

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA FRACCIÓN DE TRABAJO DE TRAMPAS DE VAPOR MEDIANTE EL MÉTODO ULTRASÓNICO

DESARROLLO METODOLÓGICO

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA

MELANY LISSETH CHILUISA ROMERO

melany.chiluisa@epn.edu.ec

DIRECTOR: JOSE LUIS PALACIOS ENCALADA

jose.palacios@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Melany Lisseth Chiluisa Romero 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.

Melany Lisseth Chiluisa Romero

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Melany Lisseth Chiluisa Romero, bajo mi supervisión.

José Luis Palacios Encalada

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.

Melany Lisseth Chiluisa Romero

José Luis Palacios Encalada

DEDICATORIA

Dedico el trabajo y esfuerzo de estos años a mis padres, quienes han sido partícipes de este sueño y me han ayudado a cumplirlo. Por su amor, cuidado y enseñanzas fundamentales en mi crecimiento personal y profesional. Esta es mi manera de expresarles la gratitud por el sacrificio y apoyo en cada paso hacia mis metas.

Este trabajo también es dedicado a mi hermosa familia, porque su presencia en mi vida ha sido una luz que me guía y acompaña todo momento.

Por último, a la pequeña Melany, que estaría orgullosa por la constancia y perseverancia dedicada para cumplir cada uno de sus sueños.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida y la sabiduría para culminar esta etapa.

A mis padres, Patricio y Silvia, quienes con su amor incondicional y apoyo inquebrantable han sido pilares fundamentales para alcanzar cada uno de mis objetivos. Gracias por ser mi fortaleza en momentos difíciles y por celebrar conmigo en cada logro. Amor y gratitud para ustedes, espero hacerlos sentir tan orgullosos, como ustedes siempre me han hecho sentir a mí.

A mi hermano, Steven, por ser mi mayor inspiración y modelo a seguir. Sin duda esto es gracias a él, por estar a mi lado, por confiar en mí, por guiarme y motivarme en cada etapa de mi vida.

A mi hermosa familia. A mis abuelitos Julio y Estelita, por el cuidado y amor que me han dado desde niña. Por ser mis primeros maestros e inculcarme valores de vida. A todas mis tías: Raque, Jaque, Anita, Miry, Clary, Charito y Mary, por estar pendientes y cuidar de mí como su hija. A mis primos por ser mis compañeros de aventuras y por iluminar mi vida con su alegría y risas. En especial, a Jt y Dome, quienes son como mis hermanas, y han sido apoyo mutuo mientras vivimos lejos de casa.

A la Escuela Politécnica Nacional, y los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por ser parte de mi desarrollo personal y profesional. En especial, al Dr. José Luis Palacios, por su mentoría y acompañamiento en la elaboración de este trabajo. Al Dr. Freddy Ordoñez y al Ing. Christian Tapia por sus enseñanzas y apoyo durante esta etapa académica.

A mis amigos con los que compartí aulas, pero sobre todo compartí amenos momentos cargados de alegría y diversión. A mi pareja, por estar a mi lado en momentos complicados, por motivarme y acompañarme durante esta etapa. A la memoria de mi amiga Mile, quien fue un ejemplo de perseverancia y lucha; sé que hoy, también estaría cumpliendo su sueño de ser una gran Doctora.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
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.....	12
2.1 Campaña de inspección	13
2.2 Tratamiento de datos.....	20
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
3.1 Resultados.....	23
3.2 Conclusiones	29
3.3 Recomendaciones.....	30
5 ANEXOS.....	36
ANEXO 1. Especificaciones técnicas del sensor.....	36
ANEXO 2. Resumen de las campañas de inspección	38
ANEXO 3. Tiempo muestral para medición con ultrasonido.....	40
ANEXO 4. Diagramas de las trampas de vapor de la Planta de Alimentos.....	41
ANEXO 5. Diagramas de las trampas de vapor del DECAB.....	42
ANEXO 6. Estimación de la descarga máxima de condensado	43
ANEXO 7. Código para estimar los indicadores estadísticos de comparación	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación Sistema de Vapor.....	4
Figura 1.2. Trampa mecánica de cubeta invertida: a) cerrada, b) abierta.....	6
Figura 1.3. Trampa termostática bimetálica: a) cerrada, b) abierta	7
Figura 1.4. Trampa de vapor termodinámica de disco.	8

Figura 1.5. Diagrama de inspección de trampas de vapor.....	9
Figura 1.6. Fotografía de trampa descargando a la atmósfera.....	11
Figura 2.1. Resumen de la metodología planteada.....	12
Figura 2.2. Fotografía sensor ultrasónico ULTRA TRAK 850	16
Figura 2.3. Conexión del DU a la data logger OM-DAQXL	17
Figura 3.1. Diagrama de ultrasonido de trampa termodinámica TV1 - Planta Piloto DECAB.....	23
Figura 3.2. Diagrama de ultrasonido de trampa de flotador TV1 - Planta Alimentos.	24
Figura 3.3. Diagrama de trampa termodinámica y su umbral de cierre.	24
Figura 3.4. Diagrama de trampa de flotador con los límites de cierre. Las líneas representan los umbrales.....	25
Figura 3.5. Función de distribución acumulada de flujo másico y ultrasonido.....	26
Figura 5.1. Inspecciones iniciales de temperatura y método auditivo de una trampa de flotador y termostato.....	38
Figura 5.2. Trampa de flotador y termostato y montaje del sensor.....	38
Figura 5.3. Equipos de consumo de la Planta Piloto DECAB.	39
Figura 5.4. Montaje del sensor en la trampa termostática	39
Figura 5.5. Sistema implementado para medición de condensado.	40
Figura 5.6. Ultrasonido de trampa de flotador y termostato TV2- Planta de Alimentos. ...	41
Figura 5.7. Ultrasonido de trampa de flotador y termostato TV3 – Planta de Alimentos...	42
Figura 5.8. Ultrasonido de trampa termostática - Destilador.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Modos de falla en Trampas de Vapor.....	8
Tabla 1.2. Frecuencia de inspección sugerido.	10
Tabla 2.1. Equipos de consumo y trampas de vapor de Industria Alimenticia	13
Tabla 2.2. Equipos de consumo y trampas de vapor de la Planta Piloto DECAB.....	14
Tabla 2.3. Detalle de cables del DU.....	17
Tabla 2.4. Ubicación del sensor para cada tipo de trampa de vapor.....	18
Tabla 3.1. Fracción de trabajo por tiempo de apertura	25
Tabla 3.2. Fracción de trabajo con carga de condensado	27
Tabla 3.3. Fracción de trabajo por diagrama de ultrasonido.....	27
Tabla 3.4. Resultados de la fracción de trabajo	29
Tabla 5.1. Tiempo muestral de medición con ultrasonido.....	40

