

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE UNA TRAMPA DE VAPOR Y ANÁLISIS DE SU RESPUESTA VIBRACIONAL EN DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN.

COMPONENTE DEL TRABAJO: DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS VIBRACIONAL DE LA TRAMPA DE VAPOR.

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

CÉSAR PATRICIO ZÚÑIGA CHÁVEZ

cesar.zuniga@epn.edu.ec

DIRECTOR: WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMAN

salvatore.reina@epn.edu.ec

DMQ, Julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, César Patricio Zúñiga Chávez declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

César Patricio Zúñiga Chávez

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por César Patricio Zúñiga Chávez, bajo mi supervisión.

Washington Salvatore Reina Guzmán

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

César Patricio Zúñiga Chávez

Washington Salvatore Reina Guzmán

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico en primer lugar a Dios, quien me ha cuidado desde el vientre de mi madre hasta lograr cada una de mis metas. Me ha hecho sentir acompañado a lo largo de toda la carrera y siempre me ha empujado hacia adelante para no desmayar cuando ha habido obstáculos en el camino.

A mi madre Jenny Chávez, quien ha sido el pilar fundamental para que yo no me rinda. Ha pasado tantas noches en vela preocupada por mi bienestar y cuidado. Con sus enseñanzas, no ha hecho más que formar a un hombre valiente y responsable que lucha por sus sueños. Definitivamente, todos mis logros son por ella y gracias a ella.

A mis hermanas María Fernanda y Andrea, mis hermanas mayores, quienes me han cuidado a lo largo de toda mi vida y a quienes debo gran parte de mi felicidad. Sin duda, me han impulsado y brindado palabras de aliento cuando más lo necesitaba.

A mi padre César Zúñiga, por enseñarme el valor del trabajo duro y a conseguir mis metas a base del esfuerzo propio.

A todos mis amigos que han estado cerca de mí a lo largo de la carrera, por los momentos de alegría que hemos compartido, por los paseos, las pruebas y las campañas que hemos cruzado, dando como resultado que siempre nos mantuviéramos unidos y dispuestos a ayudarnos entre nosotros.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a mi madre, a mi padre y hermanas por motivarme siempre para cumplir mis sueños y ser mi fortaleza cuando necesitaba un consejo.

En segundo lugar, quiero agradecer al Dr. Washington Salvatore Reina Guzmán, mi director de TIC. Que siempre estuvo predispuesto a darme una retroalimentación y guía en la realización de este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi compañera de TIC, Melany Chiluisa. Estuvo presente desde el primer día colaborándome y guiándome en este trabajo. Realmente siento que, sin ella, este trabajo no se habría realizado.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica que fueron guías para que llegue a ser un gran profesional. Igualmente, un agradecimiento especial a la Escuela Politécnica Nacional que me cobijo entre sus aulas para impartirme todo su conocimiento.

A Víctor Michilena, mi compañero de carrera y de vida le agradezco por todas las experiencias vividas y los momentos de felicidad y apoyo que nunca dudo en brindarme.

A Katherin Zavala y Melany Dibujes, grandes amigas que estuvieron presente a lo largo de la carrera y espero que lo estén a lo largo de la vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Inspección mediante el método vibracional.....	14
2.2 Simulación de la trampa termodinámica	25
2.3 Comparación con los resultados por método ultrasónico.....	29
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
3.2 Conclusiones.....	41
3.3 Recomendaciones.....	42
ANEXO 1. Resultado de la inspección en el destilador del DECAB.....	46
ANEXO 2. Resultado de la inspección en la planta de alimentos	47
ANEXO 3. Detalle interno del CAD de la trampa de vapor termodinámica	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de un sistema de vapor.....	3
Figura 1.2. Trampa de vapor mecánica de cubeta invertida	5
Figura 1.3. Trampa de vapor termostática bimetálica	6
Figura 1.4. Trampa de vapor termodinámica de disco	7
Figura 1.5. Ejemplo entre dominio del tiempo y dominio de la frecuencia	11
Figura 2.1. Esquema de la metodología planteada	13
Figura 2.2. Equipo analizador de vibraciones SVAN 958.....	14
Figura 2.3. Interfaz de programa SVAN PC++	16
Figura 2.4. Esquema de la superficie inferior del aislante.....	19
Figura 2.5. Esquema de la superficie superior del aislante.....	19
Figura 2.6. Verificación de la temperatura superficial con cámara termográfica.....	20
Figura 2.7. Marmita Hamilton y Trampa de vapor SpiraxSarco.....	21
Figura 2.8. Destilador de agua de la Planta Piloto del DECAB	22
Figura 2.9. Trampa de vapor termostática bimetálica SpiraxSarco.....	23
Figura 2.10. Proceso de medición en la trampa termostática bimetálica del destilador	23
Figura 2.11. Modelo CAD de trampa de vapor termodinámica de disco.....	25
Figura 2.12. Interfaz del programa ANSYS 2023 R2.....	26
Figura 2.13. Materiales seleccionados para la trampa de vapor.....	27
Figura 2.14. Restricción de movimiento en la simulación.....	28
Figura 2.15. Modelo final de la simulación.....	28
Figura 2.16. Ejemplo de grafica obtenida por el equipo SVAN 958.....	29
Figura 2.17. Ejemplo de señal filtrada.....	29
Figura 3.1. Simulación de la trampa de vapor con libertad de movimiento en el eje X.....	31
Figura 3.2. Tipo de onda con la frecuencia encontrada	33
Figura 3.3. Simulación de la trampa de vapor con libertad de movimiento en el eje Y.....	34
Figura 3.4. Tipo de onda con la frecuencia encontrada para el eje Y	35
Figura 3.5 Simulación de la trampa de vapor con libertad de movimiento en el eje Y	36
Figura 3.6 Tipo de onda con la frecuencia encontrada para el eje Y	37
Figura 3.7 Comparativa entre las curvas de frecuencia en los 3 ejes de movimiento.....	38
Figura 3.8 Comparación entre resultado ultrasónico y vibratorio	39
Figura 3.9 Variación del condesando en la trampa de vapor	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas e información general SVAN 958	15
Tabla 2.2. Características trampas de vapor de la industria alimenticia	24
Tabla 3.1. Modos de vibración obtenidos para la simulación con libertad de movimiento en X.	32
Tabla 3.2. Modos de vibración para la simulación con libertad de movimiento en el eje Y	34
Tabla 3.3. Modos de vibración para la simulación con libertad de movimiento en el eje Y	36

RESUMEN

Este trabajo se centra en desarrollar un modelo matemático para una trampa de vapor y analizar su respuesta vibracional. Este trabajo comienza con la búsqueda bibliográfica sobre los tipos de trampas de vapor y su funcionamiento, así, como sus modos de fallos y problemas durante la operación. Una vez obtenida esta información, se procede a realizar la campaña de mediciones en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología DECAB de la Escuela Politécnica Nacional y en una industria de alimentos. Donde se inspeccionó diferentes tipos de trampas de vapor con el equipo analizar de vibraciones. Tras esto, se realizó un modelo CAD de una trampa de vapor para realizar una simulación mediante análisis modal, para encontrar la frecuencia natural del sistema y poder filtrar los resultados de la medición experimental y comparar estos resultados con los obtenidos mediante inspección ultrasónica.

PALABRAS CLAVE: Trampas de vapor, vibraciones, frecuencia natural, simulación, sistemas de vapor.

ABSTRACT

This work focuses on developing a mathematical model for a steam trap and analyzing its vibrational response. This study begins with a literature review on the types of steam traps and their operation, as well as their failure modes and operational issues. Once this information is obtained, a measurement campaign is conducted at the Pilot Plant of the Department of Food Science and Biotechnology (DECAB) of the Escuela Politécnica Nacional and in a food industry. Various types of steam traps are inspected using vibration analysis equipment. Following this step, a CAD model of a steam trap is created to perform a modal analysis simulation to find the natural frequency of the system to filter the experimental measurement results. The final step is to compare these results with those obtained through ultrasonic inspection.

KEYWORDS: Steam traps, vibrations, natural frequency, simulation, steam systems

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Hoy en día, los sistemas de vapor toman un rol principal en casi todos los procedimientos industriales (Valles Cruz et al., 2014). En este ámbito, el vapor constituye uno de los fluidos primordiales, empleado en el calentamiento de procesos, la producción de energía y el acondicionamiento térmico de entornos (García Pérez, 2017). La producción de vapor se realiza mediante calderas o generadores de vapor, que, mediante la transferencia de calor, elevan la temperatura del agua hasta convertirse en vapor sobresaturado. En este contexto, las trampas de vapor son válvulas automáticas que se encargan de drenar el condensado y gases no condensables como el oxígeno, sin permitir escapar el vapor. Contribuyendo al correcto funcionamiento del sistema (Diaz et al., 2015), (*Balance Energético Nacional – Ministerio de Energía y Minas, 2021*).

Investigaciones realizadas en plantas industriales considera que entre un 30 % a 65% las trampas de vapor no están desempeñando adecuadamente su función (Capehart et al., 2011). Por ello, es de gran importancia adoptar planes de mantenimiento permanente en todo el sistema de vapor optando por métodos de inspección visual, térmico, electrónico, acústico o vibratorio.

Entre todos los métodos posibles de inspección destaca el realizado por método vibracional, que permite analizar la trampa de vapor durante su funcionamiento, debido a que, al realizar apertura o cierre de válvulas, el movimiento produce vibraciones. Otra de las herramientas empleadas en el monitoreo es el análisis de ultrasonido, que opera bajo el mismo principio del método vibracional. Al abrir y cerrar la trampa, este genera sonido con el que se pueden detectar fallas como acumulación de condensado y pérdida de vapor por una operación incorrecta de la trampa.

Por esa razón, existe la necesidad del desarrollo de un análisis de la respuesta vibracional de las trampas de vapor, enfocándose en capturar las variaciones temporales de una magnitud que describen el movimiento de un sistema mecánico. En general, estas vibraciones se representan en gráficas de amplitud según el tiempo; pero surge una limitación al distinguir entre las variaciones en las señales de vibración asociadas a diferentes fallos en la máquina (Rosales, 2023). Para abordar este desafío, se recurre al procesamiento de señales mediante la transformada de Fourier, que convierte la representación de amplitud en función del tiempo al dominio de la frecuencia (Ayabaca Sarria et al., 2022).

Esta transformación facilita la capacidad de discernir entre las distintas características de vibración. En esta etapa es importante interpretar estas señales vibratorias con el propósito de identificar los puntos críticos de operación de las trampas de vapor en diversas condiciones de trabajo.

Por lo expuesto, se considera fundamental analizar la respuesta vibracional de la trampa para identificar los puntos críticos de vibración y contrastar con los de mayor ruido, para comparar estos métodos de inspección.

1.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático de una trampa de vapor y analizar su respuesta vibracional.

1.2 Objetivos específicos

1. Establecer los principios fundamentales del método vibracional en inspección de trampas de vapor.
2. Realizar mediciones vibracionales en trampas de vapor.
3. Modelar y simular una trampa de vapor para encontrar sus modos de vibración.
4. Comparar las mediciones vibracionales experimentales con el resultado teórico, mediciones ultrasónicas y simulación numérica.

1.3 Alcance

El presente Trabajo de Integración Curricular inicia con la búsqueda y revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de los diferentes tipos de trampas de vapor, además, se revisará los métodos de inspección considerando sus ventajas y desventajas. Se realiza un enfoque especial en el estudio de la técnica de inspección por vibración y se define los componentes básicos y parámetros de operación de un detector de vibraciones. Con esta información se procede a realizar mediciones en trampas de vapor a nivel industrial.

Con estos avances y para validar las mediciones experimentales. Se determinará la respuesta vibracional de la trampa de vapor en un software de simulación numérica. Teniendo la posibilidad de contrastar los resultados teóricos, experimentales y por métodos de elementos finitos. Por último, se compara los resultados obtenidos por método vibracional con los obtenidos por método ultrasónico.

1.4 Marco teórico

En este capítulo se describen los elementos de los sistemas de vapor, haciendo más énfasis en las trampas de vapor, métodos de inspección de estos elementos, con un enfoque especial en el método vibracional y sus modos de falla. Además, realiza un acercamiento a la simulación numérica y al análisis modal.

Sistemas de vapor

Los sistemas de vapor como su misma palabra lo indica, son sistemas cuya principal función es generar, transportar y recuperar vapor en aplicaciones industriales. Aprovecha la alta temperatura que alcanza el vapor para la transmisión de energía en diferentes procesos productivos (Sosa Daza, 2013). Un aspecto negativo de estos sistemas es la generación de condensado, que disminuye el rendimiento del mecanismo y afecta al funcionamiento normal. En vista de este problema es necesario introducir elementos que evacuen el condensado para disminuir pérdidas de energía y aumentar la eficiencia.

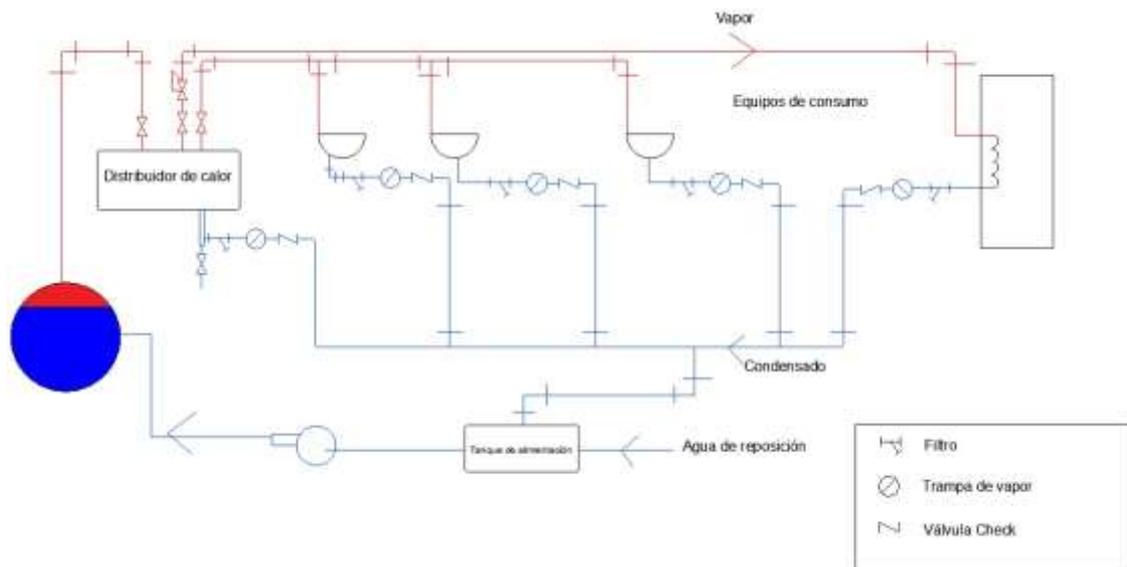


Figura 1.1. Esquema de un sistema de vapor.

Fuente: Adaptado de (Diaz et al., 2015)

En la Figura 1.1, se puede observar el esquema básico de un sistema de vapor. Los sistemas de vapor se pueden dividir en cuatro subsistemas que son: subsistema de generación de vapor, subsistema de distribución, equipos de consumo y subsistema de recuperación de condensado (Capehart et al., 2011). Los nombrados subsistemas se detallan a continuación:

- **Subsistema generador de vapor**

Está conformado por calderas, como los elementos principales en la producción de vapor. Este dispositivo utiliza combustible para intercambiar energía a través de los gases de combustión que calientan al fluido hasta su punto de ebullición y generar vapor. Las calderas son nombradas en función de la circulación de los distintos fluidos en su interior. Se distinguen dos tipos principales: las de tipo piro tubular y los de tipo acetabular (Capehart et al., 2011).

