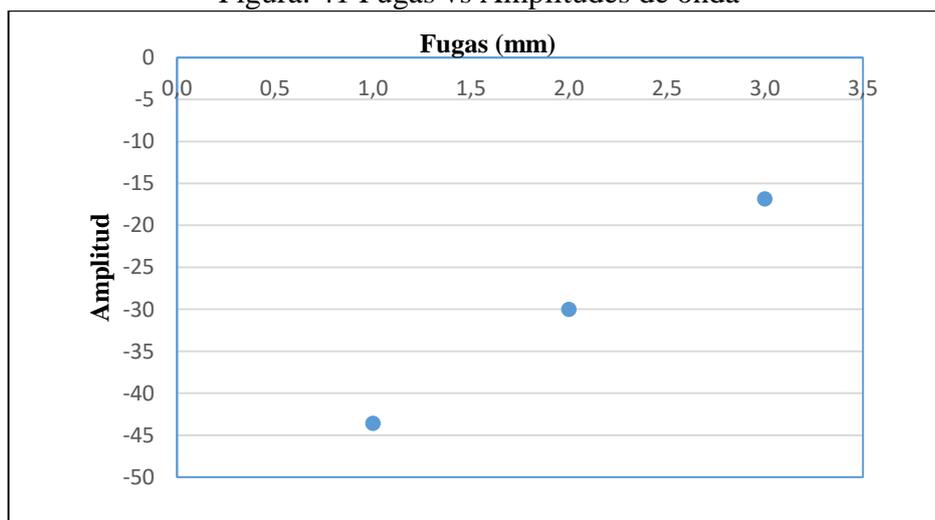
En los diferentes diámetros de fuga establecidos se observa claramente como la amplitud va creciendo de forma considerable.

Tabla 21 Amplitud de onda

Amplitud de onda	
Fugas (mm)	Amplitud
1,0	-43,59
2,0	-30,01
3,0	-16,85

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Figura. 41 Fugas vs Amplitudes de onda



Fugas: Aucapiña V. Tierra I.

A continuación se hallará la ecuación de ajuste y para realizar el cálculo se colocará los datos de la gráfica (Figura.41), cabe indicar que el número de datos es 3 (n=3).

Tabla 22 Fugas-Amplitud de onda

Regresión Lineal: Fugas – Amplitud de onda								
X	Y	X ²	X * Y	X - \bar{X}	Y - \bar{Y}	(X - \bar{X}) ²	(Y - \bar{Y}) ²	(X - \bar{X}) * (Y - \bar{Y})
1	-43,59	1	-43,59	-1	-13,33	1	180,6336	13,33
2	-30,01	4	-60,02	0	0,14	0	0,0196	0
3	-16,85	9	-50,55	1	13,2	1	176,89	13,2
6	-90,45	14	-154,16	0	0,01	2	357,5432	26,53

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Con la siguiente ecuación se determina el valor de a

$$a = \frac{n * \sum xy - \sum x * \sum y}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = 13,37$$

El valor de a es la pendiente de la recta y es positiva esto nos indica que la recta es creciente.

Una recta es creciente si los valores de X y Y aumentan.

Una vez determinado el valor a , se calcula el valor de b

$$b = \frac{\sum y - a * \sum x}{n}$$

$$b = -56,89$$

Se adquirió los valores de $a = 13,37$ y $b = -56,89$. Por lo tanto la ecuación de ajuste es:

$$Y = ax + b$$

$$Y = 13,37x - 56,89$$

Se calcula la Covarianza

$$S_{xy} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{n}$$

$$S_{xy} = \frac{26,53}{3}$$

$$S_{xy} = 8,8433$$

Se halla la desviación estándar.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n}}$$

$$S_x = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$S_x = 0,816$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{n}}$$

$$S_y = 10,917$$

Se reemplaza S_x y S_y en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de correlación. (r^2)

$$r^2 = \frac{S_{xy}}{S_x * S_y}$$

$$r^2 = \frac{8,8433}{0,816 * 10,917}$$

$$r^2 = 0,993$$

Este resultado indica 99,3% de los datos tiene una buena relación entre las variables y respalda que la ecuación lineal representa un excelente ajuste.

5.5 Eficiencia energética en los puntos de fuga en el sistema.

Se realizó los cálculos para verificar cuanto se pierde al año económicamente en la empresa por cada fuga identificado en el sistema de aire comprimido.

Para este cálculo se necesita la potencia que requiere el compresor, el costo de kW-h en la empresa y las horas que trabaja el compresor.

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

Donde:

P_f = Pérdidas por fugas (USD).

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

C_{kW-h} = Costo de kW h.

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

Tabla 23 Pérdidas Anuales por fugas

Fugas (mm)	Potencia (kW)	Horas de trabajo	Costos kW-h	Pérdidas por fuga de aire(USD)	Amplitud
0	0	8760	0,1	0	0
1	0,3	8760	0,1	263	-43,59
2	1,34	8760	0,1	1,174	-30,01
3	3,1	8760	0,1	2,716	-16,85

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

5.6 Pérdidas económicas por fugas de aire

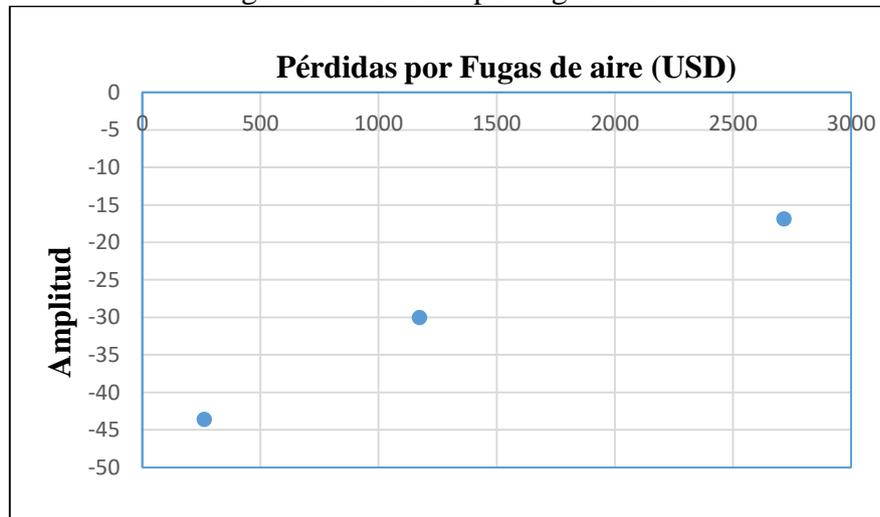
En la Figura 42 se observa que la amplitud va aumentando en cada punto de fuga y también aumenta la potencia y por ende sube el costo de cada punto de fuga en los sistemas de aire comprimido resultando un alto costo para la empresa.

Tabla 24 Pérdidas económicas

Pérdidas por fugas de aire (USD)	Amplitud
263	-43,59
1.174	-30,01
2.716	-16,85

Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

Figura. 42 Pérdidas por fugas de aire



Fuente: Aucapiña V. Tierra I.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El estudio de algunos aspectos importantes sobre las válvulas como sus aplicaciones, clasificación, permitió tener una idea clara sobre las consecuencias que puede ocasionar una fuga interna en el elemento que constituye el sistema.

El módulo construido en el presente trabajo de titulación, permitió estudiar los diferentes diámetros de fuga en las válvulas y de forma comparativa este elemento en buen estado con otras que se encuentren en condiciones inadecuadas, tomando en cuenta la operatividad, facilidad de manejo y toma de datos etc.

Se estableció los espectros característicos de cada punto de falla con sus respectivos parámetros como frecuencia, amplitud que varió de acuerdo al diámetro de fuga.

Los parámetros como caudal, presión, frecuencia, decibeles y potencia requerida para la compresión varió con cada diámetro de fuga y se comprobó que la fuga de mayor Pérdidas presenta es el de 3mm esto debido a que el caudal de aire desperdiciado es de 11,10 l/s.

Se determinó que la técnica de ultrasonido pasivo es más efectiva en la detección de fallas en válvulas en sistema de aire comprimido, mediante el análisis de los datos obtenidos.

6.2 Recomendaciones

Siempre que se quiera realizar monitoreo con el equipo de ultrasonido, ejecutar las mediciones con los mismos parámetros con las cuales se hizo la medida de línea base, de esta manera obtener un análisis más exacto de las condiciones del elemento a monitorear.

Al realizar el análisis de ultrasonido pasivo para determinar fallas en válvulas, aplicar la técnica de ABCD, que consiste tomar dos lecturas aguas debajo de la válvula denominadas A y B, y dos lecturas aguas arriba denominadas C y D. De acuerdo a estos datos nos permite saber lo que está pasando en el interior de la válvula, que es lo que nos interesa saber, debido a que estamos en busca de fugas internas en el sistema.