- **Subsistema de distribución**

Es el responsable de llevar el vapor desde el generador hasta los dispositivos que lo dispongan. Por tanto, está conformado por líneas de vapor, válvulas reguladoras de presión de vapor, entre otras. El buen funcionamiento de este subsistema es de suma importancia para evitar la formación de condensado, garantizar un flujo continuo y regulado de vapor (Jaramillo Ortiz, 2010).

El porcentaje de energía que se pierde en este subsistema va alrededor del 25% por la formación de condensado. Otro efecto negativo que se genera en este subsistema, son los golpes de ariete por la acumulación de condensado, corrosión por la presencia de agentes erosivos y fugas de vapor (*Distribución de Vapor - SpiraxSarco, s. f.*).

- **Subsistema de recuperación de condensado**

Después de ceder la energía necesaria, el vapor se convierte en condensado y vuelve al generador, completando así el ciclo. Es importante resaltar que este condensado es agua purificada y tratada, con un contenido energético considerable. Recuperar este condensado puede reducir los costos de generación de la planta reduciendo el consumo de combustible entre un 10 y 20%. Incluso si se limpia las impurezas del condensado, este se puede usar como agua de alimentación para la caldera creando una ventaja en la recuperación del mismo (TLV, 2023c). El condensado que no logra regresar y se queda en las líneas de vapor debe ser evacuado de alguna manera, por lo que las trampas de vapor se encargan de la remoción, contribuyendo al uso eficiente del vapor.

Trampas de vapor

Para evacuar el condensado del sistema se usa elementos denominados como trampas de vapor. El propósito de estos dispositivos es establecer un límite entre vapor y condensado, abriéndose cuando se detecta condensado, por lo cual lo elimina y

cerrándose cuando detecta vapor para que este continúe a través de las líneas de vapor (*Balance Energético Nacional – Ministerio de Energía y Minas, 2021*).

La trampa de vapor al evacuar gases no condensables ayuda en la prevención de la corrosión de los equipos, así como el ensuciamiento de las tuberías (Valles Cruz et al., 2014). Esto genera un ahorro energético y contribuye a un ambiente más limpio y saludable al ayudar a las empresas a gestionar la energía de manera eficiente. A medida que una trampa de vapor se desgasta, su eficiencia disminuye, lo que resulta en un uso ineficiente de la energía

Las trampas de vapor se catalogan según el modo de apertura o de cierre de la trampa, según su modo de operación. Encontramos tres trampas: mecánicas, termostáticas y termodinámicas (TLV, 2023a).

- **Trampa de vapor mecánica**

Basa su principio de funcionamiento en la diferencia de densidad entre el condensado y el vapor. Al interior de la trampa de vapor se encuentra un flotador que realiza el cierre o apertura de la válvula. Por la densidad, el condensado permanece en la parte inferior de la trampa y el vapor en la superior (Capehart et al., 2011).

Estas trampas de vapor se usan en aplicaciones donde las presiones son elevadas y el estado del vapor como sobrecalentado (Palacios Jose Luis, 2010). Una ventaja de estas trampas es que son inmunes a factores externos, con capacidad de ajuste preciso al flujo de condensado requerido (TLV, 2023b).

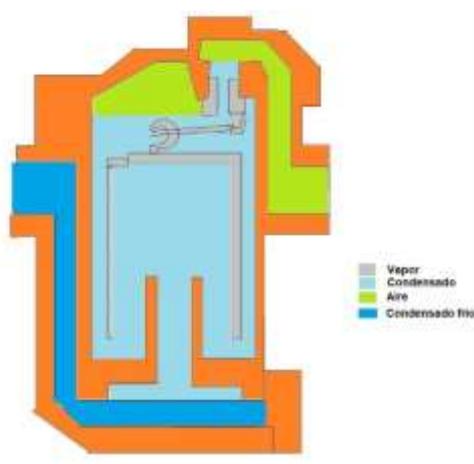


Figura 1.2. Trampa de vapor mecánica de cubeta invertida

Fuente: Adaptado de (TLV, 2023b)

En esta clasificación de las trampas de vapor encontramos una subclasificación: trampas de flotador, las más comunes. La trampa de vapor de cubeta invertida se puede observar en la Figura 1.2.

- **Trampa de vapor termostática**

A diferencia de las trampas de vapor mecánicas, esta trampa tiene su principio de funcionamiento entre la diferencia de temperatura entre el vapor y el condensado. La forma de apertura y cierre de estas trampas viene dado por la expansión y contracción de un elemento bimetálico que se encuentra en su interior en contacto con el condensado o vapor (Palacios Jose Luis, 2010).

Las trampas tienen ventajas como una operación confiable en un rango amplio de presiones, gran capacidad para gestionar cambios en el condensado, liberación rápida de aire al ambiente y evacuación del condensado del sistema (Christopher M. R. A. Poczka, 2012).

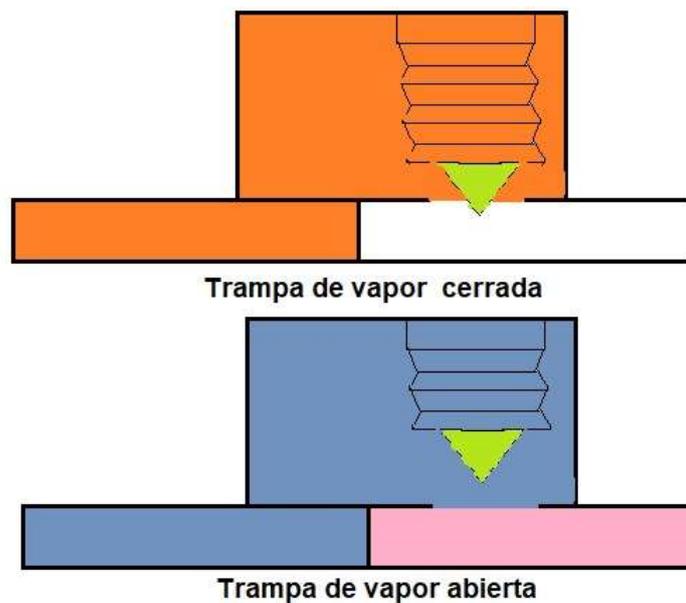


Figura 1.3. Trampa de vapor termostática bimetálica

Fuente: Adaptado de (I programa de Eficiencia Energética Industrial de, 2018)

En la Figura 1.3, se puede encontrar una trampa termostática bimetálica en su configuración abierta y cerrada.

- **Trampa de vapor termodinámica**

Este tipo de trampa es única. Su principio de funcionamiento no solo se fundamenta en la variación de un solo parámetro, esta trampa opera cuando varían factores como presión y velocidad de salida del condensado y vapor. Aunque el funcionamiento de esta trampa es intermitente.

Se identifica por operar con varias presiones, alta capacidad de almacenamiento de condensado, trabajar con vapor sobrecalentado sin peligro de sufrir averías por el golpe de ariete. Algunas de las desventajas de esta trampa de vapor es su poca eficiencia en ambientes exteriores, cuando existe una contrapresión con la mitad de la magnitud de presión de entrada dificulta la descarga de condensado y usa pequeñas cargas de condensado (Palacios Jose Luis, 2010).

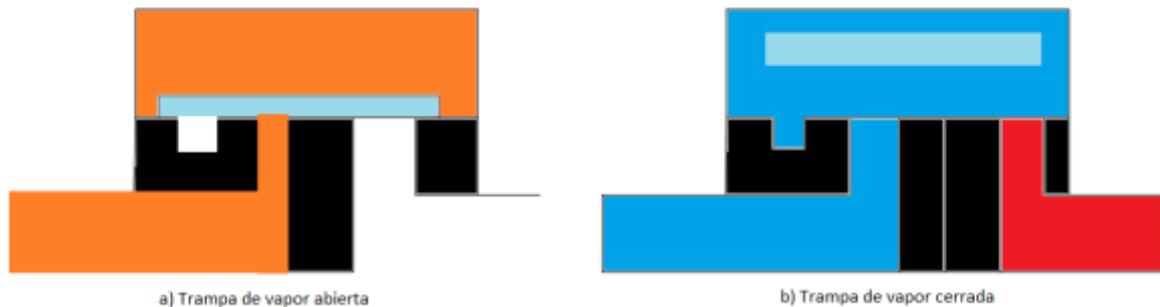


Figura 1.4. Trampa de vapor termodinámica de disco

Fuente: Adaptado de (I programa de Eficiencia Energética Industrial de, 2018)

En la Figura 1.4, se observa el esquema de una trampa termodinámica de disco.

Modos de fallo

Las trampas de vapor presentan tres principales modos de falla. El primer modo de falla se trata de una falla abierta la cual produce una descarga ruidosa y fuga de vapor visible. El segundo modo de falla trata sobre las fallas cerradas, que es cuando el mecanismo de activación de la trampa se bloquea y no cumple con su función. Por último, se tiene las fallas externas que se dan a la entrada o salida de la trampa como fallas de los empaques que provoca una fuga de vapor. Todas las fallas provocan un alto costo en la producción debido a pérdida de eficiencia energética (Christopher M. R. A. Poczka, 2012).

- **Fallas en trampas termodinámicas**

Las condiciones medioambientales juegan un papel importante en el desgaste de este tipo de trampa, porque pueden afectar la operación y el ciclo. Por ejemplo, cuando la temperatura medioambiental es grande, la trampa ciclará raramente, en contraste, cuando la temperatura medioambiental es baja la trampa tiende a ciclar con mayor frecuencia. Para evitar estos extremos en el funcionamiento, las trampas se recubren con aislantes en la tapa roscada superior para evitar la transferencia de calor debido a la diferencia entre la temperatura medioambiental con la temperatura de la cámara de control. (Rivas-España, 2006).

- **Fallas en trampas termostáticas**

En teoría este modelo de trampa no debería perder vapor en condiciones normales de operación. Aunque, su causa más común de fallo se da cuando el fuelle presenta una fuga. Esto provoca que deje de funcionar y pueda expandirse o cerrarse, provocando que la trampa permanezca abierta permitiendo un paso libre al vapor puro. Otra falla es la pérdida de vapor indirectamente por la acumulación excesiva de condensado en la parte inferior donde no cuenta con aislante para protegerlos de la temperatura ambiental (*Trampas de vapor termostáticas*, 2020).

- **Fallas en trampas mecánicas**

Las fallas en este tipo de trampa se presentan cuando en flujo dinámicos las burbujas de vapor pueden pasar a través del agua. Por lo cual, muchos fabricantes colocan válvulas purgantes, sin embargo, se crea otro medio para la fuga del vapor. Además, este tipo de trampas tiene el mayor índice de pérdidas de vapor indirectamente por su tamaño. Para reducir estas pérdidas la trampa debe estar completamente aislada.

Como dato adicional las pérdidas de vapor cuando se encuentra sin carga la trampa son de aproximadamente 0.5 kh/hr, aunque puede cambiar dependiendo de las condiciones ambientales y estado de la trampa. (Christopher M. R. A. Poczka, 2012)

Métodos de inspección

En el ámbito industrial, se identifican fallas recurrentes en las trampas de vapor, manifestadas en su operatividad en estado abierto, parcialmente abierto o cerrado, así como por deficiencias derivadas de la falta de mantenimiento. En otras palabras, este escenario propicia la acumulación de condensado en el sistema de vapor, lo que reduce

significativamente la eficiencia operativa por un calentamiento inapropiado del proceso. En situaciones de fallas en estado abierto, se origina una significativa pérdida debido a fugas de vapor en funcionamiento. Esto conlleva a pérdidas económicas asociadas a los costos de la producción de vapor. Además, impacta en la seguridad y la integridad del proceso, ya que la acumulación de vapor eleva la temperatura ambiente, potencialmente ocasionando quemaduras (Sosa Daza, 2013).

Es esencial adoptar múltiples enfoques de inspección para comparar y analizar el desempeño de las trampas de vapor y desarrollar un plan y procedimiento de monitoreo. Se destacan métodos de inspección que incluyen evaluaciones visuales, térmicas, acústicas, de vibraciones y basadas en tecnología electrónica (Capehart et al., 2011).

- **Método de inspección visual**

Este método se distingue por la observación del vapor liberado hacia la atmósfera. Su aplicación se limita al análisis en sistemas abiertos y requiere que el inspector tenga la capacidad de distinguir entre vapor instantáneo o revaporizado (TLV, 2023b). En otras palabras, la presencia de cantidades significativas de vapor activo o la falta de descarga son indicios que permiten identificar si la trampa falla en condiciones abiertas o cerradas.

- **Método de inspección térmico**

Este método se encarga de medir las temperaturas de la entrada y la salida que se presenta en la trampa de vapor. Los elementos que se usan para realizar la medición son sensores de visor infrarrojo, pirómetro, termopar, o cámaras termográficas. Sin embargo, la técnica es poco confiable, dado que la medición se afecta si se considera que la temperatura de vapor saturado y condensado presentan resultados similares (Diaz et al., 2015).

- **Método de inspección ultrasónico**

Al pasar por un orificio estrecho, el fluido genera vibraciones audibles de alta frecuencia. Debido a sus características es imperceptible para el oído humano. El tipo de sonido varía según el comportamiento del fluido por lo cual, se puede encontrar interferencias en el funcionamiento. Los detectores ultrasónicos funcionan mediante sondas de contacto que convierten las señales ultrasónicas en señales eléctricas y luego las traducen a sonidos audibles medidos en decibeles dB. Estos resultados se registran y procesan para obtener una curva que muestra el comportamiento de la trampa en términos de dB a lo largo del tiempo (Capehart et al., 2011).

- **Método de inspección vibracional**

Se basa en la detección de fallas a través de los niveles de vibración. Para aplicarla de forma efectiva y obtener conclusiones representativas y validas hay que conocer datos del sistema como la presión del sistema, el tipo de trampa de vapor, etc. y elegir los puntos correctos para medirla.

Principios de inspección con el método vibracional

La vibración se define como una magnitud que describe el movimiento o posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menos que cierto valor promedio de referencia (Ayabaca Sarria et al., 2022). Este concepto también es aplicado en el mantenimiento predictivo como al mantenimiento correctivo. Para que se pueda aplicar correctamente este método se debe tener un historial del comportamiento de la trampa de vapor a diferentes condiciones de operación, para comparar y detectar algún comportamiento anómalo tan solo con analizar el espectro de vibración.

- **Análisis en el dominio del tiempo**

Las gráficas de vibración en el tiempo no es más que la señal representando gráficamente de la amplitud de las vibraciones en el eje de las ordenadas en función del tiempo en el eje de las abscisas. Esta señal contiene todas las frecuencias armónicas y sub-armónicas que se generan durante los procesos de medición (Marín, 2012). Al representar todas las frecuencias en un gráfico, se producen curvas sin identificar fácilmente cuáles aportan información, convirtiendo a este análisis en desventaja del método vibracional.