Utilizar el módulo adecuado para el equipo de ultrasonido al momento de realizar la práctica, que el equipo esté calibrado para la aplicación a desarrollar.

Implementar de la tecnología de ultrasonido en las instalaciones de aire comprimido, esto nos permite tener un monitoreo continuo del elemento.

BIBLIOGRAFIA

ABEJARO SOTO, Antonio. *Detección de fugas internas en valvulas mediante la técnica de ultrasonido* . Venezuela: Predictiva, 2014. pp. 20-28.

BARROSO HERRERO, Segundo & CARSÍ CEBRIÁN, Manuel. *Procesado y puesta en servicio de materiales*. Madrid: Fundación Confemetal, 2013. pp. 84-97.

CABRERA, Raul. *Formas de corrosión y su clasificacion*. Riobamba: documental, 2001. pp. 59-70.

CALDERÓN , Jaime Rolando & POZO , Cristian Javier. *Diseño y construcción de un banco de pruebas para pérdidas cargas en tuberías y accesorios con simulación*. Quito-Ecuador. 2011. pp. 52-65.

CAMPOS AVELLA, Carlos E. *Manual de Mantenimiento Centrado en la Eficiencia Energética para Sistemas Industriales*. Colombia: Calidad Gráfica S.A, 2010. pp. 29-69.

CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. México: McGRAW-Hill, 1942. pp. 451-546.

CUAUTITLÁN, Izcalli. *Prueba de ultrasonido*. [En línea]. Mexico, 2010. [Consulta: 16 de 08 de 2016]. Disponible en: <http://www.ni.com/es-cr.html>.

FERNÁNDEZ CABANAS, Manéz, & otros. *Técnicas para el Mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Graficques 92 S.A, 1998. pp. 35-55.

GALARZA RIVERA, Carlos E. *Cuantificación de fugas en válvulas con Ultrasonido*. México: Tipografía Barsa S.A, 2011. pp. 105-136.

GÓMEZ DE LEÓN , Eduardo. *Ensayos no destructivos, Técnica de ultrasonidos pasivo*. Madrid-España: Fundación Confemetal, 2006, pp. 15-17.

GÓMEZ DE LEÓN, Félix Cesáreo. *Tecnología del Mantenimiento*. Madrid: Servicio de Publicaciones, Universidad de Murcia C/Santo Cristo, 1998. pp.12-46.

INC. UE SYSTEMS. *Datos del Equipo de ultrasonido pasivo* [En línea]. Mexico, 2010. [Citado el: 15 de 04 de 2016.]. Disponible en: <http://www.uesystems>.

MADRID, Mario Andrés & VALLE, Luis Antonio. *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* (Tesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba. 2015. pp. 31-64.

OLARTE C, Willian & BOTERO A , Marcela. *La detección de ultrasonido una técnica empleada en el mantenimiento predictivo*. Pereira: Scientia et Technica, 2011. pp. 41-52.

OLARTE C, Willian & BOTERO A, Marcela. *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en el mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. Pereira: Scientia et Technica, 2010. pp. 100-170.

PANCORBO, Francisco. *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Barcelona: CEDRO, 2011. pp. 50-55.

PARKER. Catalogos [En línea]. USA, 2007. [Citado el: 27 de 07 de 2016.]. Disponible en: <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem>.

PAULLÁN GUARACA, Víctor Marcelo & YUGCHA LLAMBO, José Vicente. **2013.** *Análisis, determinación, evaluación y prevención de fallas potenciales mediante la técnica de inspección por Ultrasonido* (Tesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba, 2013. pp. 6-7.

PNEUMATIC, METAL WORK. *Cilindros Neumáticos. Cilindro serie* [En Línea]. Mexico, 2007. [Citado en: 20 de 07 de 2016]. Disponible en: <http://www.metalwork.es>.

PUENTES BARRERA, Felipe Andrés. *Diseño de programado de mantenimieto mediante inspeccion NDT* [En línea]. 2010. [10 de 08 de 2015]. Disponible en: <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/3245/1/TME00997.pdf>.

ROSALER, Robert C. *Manual de Mantenimiento Industrial.* México: MacGraw-Hill, 1997. pp. 451-468.

RUIZ RUBIO, Alfonso & SERRANO SÁNCHEZ, Jesús. *Aplicaciones de los métodos de Ensayos No Destructivos al examen de las uniones soldadas.* Madrid: Urmo S.A, 1987, pp. 112-180.

SHIGLEY, Joseph Edward. *Elementos de Máquinas Vol.1.* Río de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1984. pp. 60-62.