- **Análisis en el dominio de la frecuencia**

Como se menciona anteriormente, el problema de analizar los datos de vibración en el dominio del tiempo es el nivel de ruido que existe, por tanto, para dar solución a este problema, las señales se codifican en una combinación de ondas senoidales, transformando a una línea vertical en el dominio de la frecuencia, es decir, el eje de las abscisas ahora representa a la frecuencia. La forma pura de la onda de vibración contiene una gran cantidad de información que en la mayoría de los casos no es relevante. Esta información suele ser importante para indicar un problema que está comenzando como la mala funcionalidad de un rodamiento en alguna parte del sistema (White, 2010).

$$(\omega) = F(f(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

Ecuación 1.1. Transformada de Fourier

Para convertir las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia se hace uso de la transformada de Fourier, la cual genera un espectro en función de la frecuencia $F(\omega)$ y se fundamenta en la Ecuación 1.1 (Rao, 2012)

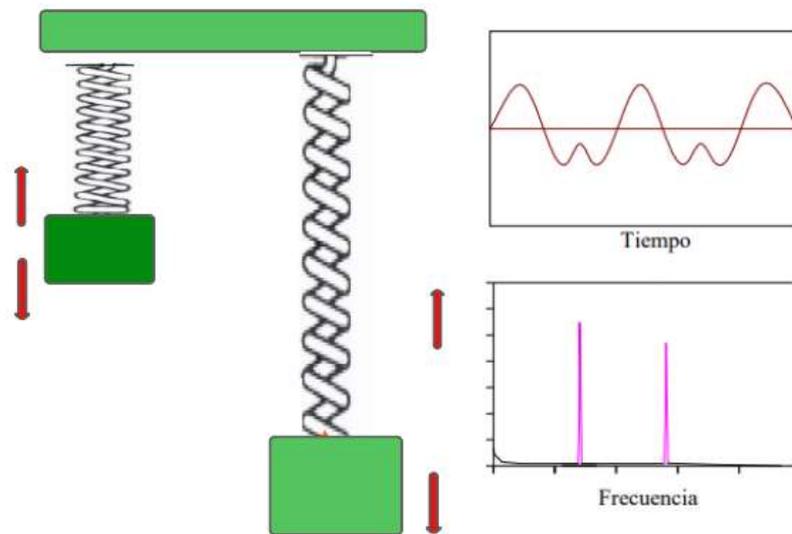


Figura 1.5. Ejemplo entre dominio del tiempo y dominio de la frecuencia

Fuente: Adaptado de (White, 2010)

Estos diagramas en función de la frecuencia adquieren el nombre de FFT. En el ámbito de operación industrial, los diagramas poseen en un solo pico que representa la frecuencia natural. Si logra existir más de un pico, se traduce como en una falla del sistema. De algunos estudios publicados se concluye que, en bajas frecuencias, se detecta de mejor manera el desgaste (Ayabaca Sarria et al., 2022). En la Figura 1.5, se encuentra un ejemplo comparativo entre las gráficas de dominio del tiempo y dominio de la frecuencia.

Modelamiento matemático a través de simulación numérica

La simulación numérica de sistemas es una herramienta muy usada en ingeniería, ya que permite cubrir el salto entre la formulación teórica de un problema y el modelo experimental permitiendo comprobar la bondad de determinadas aproximaciones realizadas en la formulación de sistemas, investigar sistemas con variables relacionadas entre sí, entre otras (Piñero, 2007).

Existen varios softwares que permiten simular modelos físicos, sin embargo, para fines del proyecto se usará el software ANSYS, que es una herramienta poderosa para modelar y analizar el comportamiento de fenómenos físicos. Al utilizar métodos numéricos avanzados

logra predecir cómo se comportarán y responderán los modelos físicos ensayados a diversas condiciones de operación. Este software gracias a sus amplias herramientas es ampliamente usado en industrias ya que ha permitido disminuir costos, volver más eficiente los sistemas y solucionar problemas en las primeras etapas del diseño.

- **Análisis modal**

El análisis modal es un análisis dinámico fundamental, cuya función es determinar las frecuencias naturales las que una estructura entrara en resonancia. Y estas frecuencias son de gran importancia en ingeniería debido a que ayudan a entender y mejorar factores como la integridad estructuras, el diseño y optimización de componentes y ayuda al control de vibraciones. Por poner un ejemplo, las suspensiones de los vehículos suelen estar ajustadas en función de la configuración de un vehículo. Un vehículo deportivo no tendrá la misma frecuencia natural que un vehículo utilitario familiar. En el caso de las estructuras como los edificios, la importancia de calcular la frecuencia natural de los edificios o casas es para evitar que las ondas sísmicas producidas durante un movimiento telúrico coincidan con la frecuencia natural de los edificios (Ewins, 2009).

2 METODOLOGÍA

La metodología para este proyecto de integración curricular se divide en tres partes: inspección vibracional de las trampas de vapor en los distintos ámbitos industriales, simulación de la trampa termodinámica de disco para encontrar su frecuencia natural y, finalmente, compararla con el método ultrasónico.

Como primer paso del proyecto, se investigó las trampas de vapor con el método vibracional en una planta industrial de alimentos de la capital y en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología por sus siglas DECAB, de la facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. En esta última planta se logró la inspección de una trampa de vapor termodinámica de disco y una trampa de vapor termostática. Por otro lado, se omitió el nombre de la planta industrial de alimentos por temas de seguridad y confidencialidad del proceso que manejan. En esta planta manejan los mismos tipos de trampa que en el DECAB, con un adicional de una trampa de flotador y termostato. El proceso de medición en esta planta de alimentos se dio en pleno funcionamiento de los procesos productivos.

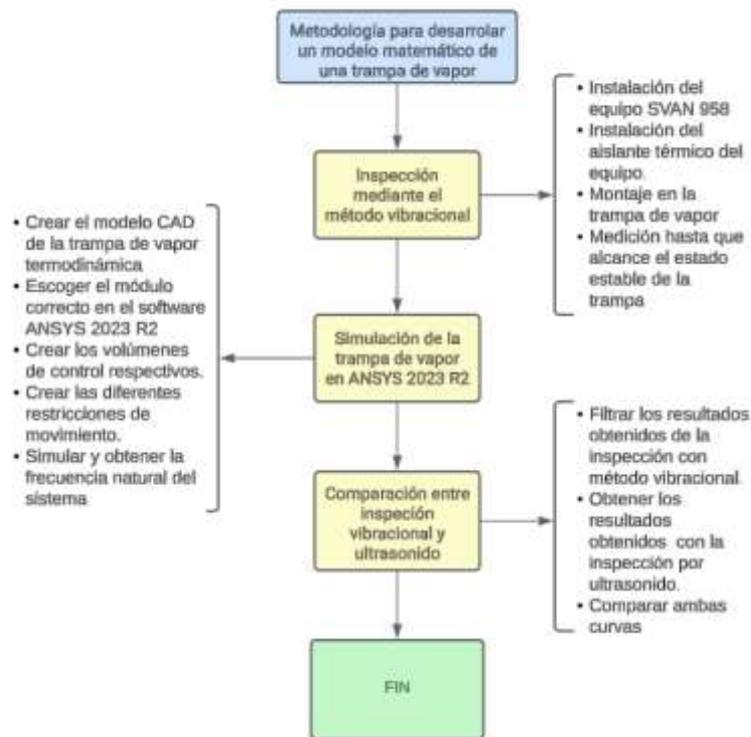


Figura 2.1. Esquema de la metodología planteada

Fuente: [Propia]

Como segundo punto se realiza una simulación en el software ANSYS 2023 R2 de la trampa de vapor termodinámica de disco que se encuentra en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología mediante el módulo de análisis modal del programa para encontrar la frecuencia natural de la trampa de vapor estudiada. Esto funciona para verificar la validez de los resultados logrados mediante la inspección del método vibracional de la trampa.

Finalmente, se analizan los resultados identificando los ciclos de apertura y cierre de la trampa de vapor. Además, de comparar los resultados que se obtuvieron con los resultados del método ultrasónico y los resultados obtenidos por la inspección del método vibracional. Una vista más organizada de la metodología del proyecto se puede observar en la Figura 2.1.

2.1 Inspección mediante el método vibracional

Como el apartado lo indica, en esta parte se describe como fue el proceso de medición en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología DECAB y en la Planta Procesadora de Alimentos ubicada en Pifo. Así como las consideraciones necesarias para proteger al sensor medidor de vibraciones de la alta temperatura que produce estos equipos.

Instalación del equipo SVAN 958



Figura 2.2. Equipo analizador de vibraciones SVAN 958

Fuente: [Propia]

Para la medición de las vibraciones se usó el equipo analizador de vibraciones SVAN 958 que lo fabrica la empresa SVANTEK. Es un equipo de cuatro canales completamente digital que cumple con la norma ISO 8041. Como se puede observar en la Figura 2.2, se encuentra el equipo SVAN 958.

Algunas de las ventajas de este equipo es su gran sensibilidad ante la vibración, además, cuenta con gran facilidad para el análisis de los datos, debido a que todos los datos almacenados pueden ser descargados al computador mediante la conexión USB («SVAN 958A - Medidor de Sonido y Vibraciones de Cuatro Canales», s. f.).

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas e información general SVAN 958

Normativa	ISO 8041:2005, ISO 2631-1 y 2 e ISO 5349-1 y 2), ISO 10816 Conforme con el Real Decreto 1311:2005
Parámetros	RMS, VDV, MTVV, Pico, Pico-Pico, Max, Min, Historia temporal
Detectores RMS y RMQ	Detectores RMS & RMQ digitales con detección de pico, resolución 0.1dB, Constante de tiempo: de 100 ms a 10 s
Rango de medida	0.003 m/s ² RMS÷1000 m/s ² Pico (con el acelerómetro para cuerpo entero SV 39A/L)
Nivel de Ruido	Inferior a 0.1 mms ⁻² RMS con ponderación Wm
Entrada	14 canales (1-3: conector Lemo 4 pines; 4: conector TNC) con alimentación IEPE para acelerómetros o preamplificadores de micrófono
Rango dinámico	100 dB, 4 conversor A/D de 20 bits
Rango de frecuencias	0.5 Hz a 20 kHz (dependiendo de los transductores de entrada), frecuencia de muestreo: 51.2 kHz
Pantalla	LCD 97 x 32 píxeles e iconos retroiluminados
Interfaz	32MB o 64MB (opcional) no volátil (flash)
Condiciones ambientales	Temperatura: -10°C hasta 50°C Humedad: hasta 90% HR, sin condensación
Peso	Aproximadamente 500 gramos con pilas

Fuente: Adaptado de («SVAN 958A - Medidor de Sonido y Vibraciones de Cuatro Canales», s. f.)

Las características más generales e importantes del equipo se detallan en la Tabla 2.1.

Para complementar al equipo analizador de vibraciones, se instaló el software SVAN PC++ en la computadora. Este programa permite visualizar las gráficas obtenidas en los tres ejes de coordenadas y un amplio rango de frecuencias que van de 0.8 Hz a 20000 Hz. Además, gráfica de forma automática los valores máximos de aceleración transitoria MTTV y los valores totales de vibración AW.

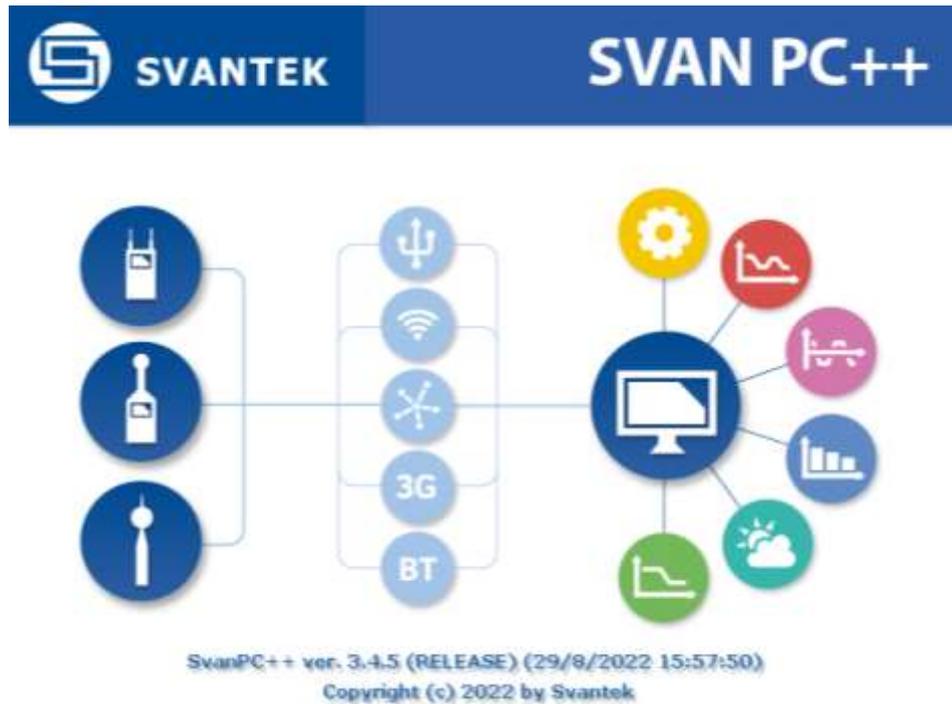


Figura 2.3. Interfaz de programa SVAN PC++

Fuente: [Propia]

En la Figura 2.3, se puede observar la carta de presentación del programa desarrollado por la empresa SVANTEK, la misma que es fabricante del equipo para la inspección de vibración.

Construcción de Aislante para el equipo

Como circula vapor sobrecalentado y condensado por la trampa de vapor, por convección adquiere una temperatura superior a los 80° C. Esta temperatura es sumamente perjudicial para el sensor piezoeléctrico, ya que al no ser un sensor de alta temperatura y al encontrarse expuesto a temperaturas mayores a 40 °C puede sufrir daños irreparables. Por lo cual, se justifica la necesidad de la construcción de un aislante, que debe cumplir con el

requerimiento de ser continuo para que las vibraciones no pierdan forma ni intensidad y que aislé la temperatura.

Con el uso de las siguientes fórmulas de transferencia de calor por transmisión por conducción (Incropera & DeWitt, 1999) se puede saber con precisión la temperatura que tendrá la superficie en donde se asentará el sensor piezoeléctrico.

$$R_{cond} = \frac{L}{kA}$$

Ecuación 2.1. Resistencia térmica por conducción

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

Donde:

L: Espesor del material, m

K: Conductividad térmica del material, $\frac{W}{m \cdot K}$

A: Área, m^2

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A}$$

Ecuación 2.2. Resistencia térmica por convección

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

Donde:

h: Coeficiente de convección, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

Como primer paso, se debe obtener las resistencias térmicas de cada elemento a través de la Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2

$$R_{equiv} = R_{cond} + R_{conv}$$

Ecuación 2.3. Resistencia térmica equivalente

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

Sumando las resistencias obtenidas, se encuentra una resistencia térmica equivalente mediante la Ecuación 2.3

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{equiv}}$$

Ecuación 2.4. Calor perdido por unidad de área.

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

Donde:

\dot{q} : Calor expresado en unidad de área, $\frac{W}{m^2}$

ΔT : Diferencia de temperatura entre el ambiente y la superficie de la trampa de vapor

Además, se calculó la cantidad de calor producido que se pierde a través del aislante con la ayuda de la Ecuación 2.4. Para encontrar la temperatura a la que estará el sensor piezoeléctrico se despeja de la Ecuación 2.4 quedando lo siguiente:

$$T_2 = T_1 - \dot{q} * R_{equiv}$$

- **Montaje del aislante**

Con los datos obtenidos por las ecuaciones mencionadas anteriormente, se procedió a realizar la construcción del aislante con una variedad de materiales como lo es acero inoxidable de pulgada un cuarto de diámetro y cinco centímetros de grosor, una plancha de acero A36 de 12 cm de largo, un imán de neodimio de 30 mm de diámetro por 2 mm de grosor, aislante automotriz para preservar la seguridad de las personas al manipular este objeto y pegamento Loctite Super Bonder de precisión que resiste temperaturas desde -50 °C hasta +120° C, además cumplir con la norma EN204-D3 de resistencia al agua (LOCTITE, 2024).

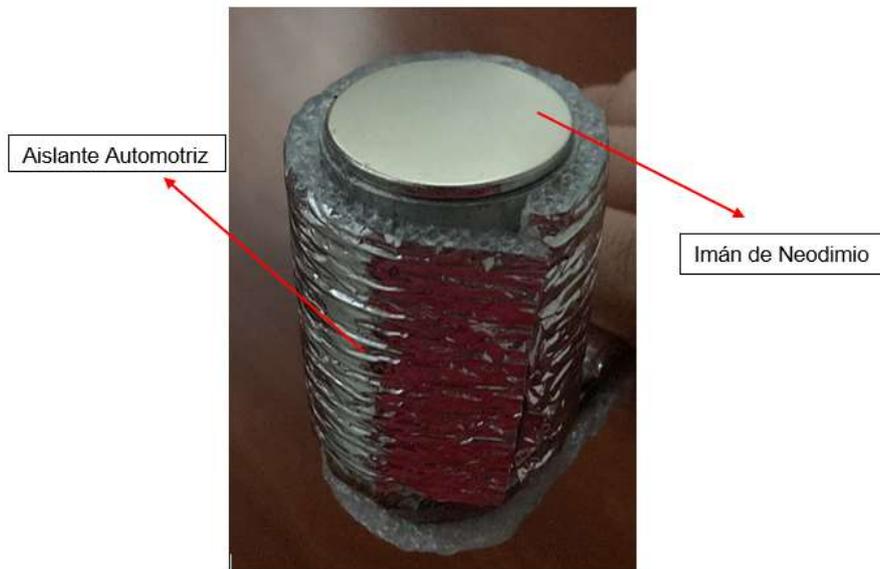


Figura 2.4. Esquema de la superficie inferior del aislante.

Fuente: [Propia]

En la Figura 2.4, se observa el imán de neodimio adaptado para que el aislante actúe sobre las superficies metálicas que se encuentran en la mayoría de las trampas de vapor.



Figura 2.5. Esquema de la superficie superior del aislante.

Fuente: [Propia]

En la Figura 2.5, se observa la parte superior del aislante. Como destaca en el extremo izquierdo destaca un saliente sin aislante automotriz. Esto porque ese lugar está designado para colocar el sensor para inspeccionar las vibraciones de la trampa de vapor.



Figura 2.6. Verificación de la temperatura superficial con cámara termográfica

Fuente [Propia]

En la Figura 2.6, se observa una prueba de verificación de la temperatura de la superficie para proteger al sensor y que este no supere el rango de temperatura de trabajo permitido.

Medición en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología, DECAB

El DECAB cuenta con un sistema de vapor de generación, el cual se encarga un calderín eléctrico trifásico de una potencia nominal de 18 kw que puede alcanzar una presión máxima de trabajo de 6 bar. Un sistema de distribución realizado por tubos anclados al techo y por último el sistema de consumo que viene dado por los equipos del laboratorio como las marmitas, hornos y destiladores. En esta planta de inspecciono dos equipos mediante el método vibracional.

El primer equipo analizado fue una marmita marca HAMILTON tipo balde, con un sistema de volteo para descarga del contenido con una capacidad de 40 litros de agua. En este equipo se encuentra una trampa termodinámica de disco marca SpiraxSarco de media pulgada de diámetro de modelo TD 52 MLC. Por último, se toma en cuenta la temperatura inicial del agua que fue de 19 ° C y la temperatura final fue de 91°C.



Figura 2.7. Marmita Hamilton y Trampa de vapor SpiraxSarco

Fuente: [Propia]

En la Figura 2.7, se observa el equipo en el cual se realizó la medición junto a la trampa de vapor mencionada.

El segundo equipo inspeccionado fue un destilador que purifica el agua corriente que llega a la planta piloto del DECAB para las prácticas de laboratorios. Este equipo cuenta con un reductor de presión a la entrada, garantizando una presión de trabajo alrededor de 2 bar. La temperatura inicial del agua fue de 19 °C que es la temperatura promedio del agua de la red potable de Quito, por último, la temperatura de ebullición fue alrededor de los 91°C. El equipo cuenta con una trampa termodinámica bimetálica marca SpiraxSarco de media pulgada de diámetro.

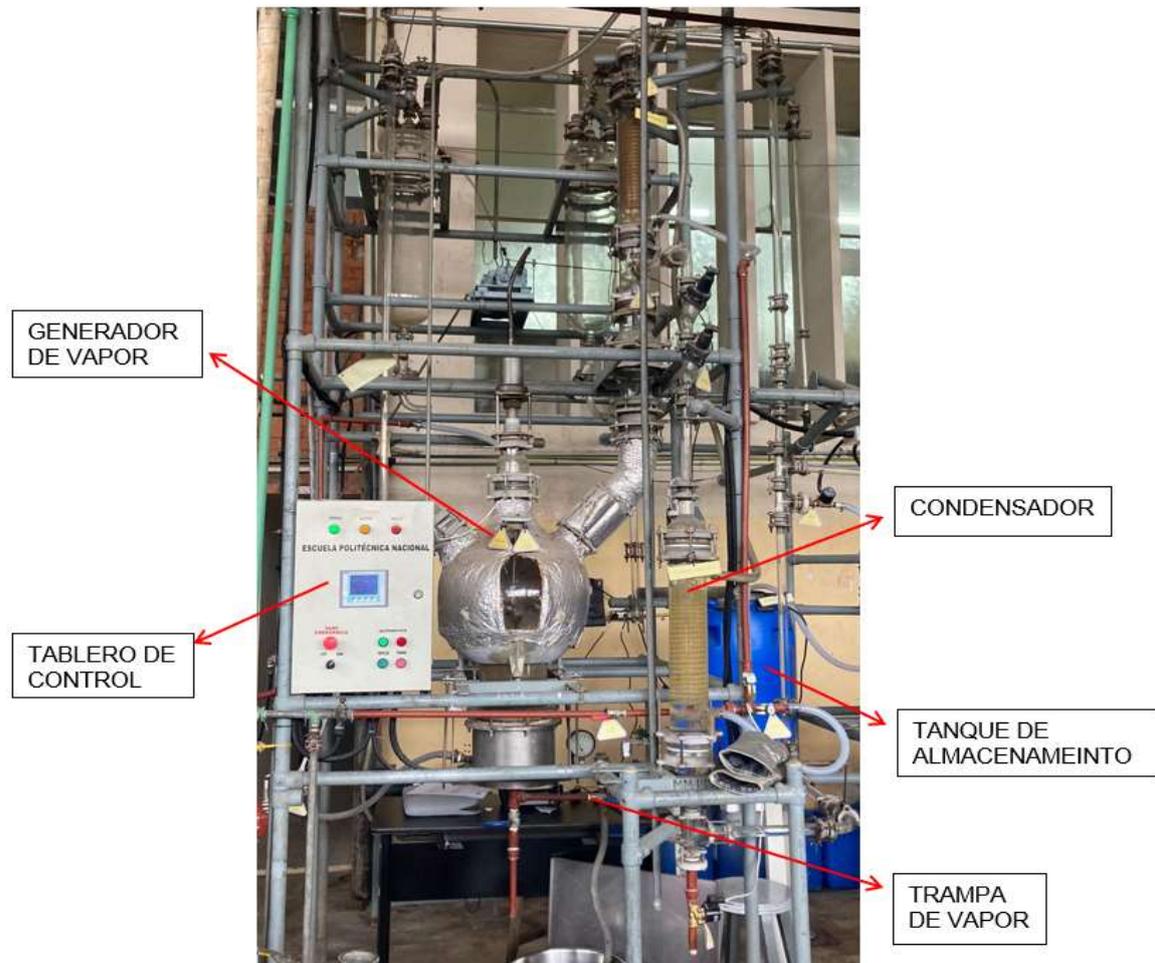


Figura 2.8. Destilador de agua de la Planta Piloto del DECAB

Fuente: [Propia]

En la Figura 2.8, se observa el equipo instalado en la Planta Piloto del DECAB con la identificación de cada una de sus partes.



Figura 2.9. Trampa de vapor termostática bimetalica SpiraxSarco.

Fuente: [Propia]

En la Figura 2.9, se observa la trampa de vapor termostática en la que se realiza la inspección vibracional.

Los resultados de la inspección realizada mediante método vibracional se pueden encontrar en el ANEXO 1



Figura 2.10. Proceso de medición en la trampa termostática bimetalica del destilador

Fuente: [Propia]

En la Figura 2.10, se puede observar el proceso de medición en el destilador de la Planta Piloto del DECAB. Se puede notar como actúa el aislante para proteger al sensor de las altas temperaturas que adquiere la trampa durante su funcionamiento.

En la segunda parte de las mediciones necesarias para este trabajo de integración curricular, se procede a realizar la inspección en las trampas de una industria de alimentos ubicada en Pifo. La característica de esta planta es su sistema de producción de vapor, que a diferencia de la Planta Piloto del DECAB es su sistema de recuperación de condensado.

En esta planta se instala una caldera de marca HURST de 250 BHP de cerca del 85 % de eficiencia que sirve en equipos como marmitas para producir jamones y en hornos para producir salchichas. En esta industria no se pudo tomar fotos de las trampas ni de los equipos debido a la alta confidencialidad que se maneja dentro de los procesos productivos de la empresa.

Tabla 2.2. Características trampas de vapor de la industria alimenticia

Localización	Tipo	Marca	Modelo	Diámetro de conexión (pulg)	Tiempo de muestra (min)
Horno HNHO-3000	Trampa de flotador y termostato	SPIRAX SARCO	FT14HC	1	12
Horno HNHO-3000	Trampa de flotador y termostato	Placa borrada	No se pudo identificar	1	25
Marmita HNMA 4000_1	Trampa termodinámica	GENEBRE	GENEBRE 2282	3/4	12
Marmita HNMA 3000_2	Trampa de balde invertido	GENEBRE	GENEBRE 2282	3/4	12
Horno HNHO_1000	Trampa de balde invertido	TLV	J5X-10A	1	12
Fin de Línea	Trampa de balde invertido	TLV	J5X-10A	1	12

Fuente: [Propia]

En la Tabla 2.2, se observa las características de las trampas que fueron inspeccionadas en la planta de alimentos.

Los resultados de las inspecciones a este conjunto de trampas de vapor se pueden observar en el ANEXO 2.

2.2 Simulación de la trampa termodinámica

El siguiente paso para validar los resultados experimentales, es simular una trampa de vapor que se sepa este funcionamiento correctamente. Para ellos, se escoge la trampa de vapor termodinámica de disco que se encuentra implementada en la marmita de la Planta Piloto del DECAB. El primer paso es construir el CAD 3D de dicha trampa.

En la página de TLV se encuentra el CAD 3D, pero este modelo está incompleto porque solo se encuentra el externo. Y, para poder simular de manera correcta se debe construir la geometría interior, donde las medidas se encuentran en el manual del fabricante de la trampa de vapor (TLV, 2022).

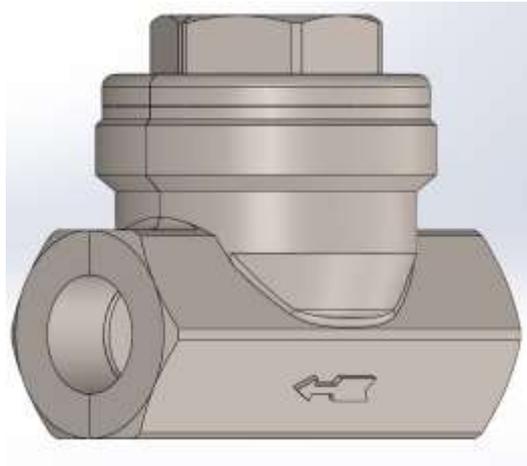


Figura 2.11. Modelo CAD de trampa de vapor termodinámica de disco.

Fuente: [Propia]

Como se puede observar en la Figura 2.11, está el modelo CAD de la trampa de vapor termodinámica de disco simulada en el software ANSYS 2023 R2. Los detalles internos de la trampa junto con el disco del interior se encuentran en el ANEXO 3.

Modelo Matemático de la trampa de vapor

El software con la trampa de vapor es el ANSYS 2023 R2 por su capacidad de reproducir fenómenos físicos con gran precisión. Para comenzar con esta simulación se escoge el

módulo correcto que en este caso es el análisis modal, el cual encuentra los efectos de las vibraciones, por lo cual se debe definir parámetros como material, geometría, rigidez, entre otros (*Análisis modal*, s. f.).



Figura 2.12. Interfaz del programa ANSYS 2023 R2.

Fuente: [Propia]

Como se puede ver en la Figura 2.12, este software proporciona todas las ventanas para definir la mayor cantidad de parámetros, con la finalidad que el resultado final sea lo más apegado a la realidad.

Como en la trampa de vapor se tiene diferentes componentes, se debe especificar los materiales de cada uno. El cuerpo de la trampa está fabricado en base a un acero ASTM A582 con una densidad de $7.9 \frac{g}{cm^3}$ (*ASTM A582 Grade 303Se Annealed*, s. f.). Y el disco al interior de la trampa está construido con un acero ASTM A743 con densidad $7.7 \frac{g}{cm^3}$ (*ASTM A743 Grade CA6NM Heat-Treated*, s. f.).

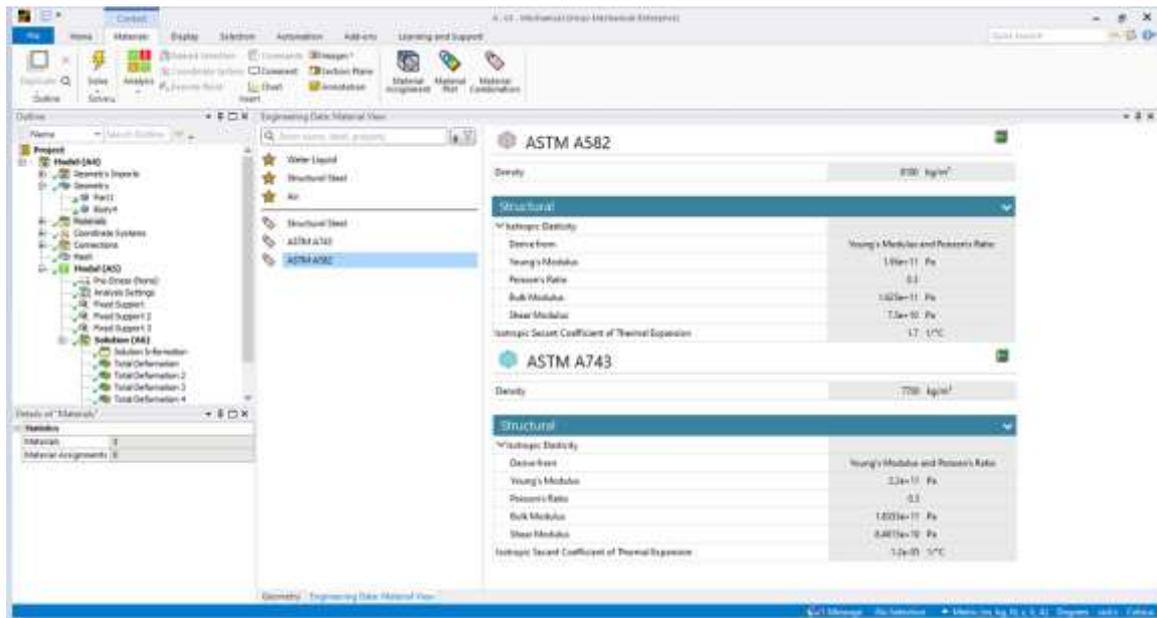


Figura 2.13. Materiales seleccionados para la trampa de vapor.

Fuente: [Propia]

Como se puede observar en la imagen Figura 2.13, se encuentra el programa ANSYS 2023 R2, donde se agrega los materiales respectivos para cada cuerpo de la trampa. Los datos técnicos más importantes son la densidad, módulo de elasticidad y módulo de Poisson que se deben insertar en el programa para replicar el modelo físico.

Para procurar comparar correctamente los resultados se realizó, tres simulaciones para observar el comportamiento en los tres ejes de movimiento, por lo que se restringió el movimiento según la que se esté realizando.

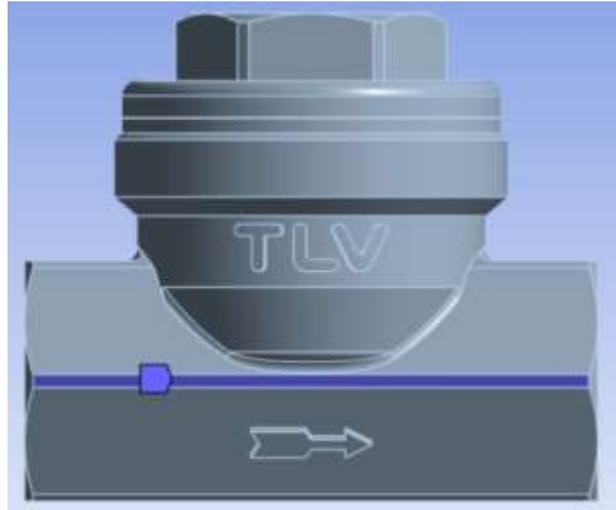


Figura 2.14. Restricción de movimiento en la simulación

Fuente: [Propia]

Como se puede ver en la Figura 2.14, la línea pintada de morado representa la restricción de movimiento en esa dirección

Finalmente, cuando finalice el modelamiento matemático en el programa ANSYS 2023 R2, la simulación esta lista para ejecutarse.

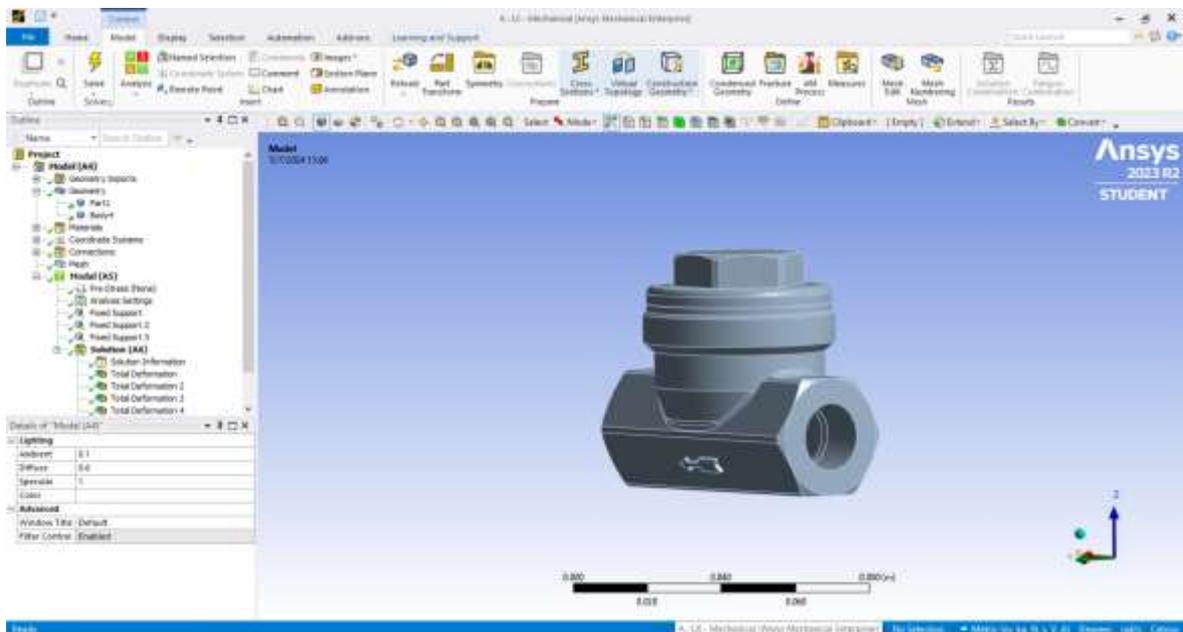


Figura 2.15. Modelo final de la simulación.

Fuente: [Propia]

Como se ve en la Figura 2.15, el modelo final de la simulación tiene todos los parámetros que el análisis modal requiere.

2.3 Comparación con los resultados por método ultrasónico.

Para poder comparar los resultados obtenidos por inspección vibracional, se debe filtrar los datos obtenidos. Por las características del equipo analizador de vibraciones, la gráfica esperada es ruidosa en cuanto a contenido. Es decir, existen demasiadas curvas en una misma gráfica, impidiendo que el análisis sea eficiente y adecuado.

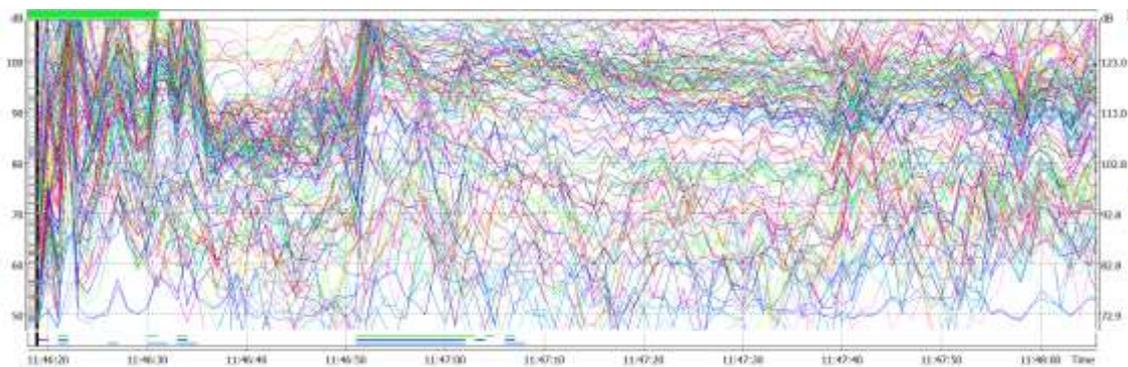


Figura 2.16. Ejemplo de grafica obtenida por el equipo SVAN 958.

Fuente: [Propia]

Como se observa en la Figura 2.16, es sumamente complicado analizar una gráfica así. Por tanto, se espera que, con el resultado de la simulación, se pueda filtra al programa de acuerdo a las necesidades de los resultados. Dándose, una filtración por ejes, frecuencias y aceleración máxima como transitoria.



Figura 2.17. Ejemplo de señal filtrada.

Fuente: [Propia]

Una vez que se filtró los resultados, se comparó con los obtenidos por método ultrasónico. Esto es válido porque las inspecciones se realizaron simultáneamente en las trampas de vapor. En la Figura 2.17, se observa un ejemplo de una señal de vibraciones filtrada adecuadamente.

Como las gráficas de ultrasonido están en magnitud de los decibeles en el tiempo, se debe aplicar la transformada de Fourier a los datos obtenidos de vibración, que cabe resaltar estos se obtienen en magnitud de m/s^2 y se necesita transformar a la escala de decibeles.

Otro factor de comparación a tomar en cuenta es la dirección en la que se inspeccionó por ultrasonido, ya que se espera que en la misma dirección la inspección por vibraciones debe arrojar un resultado similar.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En la siguiente sección se presenta los resultados experimentales y simulaciones realizados para el fin de este proyecto. Se divide en tres puntos, siendo el primero un análisis de los resultados de la simulación para cada eje de movimiento encontrando la frecuencia característica y realizando una filtración con este valor en los resultados experimentales. En el segundo punto se analizan netamente las vibraciones obtenidas experimentalmente para cada eje y en conjunto. Y, por último, se realiza una comparación de las gráficas obtenidas mediante el método ultrasónico y medición de caudal con las gráficas alcanzadas por el método vibracional.

Resultados de simulación

La simulación se realizó con base en los datos de la ficha técnica de la trampa de vapor termodinámica que se encuentra en la marmita en la planta piloto del Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología ubicado en la facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. Se realizaron tres simulaciones para obtener resultados en los ejes X, Y y Z, con el fin de compararlos con los datos obtenidos de la simulación experimental como se puede ver a continuación.

- EJE X

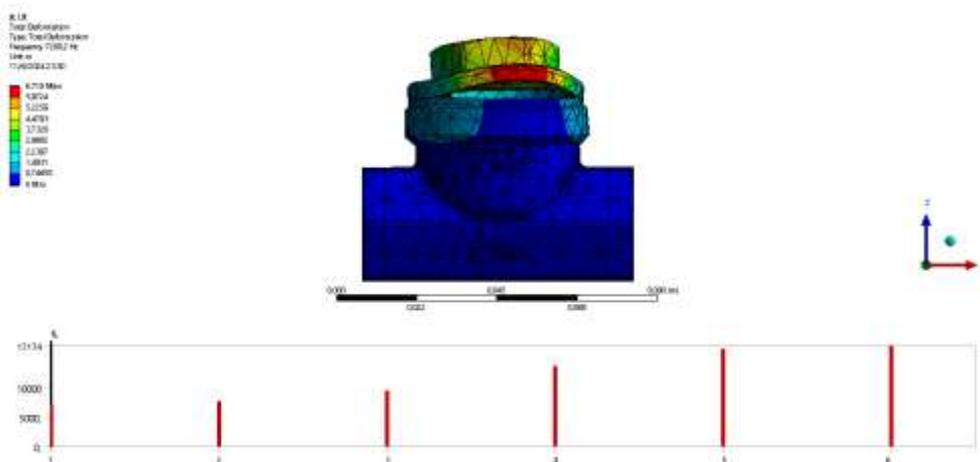


Figura 3.1. Simulación de la trampa de vapor con libertad de movimiento en el eje X.

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.1, se observa los resultados obtenidos con respecto al eje X en la simulación. En la parte inferior, se nota un gráfico de barras que indica los modos de vibración de la trampa de vapor, con el primer modo de vibración de 7200,2 Hz y el mayor modo de vibración de 17174 Hz. La particularidad de esta simulación se encuentra en la libertad de movimiento que tiene, siendo, el eje X el único grado de libertad posible, ya que, los demás ejes se encuentran bloqueados. Adicionalmente, se observa en la parte izquierda la deformación que sufre la trampa de vapor al someterse a esta frecuencia de vibración. Destaca como en la tapa es la parte que sufre la mayor deformación llegando a ser de 6,719 mm, esto se debe a que en la tapa se encuentra el mecanismo de apertura y cierre lo que puede provocar en golpes entre los mismo. En la parte inferior de la trampa la deformación es nula teniendo un valor de 0 mm.

Tabla 3.1. Modos de vibración obtenidos para la simulación con libertad de movimiento en X.

Modo de vibración	Frecuencia [Hz]
1	7200,2
2	7664,2
3	9515,8
4	13717
5	16624
6	17174

Fuente: [Propia]

En la Tabla 3.1, se observa los valores numéricos de los seis modos de vibración que se obtienen en la simulación. De acuerdo con estos resultados, se realiza la configuración descrita en el programa para encontrar la frecuencia natural del sistema respecto al eje de movimiento. Como, en las mediciones experimentales, el dispositivo SVAN 958 puede medir la aceleración de la vibración en los tres ejes del sistema de coordenadas y mostrar los resultados para cada uno. Escogiendo el valor del primer modo de vibración que es de 7200,2 Hz para filtrar frecuencias en el programa SVAN PC++, ya que este modo es el principal y más importante en la vibración de la trampa de vapor.

Al tener el modo de vibración número 1 un valor que no se encuentra en el programa SVAN PC++, se debe escoger el valor que más se aproxime. Por tanto, se escoge la frecuencia

de 8000 Hz para realizar la filtración y procesamiento de la señal en el software del equipo analizador de vibraciones.

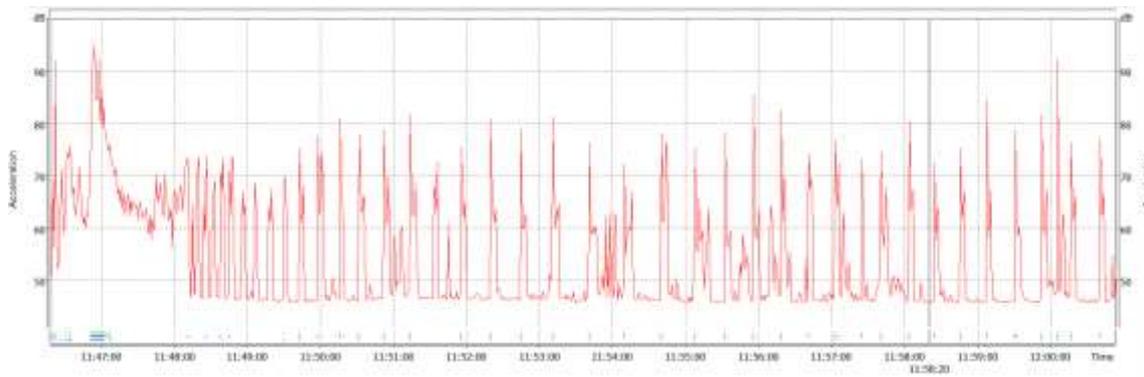


Figura 3.2. Tipo de onda con la frecuencia encontrada

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.2, se puede observar la forma de la onda de las vibraciones para la frecuencia seleccionada de 8000 Hz. Esta forma es coherente con lo esperado, ya que, se puede observar claramente los ciclos de abertura y cierre de la trampa, así como también, el periodo transitorio donde el comportamiento de la trampa es variable hasta que logra alcanzar su estado estable. En el estado transitorio, las vibraciones alcanzan un valor máximo de 95 dB y, cuando se encuentra estable, los picos donde se evidencia la apertura de la trampa están alrededor de los 80 dB. Tiene una vibración promedio de 46 dB cuando la trampa está cerrada.

- **EJE Y**

Los resultados obtenidos mediante la simulación en el programa ANSYS para el eje Y se muestran a continuación:

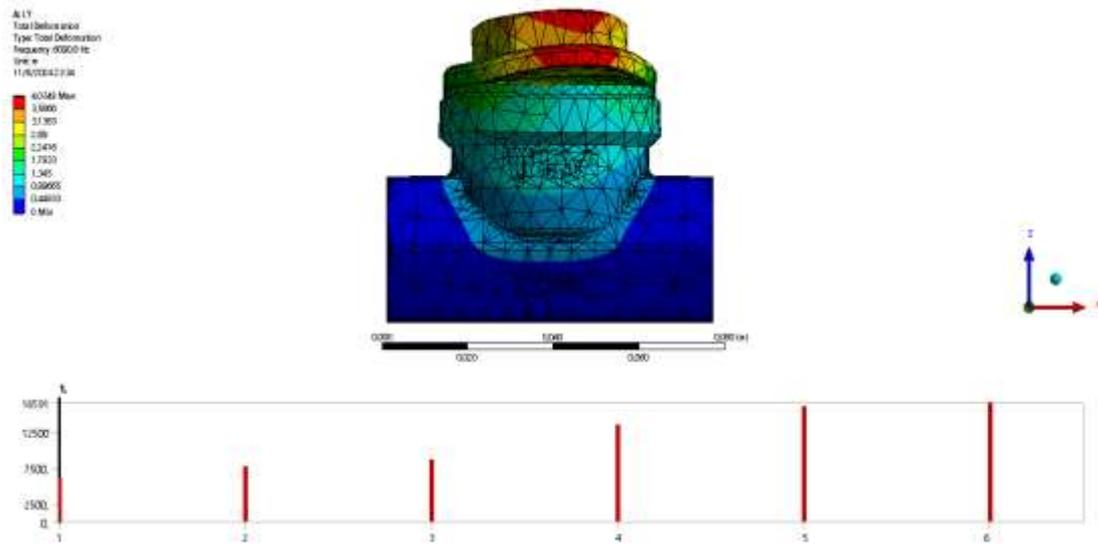


Figura 3.3. Simulación de la trampa de vapor con libertad de movimiento en el eje Y

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.3, se observa los resultados de la simulación para la trampa de vapor en una forma gráfica, en donde se puede observar los seis modos de vibración. Teniendo el primer modo de vibración un valor de 6090,8 Hz y el último un valor de 16591 Hz. Esta simulación se caracteriza por tener la libertad de movimiento en el eje Y, estando los demás ejes bloqueados para obtener la simulación en este eje. En este eje, igual se observa que en la tapa es donde sufre una mayor deformación estructural la trampa de vapor llegando a ser de 4,039 mm y en la parte inferior también la deformación es nula.

Tabla 3.2. Modos de vibración para la simulación con libertad de movimiento en el eje Y

Modo de vibración	Frecuencia (Hz)
1	6090,8
2	7685
3	8665,5
4	13551
5	15985
6	16591

Fuente: [Propia]

Los valores numéricos de los seis modos se pueden encontrar en la Tabla 3.2. Posteriormente, se realiza el filtrado de la señal escogiendo un valor de 6300 Hz por ser el más cercano al primer modo de vibración que resulto de la simulación siendo de 6090.8 Hz.

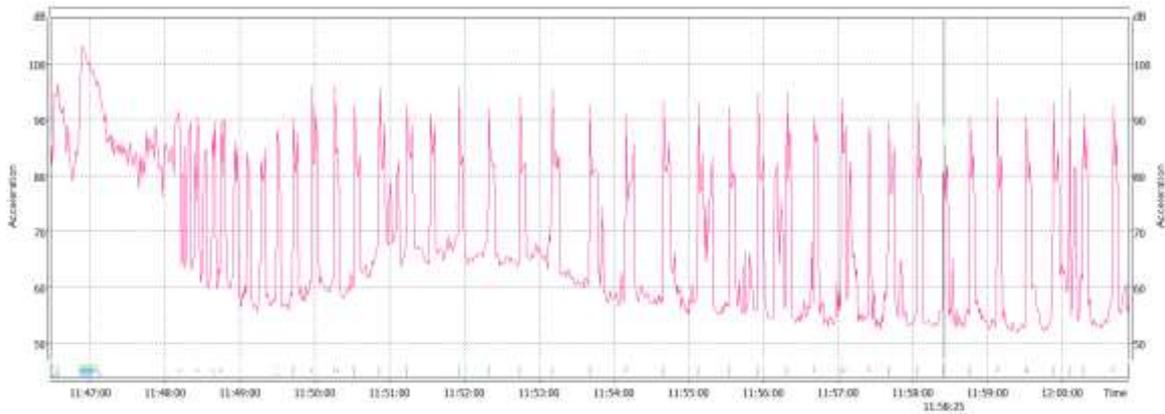


Figura 3.4. Tipo de onda con la frecuencia encontrada para el eje Y

Fuente: [Propia]

Como se puede observar en la Figura 3.4, la forma de la señal a 6300 Hz tiene concordancia con lo esperado, ya que se puede evidenciar nuevamente los ciclos de apertura y de cierre, así, como el periodo transitorio al inicio de la operación en donde se espera que la señal sea inestable en un corto periodo de tiempo. Además, se observa como en el periodo transitorio alcanza el pico más alto, teniendo un valor de 103,1 dB. Mientras que, en el periodo estable, a partir de los 10 minutos, los picos más altos no sobrepasan los 94 dB y, cuando está cerrada, la trampa está alrededor de los 50 dB.

Además de lo expuesto, hay que observar cómo, al minuto 5 de la medición, hay una subida en los valores de decibeles cuando la trampa debería cerrarse, llegando a valores de 65 dB, generando una subida de 15 dB provocando una curva en la parte inferior. A pesar de que los picos cuando la trampa está abierta no aumentan al patrón establecido. No se toma mucha importancia a este fenómeno ya que, se encuentra dentro del periodo transitorio donde se espera un comportamiento anómalo del equipo, además, de que a partir del minuto 10 el comportamiento se normaliza.

- **Eje Z**

Los resultados obtenidos en la simulación para el eje Z en el programa ANSYS se muestran a continuación:

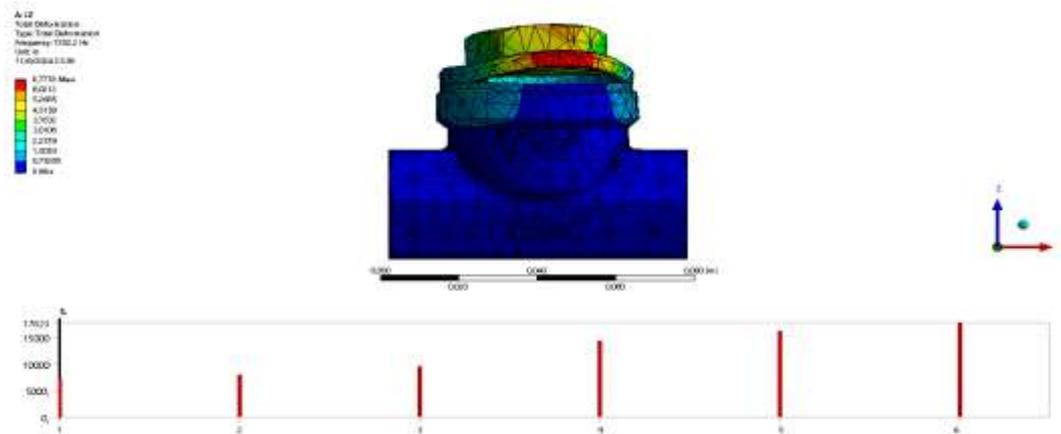


Figura 3.5 Simulación de la trampa de vapor con libertad de movimiento en el eje Y

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.5, se observa el resultado obtenido por la simulación para la trampa de vapor. A diferencia de los resultados anteriores, esta se encuentra con un grado de libertad en el eje Z para obtener los modos de vibración perpendicularmente al paso del fluido. En la parte inferior de la imagen obtenemos un gráfico de barras con los 6 modos de vibración. En donde, el primer modo de vibración tiene 7202,2 Hz y el último alcanza los 17823 Hz. En este eje, al igual que en los anteriores, la deformación estructural en la tapa es mayor alcanzando un valor de 6,7738 mm y en la parte inferior de la trampa la deformación es nula.

Tabla 3.3. Modos de vibración para la simulación con libertad de movimiento en el eje Y

Modo de vibración	Frecuencia [Hz]
1	7202.2
2	7928.8
3	9626.8
4	14389
5	16190
6	17823

Fuente: [Propia]

Los valores numéricos de estos modos de vibración se pueden apreciar en la Tabla 3.3.

El valor escogido para filtrar la señal en el software SVAN PC++ es el valor del primer modo de vibración que es de 7202,2 Hz. Este valor se acerca al obtenido en el eje X. Esto se podría atribuir a un comportamiento similar, ya que en el interior de la trampa de vapor el fluido cambia de dirección en el mismo sentido del eje analizado.

Este valor al ser muy próximo al del eje X, se toma el mismo valor para la filtración de la señal en el software, seleccionando de 8000 Hz. La forma de la señal correspondiente para este eje y a este valor de frecuencia se muestra a continuación:

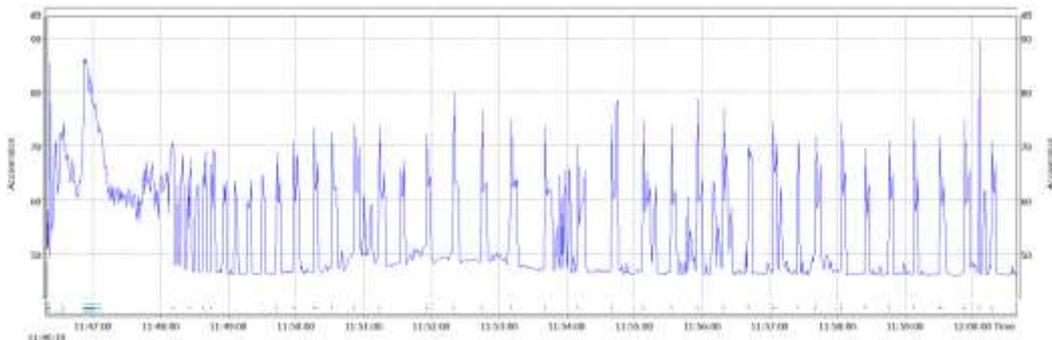


Figura 3.6 Tipo de onda con la frecuencia encontrada para el eje Y

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.6, se observa los ciclos de apertura y cierre de la trampa de vapor, así como el periodo transitorio al inicio del funcionamiento de este. En esta imagen es más notorio un gran pico al final de la medición que alcanza los 89,2 dB, por errores en donde el piezómetro del equipo de vibraciones se movió por un corto tiempo generando vibraciones innecesarias. En este eje el valor de pico más alto en el periodo transitorio es de 86 dB, mientras que en el periodo estable los picos tienen un valor cercano a 74 dB, mostrando aún más la diferencia entre las vibraciones. Cuando la válvula se encuentra cerrada la vibración del sistema se centra alrededor de los 46 dB.

Comparativa del resultado vibracional para cada Eje

Otro punto de análisis es la comparativa de las vibraciones en los tres ejes del sistema de coordenadas que capta el piezómetro del equipo.

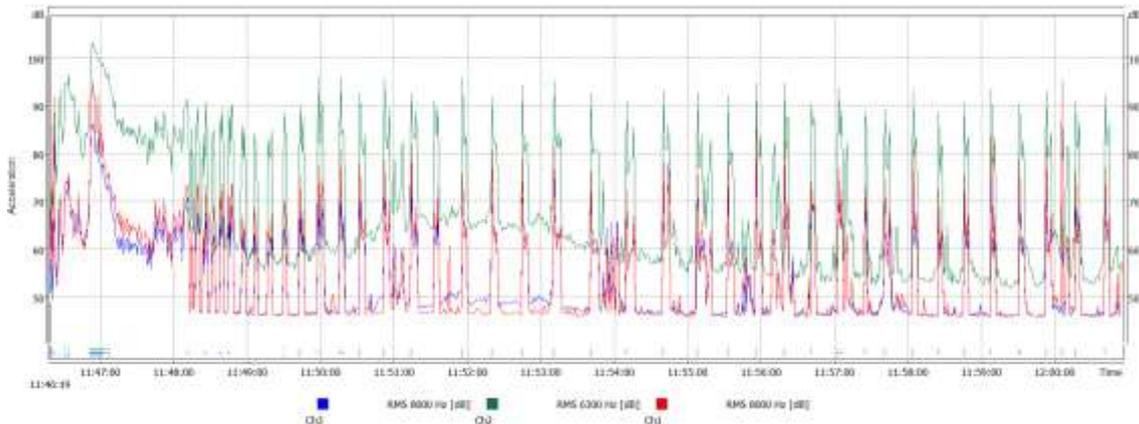


Figura 3.7 Comparativa entre las curvas de frecuencia en los 3 ejes de movimiento.

Fuente: [Propia]

Como se puede ver en la Figura 3.7, se presenta las diferentes curvas con la frecuencia filtradas para los respectivos ejes. Cabe recalcar que el Ch1 o canal 1 corresponde a la curva con libertad de movimiento en el eje X, el Ch2 o canal 2 corresponde a la curva con libertad de movimiento en el eje Y. Finalmente el Ch3 o canal 3 corresponde a la curva respectiva para el eje de movimiento en Z.

Destaca la curva correspondiente al canal 2, debido a su mayor nivel de vibración en comparación con las otras curvas. Se puede atribuir esta vibración a múltiples factores como la disposición de la trampa de vapor en la marmita, ya que, no tiene restricción de movimiento en este sentido. En el eje X y eje Z tienen tuberías acopladas a la trampa, lo que impide mayor libertad. Sin embargo, en el eje z que sería perpendicular a la trampa de vapor en dirección saliente al equipo no tiene restricción al movimiento. Por otro lado, en este sentido de movimiento tampoco hay paso de fluido al interior de la trampa de vapor, únicamente circula en dirección al eje X y al eje Z debido al cambio de sección al interior de la trampa.

Se evidencia también que el comportamiento de las vibraciones en los tres ejes es el mismo, mostrando claramente los ciclos de apertura y cierre de la trampa y el periodo transitorio hasta la estabilización de la trampa de vapor.

Comparación de resultados con los obtenidos en el método ultrasónico

Un punto importante de este estudio es la comparación de los resultados obtenidos por método vibratorio con los resultados obtenidos por método ultrasónico.

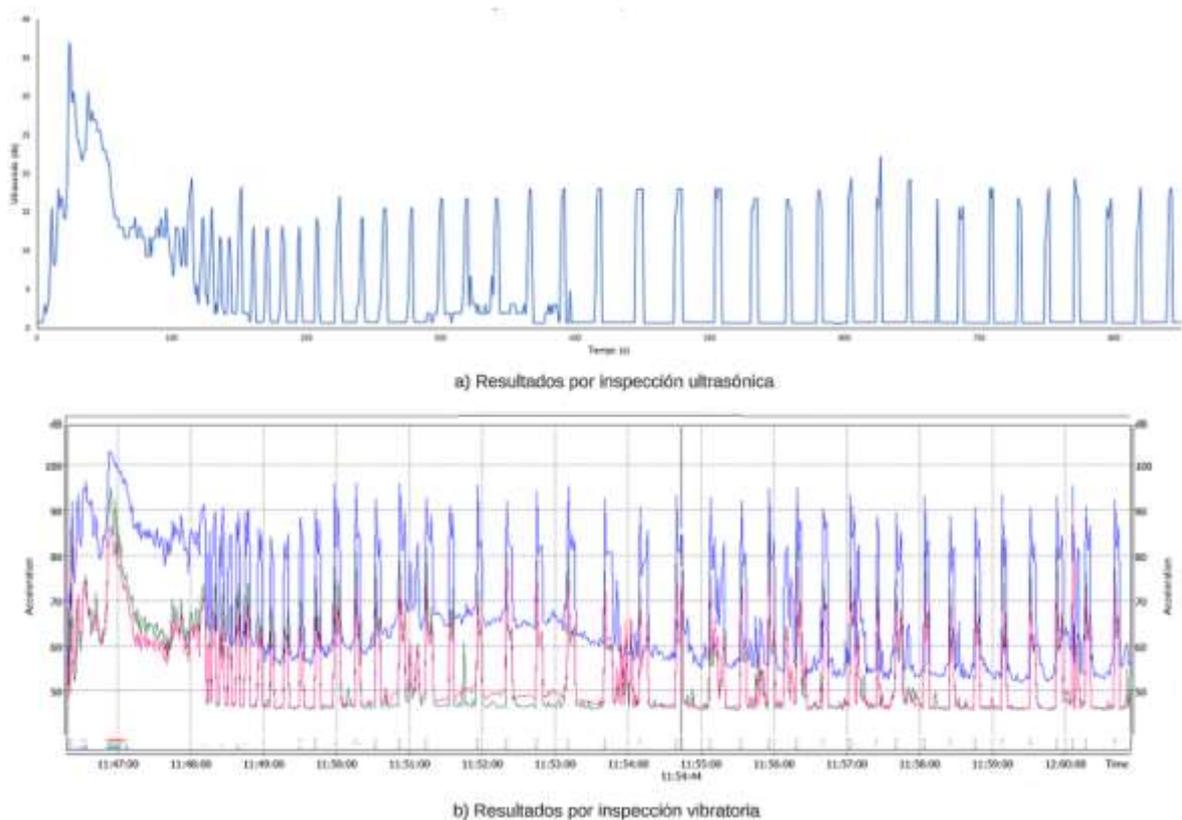


Figura 3.8 Comparación entre resultado ultrasónico y vibratorio

Fuente: [Propia]

Los resultados de la inspección por método ultrasónico se encuentran en la parte a) y los resultados por inspección vibracional se observan en la parte b) de la Figura 3.8, se tiene la comparación entre los resultados obtenidos por método ultrasónico y método vibracional. La similitud que existe entre ambos gráficos destaca los ciclos de apertura y cierre, así como la parte transitoria del funcionamiento.

Lo más notorio de esta comparación son las curvas pintadas en azul, correspondientes a las vibraciones producidas en el eje Y, así como el resultado del ultrasonido, teniendo estas una alta similitud. Esto se puede atribuir al hecho de la medición en sí. Como el aparato de medición ultrasónico solo mide en una dirección de movimiento y el sensor se colocó en el eje Y, a un costado de la trampa de vapor y el piezómetro del analizador de vibraciones puede arrojar resultados igual, se obtienen resultados idénticos. Esperando que, si se mide el ultrasonido en dirección a otro eje de movimiento, esta gráfica sea más parecida a la curva obtenida en el análisis vibracional correspondiente al mismo eje.

Es interesante destacar igual como las vibraciones no llegan a cero dB en la gráfica, mientras los resultados por ultrasonido si llegan a este valor cuando se encuentra totalmente cerrado. Esto se debe a que por más que no esté activo el mecanismo de la trampa de vapor, todo el sistema como se encuentra trabajando provoca una vibración natural. Otro punto para destacar son las amplitudes de ambas inspecciones, mientras la amplitud en el eje de las ordenadas para inspección ultrasónica no supera los 40 dB, en los resultados por inspección vibracional, la amplitud supera los 100 dB.

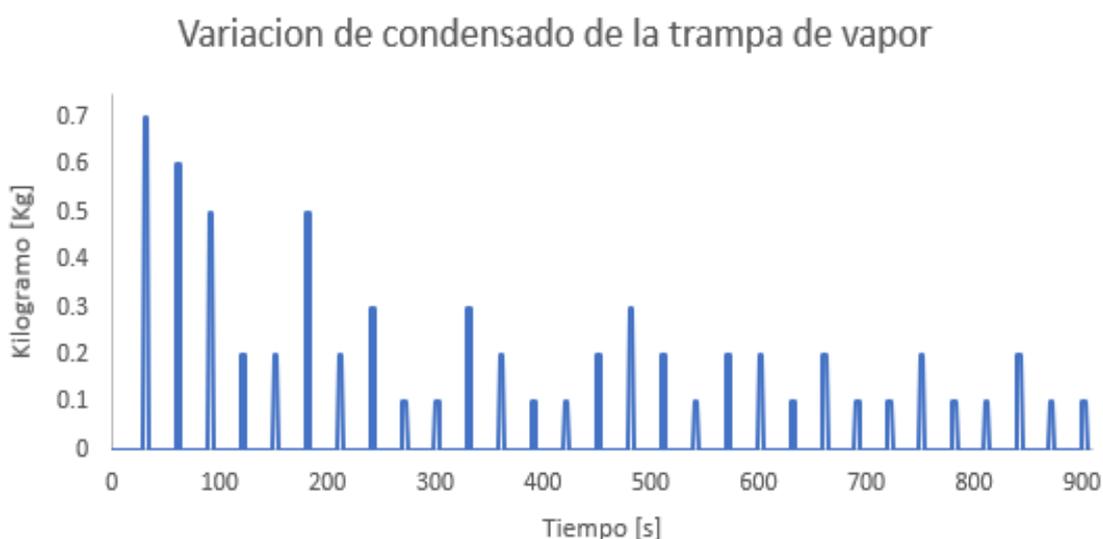


Figura 3.9 Variación del condesando en la trampa de vapor

Fuente: [Propia]

Al realizar la comparación de las vibraciones con el método ultrasónico, surge un nuevo punto de análisis al tener un estudio de la variación del condensado durante el proceso de medición. Al inicio de la gráfica se obtuvo un flujo de condensado mucho mayor al observado desde los 600 segundos, que es donde se estabiliza el comportamiento de la trampa, notando como en él comportamiento transitorio la trampa libera una cantidad mucho mayor de condensado llegando a 0,7 kg en una sola descarga de la trampa. Los 300 segundos finales de la medición como se observa en la Figura 3.9, tienen un patrón marcado, el cual no supera los valores de 0,1 kg por descarga o los 0,2 kg cuando existe dos descargas seguidas en un intervalo de tiempo reducido. Por lo que se podría predecir comportamientos a futuros de las trampas y aproximar el condensado a liberar para futuros diseños de tanques de condensado de forma más precisa.

3.2 Conclusiones

Los principios fundamentales para la inspección mediante método vibracional de las trampas de vapor son considerar el rango de temperatura del sensor y su posición en la trampa de vapor. En cuanto a la temperatura admisible, fue necesario la construcción de un aislante de medio continuo que garantice una temperatura superficial menor a 60 °C. Por su parte, sobre el posicionamiento del sensor en la trampa, este debe localizarse en la zona cercana al orificio de descarga.

Una vez, establecidos los principios fundamentales para la medición de las trampas de vapor mediante el método vibracional. Se realizó mediciones en las trampas del DECAP. De estas mediciones se verificó su funcionamiento. Como el tipo de trampa en la que se experimenta es de comportamiento discreto, en las gráficas de resultados se observa claramente los ciclos de apertura y cierre definidos, acorde al comportamiento teórico que deberían tener estos equipos.

El equipo SVAN 958 mide las vibraciones en un amplio rango de frecuencias, por lo que hay que filtrarlo. Surge un problema al buscar en que rango de frecuencias pueden operar las trampas de vapor, debido a la nula información bibliográfica. Para solventar este problema es necesario realizar una simulación en el programa ANSYS 2023 R2 para encontrar el principal modo de vibración. Se realizó 3 simulaciones distintas otorgando diferentes grados de libertad para que coincida con las mediciones del equipo analizador de vibraciones. Da lugar a una frecuencia de 7200 Hz para el eje Z y eje X y una frecuencia de 6300 Hz para el eje Y.

Usando las frecuencias encontradas con la simulación de la trampa de vapor, se filtró en el programa SVANPC ++, dando como resultado gráficas donde se evidencia el comportamiento de la trampa. En la gráfica de comparativa entre las curvas de frecuencia en los 3 ejes de movimiento se comparó con la obtenida por método ultrasónico que se obtuvo en una medición simultánea. La gráfica obtenida en el eje Y a la frecuencia de 6300 Hz es la que más se parece a la del método ultrasónico. Esto se debe a la posición del sensor ultrasónico durante la medición, el cual se ubicó en el eje Y. Explicando como las vibraciones que se transmiten en este eje adquieren esta forma.

3.3 Recomendaciones

Aunque la superficie del aislante es imantada, algunas trampas de vapor no lo tienen por el tipo de acero con que se construyen. Por tanto, las mediciones están sujetas errores de medición debido a movimiento bruscos del sensor. Por lo expuesto, se recomienda fijar el sensor y el aislante a la trampa de vapor mediante amarras plásticas para evitar que el espectro se vea afectado.

Al observar la gráfica de comparación entre resultado ultrasónico y vibratorio, se recomienda ampliar el estudio de la relación que puede existir entre estas dos variables, a partir de técnicas de inferencia estadísticas para validar los datos de estos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Análisis modal*. (s. f.). Recuperado 5 de julio de 2024, de <https://www.ptc.com/es/technologies/cad/simulation-and-analysis/modal-analysis>
- ASTM A582 Grade 303Se Annealed*. (s. f.). Recuperado 5 de julio de 2024, de <https://matmatch.com/es/materials/minfm54965-astm-a582-grade-303se-annealed>
- ASTM A743 Grade CA6NM Heat-Treated*. (s. f.). Recuperado 5 de julio de 2024, de <https://matmatch.com/es/materials/minfm66086-astm-a743-grade-ca6nm-heat-treated>
- Ayabaca Sarria, C., Merino, M., Romero, G., Zurita, E., Reina, S., Venegas Vásconez, D., & Vila, C. (2022). *Desarrollo de una Metodología Experimental por Análisis de Vibraciones y Ultrasonido para Detección de Fallas Mecánicas en motores de combustión de unidades generadores eléctricas*.
- Balance Energético Nacional – Ministerio de Energía y Minas*. (2021). <https://www.recursoyenergia.gob.ec/5900-2/>
- Capehart, B. L., Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2011). *Guía de Eficiencia Energética en Sistemas de Vapor* (7.ª ed.). The Fairmont Press, Inc.
- Christopher M. R. A. Poczka. (2012). *Investigation of Operational Conditions of Steam Traps through Acoustic Emission*. University of Sussex.
- Díaz, V. H. H., Encalada, J. L. P., & Peña, A. P. (2015). Técnicas de Gestión Energética en Sistemas de Vapor. *Revista Politécnica*, 35(3), Article 3.
- Distribución de Vapor—SpiraxSarco*. (s. f.). Recuperado 16 de julio de 2024, de <https://es.scribd.com/document/420269348/Distribucion-de-Vapor-Spirax-Sarco-pdf>
- Ewins, D. J. (2009). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. John Wiley & Sons.
- García Pérez, A. (2017). *Análisis e implantación de medidas de eficiencia energética en redes de distribución de vapor y condensado*. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/6043>

- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor y de masa* (4ta edicion). PRENTICE HALL.
- Jaramillo Ortiz, A. J. (2010). *Uso racional y eficiente de la energía en un sistema de vapor de una industria papelera*. <http://repository.eafit.edu.co/handle/10784/4439>
- I programa de Eficiencia Energética Industrial de. (2018). *MANUAL DE OPTIMIZACION DE SISTEMAS DE VAPOR INDUSTRIAL* (Papar Riyaz & Gregory Harrel, Eds.).
- LOCTITE. (2024). *Super Bonder Precisión*. https://www.loctite-consumidor.co/cuando-necesite-una-union-perfecta-loctite-jamas-te-abandona/productos/super-bonder/super_bonder_precision.html
- Marín, E. P. (2012). *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. Editorial Félix Varela.
- Palacios Jose Luis. (2010, abril). *TÉCNICAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE VAPOR*.
- Piñero, Y. (2007). *Simulación de Monte Carlo de sistemas complejos en red*. https://www.researchgate.net/publication/43170766_Simulacion_de_Monte_Carlo_de_sistemas_complejos_en_red
- Rao, S. (2012). *Vibraciones Mecánicas (5ta Ed)*—Singiresu S. Rao. 5ta edicion, 1024.
- Rivas-España, D. (2006). *Estudio sobre fugas, estado y funcionamiento acerca de las trampas de vapor, cálculo de pérdidas de energía y de la cantidad de condensado formado al calentar el producto negro*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/620>
- Rosales, J. (2023). *Análisis de vibraciones mecánicas*. <https://www.fractal.com/es/mantenipedia/que-es-el-analisis-de-vibraciones>
- Sosa Daza, J. A. (2013). *Recuperación de condensados generados en el sistema de drenaje de cabezales de vapor y venas de calentamiento en el área de setil (servicios auxiliares) de la Refinería Estatal de Esmeraldas*. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/3677>

SVAN 958A - Medidor de Sonido y Vibraciones de Cuatro Canales. (s. f.). SVANTEK - *Sound and Vibration*. Recuperado 5 de enero de 2024, de <https://svantek.com/es/productos/svan-958a-analizador-de-cuatro-canales-de-ruido-y-vibraciones/>

TLV. (2022, octubre 1). *Thermostatic Steam Traps*. TLV. <https://www.tlv.com/products/steam-traps/thermostatic/balanced-pressure>

TLV. (2023a, mayo 26). *Aplicaciones de diferentes tipos de trampas de vapor*. TLV. <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/steamtrap-basics/steam-trap-varieties-and-applications>

TLV. (2023b, mayo 26). *Cómo trabajan las trampas Mecánicas: Una mirada a su mecanismo y méritos*. TLV. <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/steamtrap-basics/mechanical-steam-traps>

TLV. (2023c, mayo 29). *Introducción a la Recuperación de Condensado*. TLV. <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/condensate-recovery/introduction-to-condensate-recovery>

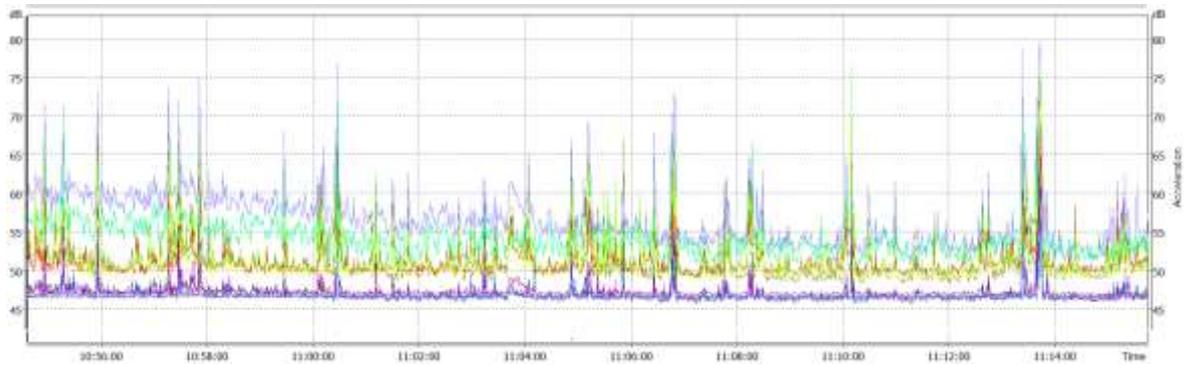
Trampas de vapor termostáticas. (2020). Edelflex. <https://www.edelflex.com/es/blog/trampas-de-vapor-termostaticas-6>

Valles Cruz, A., Acosta Cordero, L., & Pérez González, A. (2014). Evaluación energética de los generadores de vapor F1-2 y BH-109 de una refinería Cubana de petróleo. *Magazine specialized in Engineering; Vol. 8 (2014); 89 - 96*. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/29664>

White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Azima.

5 ANEXOS

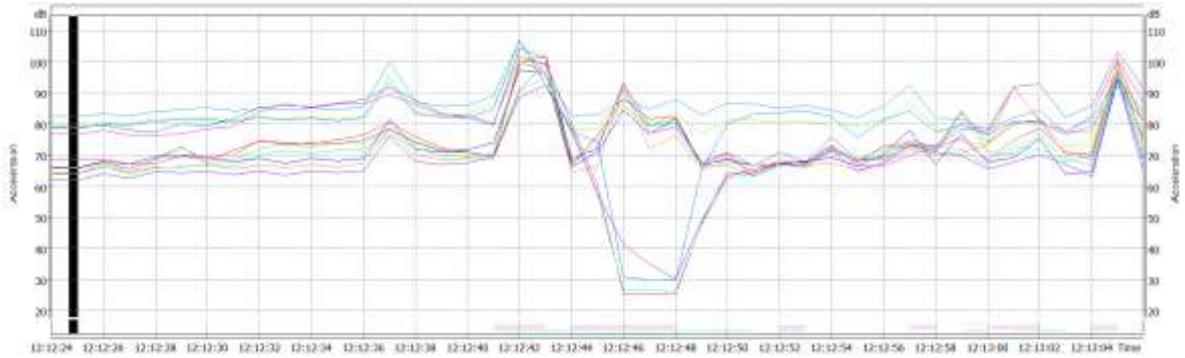
ANEXO 1. Resultado de la inspección en el destilador del DECAB



Resultado de medición en trampa de vapor termostática bimetálica

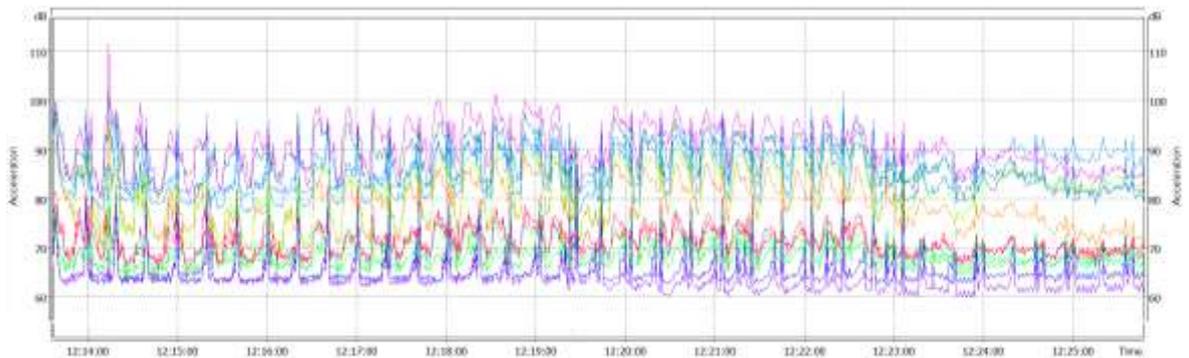
Fuente: [Propia]

ANEXO 2. Resultado de la inspección en la planta de alimentos



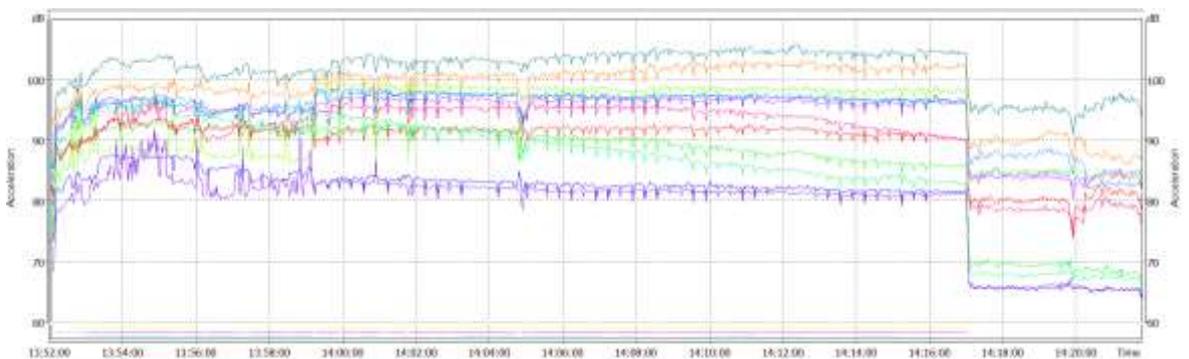
Resultado de medición en trampa de vapor termodinámica

Fuente: [Propia]



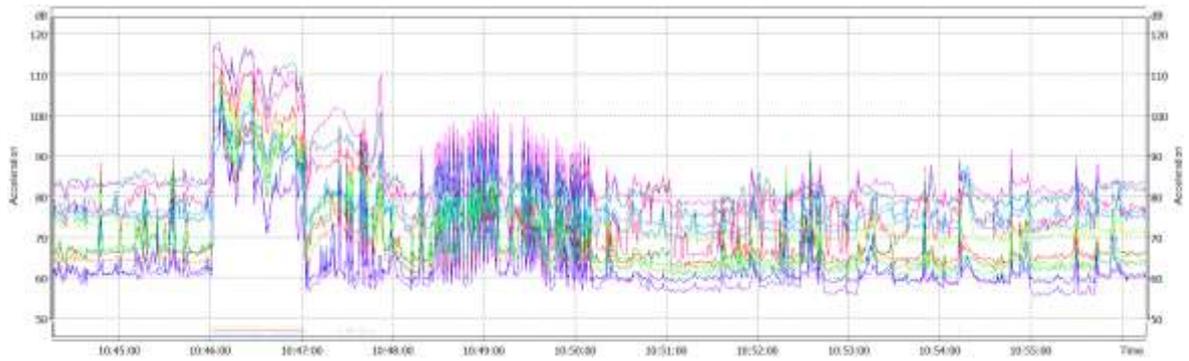
Resultado de medición en trampa de vapor de flotador y termostato

Fuente: [Propia]



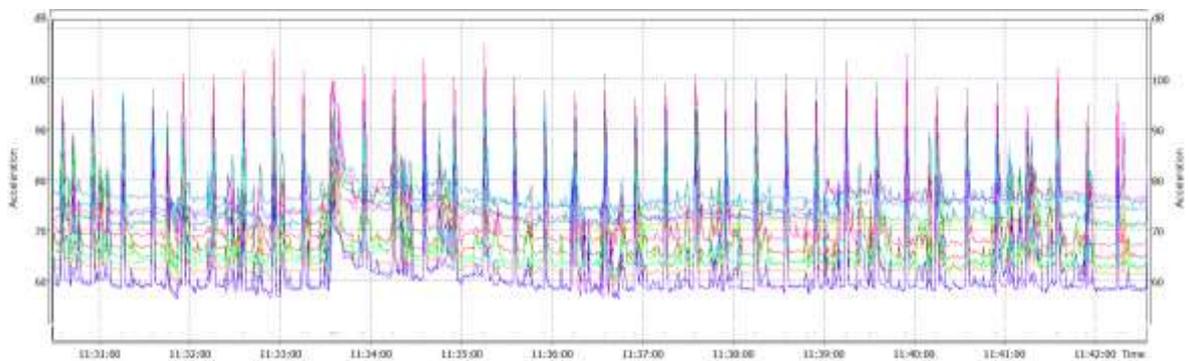
Resultado de medición en trampa de vapor de flotador y termostato

Fuente: [Propia]



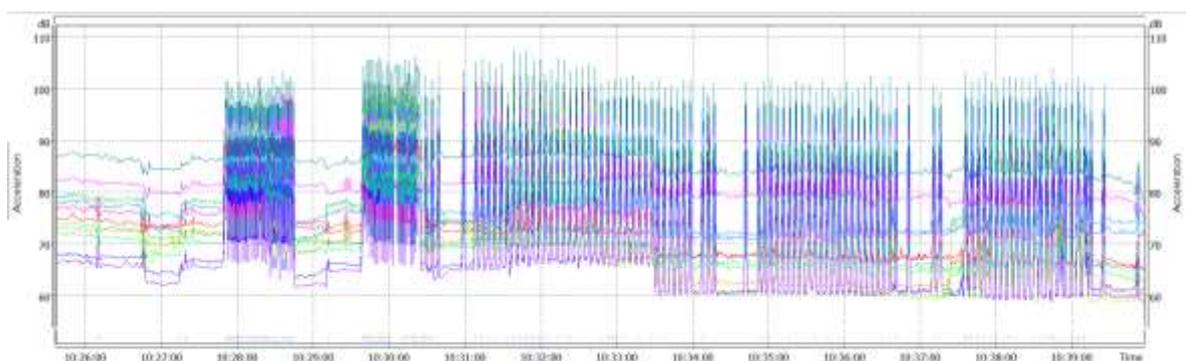
Resultado de medición en trampa de vapor de balde invertido

Fuente: [Propia]



Resultado de medición en trampa de vapor de balde invertido

Fuente: [Propia]



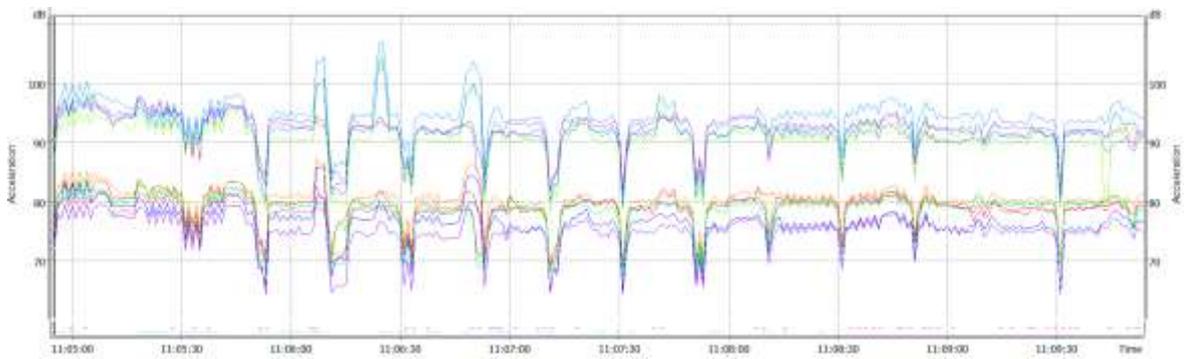
Resultado de medición en trampa de vapor termodinámica

Fuente: [Propia]



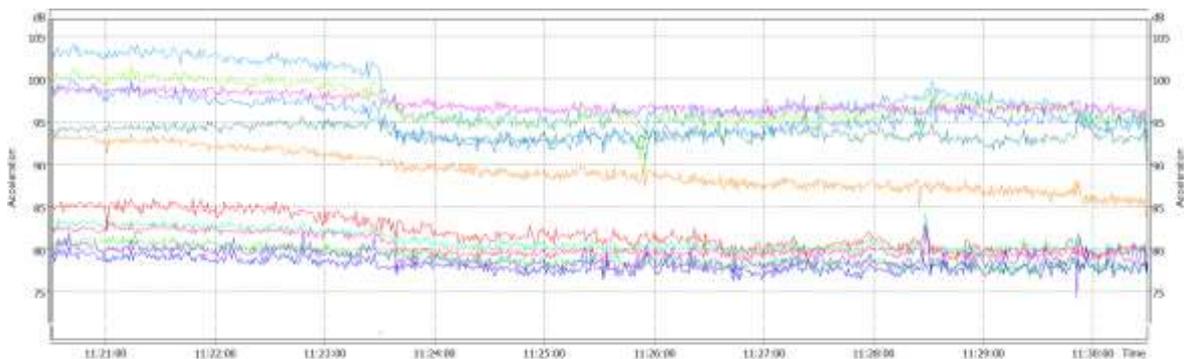
Resultado de medición en trampa de vapor de balde invertido

Fuente: [Propia]



Resultado de medición en trampa de vapor de flotador y termostato

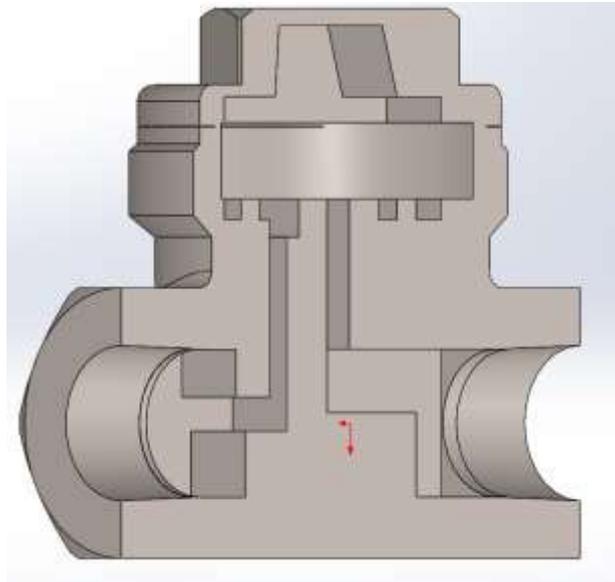
Fuente: [Propia]



Resultado de medición en trampa de vapor de flotador y termostato

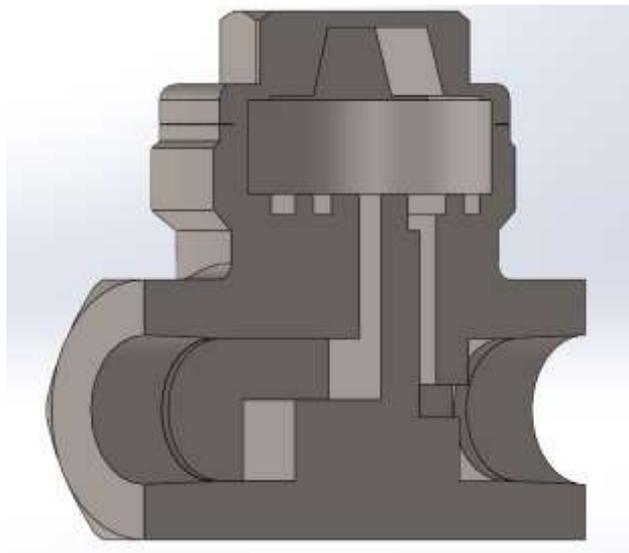
Fuente: [Propia]

ANEXO 3. Detalle interno del CAD de la trampa de vapor termodinámica



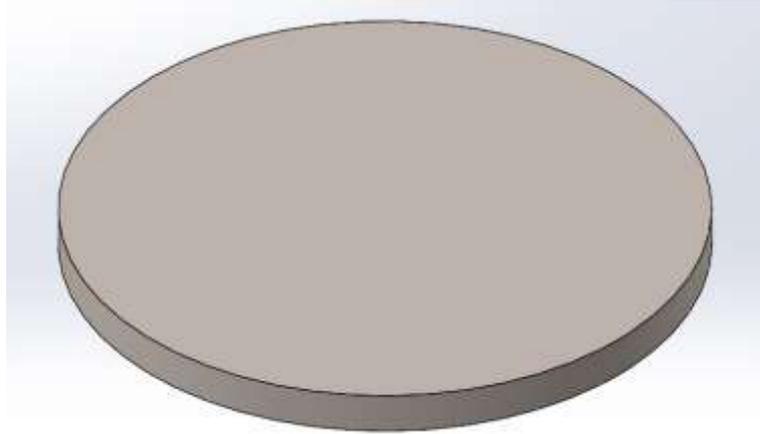
Parte interior derecha de trampa termodinámica del DECAB

Fuente: [Propia]



Parte interior izquierda de trampa termodinámica del DECAB

Fuente: [Propia]



Disco interno trampa termodinámica.

Fuente: [Propia]