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología para determinar la fracción de trabajo de trampas de vapor. Esta fracción de trabajo se define como la cantidad de condensado descargado por la trampa de vapor durante el tiempo de operación. La metodología se desarrolló a partir del análisis de los diagramas de funcionamiento de las trampas, obtenidos mediante inspecciones ultrasónicas. Para ello, se inspeccionó tres modelos de trampas de vapor: termodinámica, termostática y de flotador y termostato, y se midió el flujo de condensado descargado. Estas inspecciones se llevaron a cabo en una planta de alimentos y en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la Escuela Politécnica Nacional.

Seguidamente, se estableció un método de cálculo basado en la relación entre el área bajo la curva del diagrama de ultrasonido y la cantidad de condensado descargado. Esta relación se validó mediante los indicadores estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y coeficiente de Rho-Spearman. Los resultados indicaron una correlación positiva entre el ultrasonido y el flujo de condensado. De este modo, se concluye que la fracción de trabajo obtenida por análisis ultrasónico corresponde a la descarga de condensado.

PALABRAS CLAVE: sistema de vapor, trampas de vapor, condensado, método ultrasónico, indicadores estadísticos

ABSTRACT

The objective of this research is to develop a methodology for determining the work fraction of steam traps. This work fraction is defined as the amount of condensate discharged by the steam trap during its operational time. The methodology was developed based on the analysis of the operational diagrams of the traps, which were obtained through ultrasonic inspections. To this end, three models of steam traps were inspected: thermodynamic, thermostatic, and float with thermostat, and the discharged condensate flow was measured. These inspections were conducted at a food processing plant and at the Pilot Plant of the Department of Food Science and Biotechnology (DECAB) at the Escuela Politécnica Nacional.

Subsequently, a calculation method was established based on the relationship between the area under the ultrasound curve and the amount of condensate discharged. This relationship was validated using Kolmogorov-Smirnov statistical tests and Spearman's rank correlation coefficient. The results showed a positive correlation between the ultrasound data and the condensate flow. Thus, it is concluded that the work fraction obtained from ultrasonic analysis accurately reflects the condensate discharge.

KEYWORDS: steam system, steam trap, condensate, ultrasonic method, statistical indicators

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La demanda de recursos energéticos crece de la mano con la economía mundial y está presente en todos los procesos productivos. Aproximadamente el 82% de toda la energía primaria proviene de combustibles fósiles como petróleo, gas natural y carbón [1]. Esta dependencia conduce hacia el cambio climático y contaminación del aire. Debido que, la quema de combustibles fósiles produce el 90% de las emisiones de CO₂ y 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) [2].

A nivel mundial, cerca del 37 % de la energía generada se destina al sector industrial y se abastece principalmente con combustibles fósiles. Los sistemas de vapor consumen una significativa cantidad de esta energía [3]. Se estima que se requiere alrededor de 3.98×10^9 GJ/año para producir 2.9 billones de lb-vapor/año [4]. Por esa razón, es crucial establecer técnicas de eficiencia energética en sistemas de vapor para evitar pérdidas energéticas, y con ello mitigar los efectos ambientales.

En los sistemas de vapor, la recuperación de condensado resulta una estrategia de uso eficiente de la energía y clave para la descarbonización. El condensado caliente contiene aproximadamente el 25% del calor sensible del vapor y puede ser aprovechado como agua de alimentación de la caldera [5]. De modo que, esta recuperación reduce el consumo de combustible en un 10%. Esto es beneficioso en términos energéticos, económicos y ambientales [6].

En este proceso de recuperación se identifica la importancia de instalar trampas de vapor para el drenado eficiente de condensado [7]. Sin embargo, se ha evidenciado que entre un 30% a 65% de trampas no trabajan adecuadamente. La falta de un programa de mantenimiento o técnicas de inspección ineficiente causan fallas prematuras y pérdidas económicas que ascienden a 100 USD/día [8]. Por esa razón, se plantea la importancia del correcto funcionamiento de las trampas de vapor, esto se logra mediante métodos de inspección tales como método ultrasónico [9].

Además, se ha identificado que las trampas de vapor trabajan sólo una fracción del tiempo de los equipos de consumo a los que están conectadas. Este porcentaje de trabajo da una idea de la cantidad de condensado descargado. De manera que, es útil para el diseño de los tanques de recuperación de condensado. Sin embargo, no existe un procedimiento claro para estimar dicho porcentaje y se trabaja con valores empíricos o por experiencia [10].

En este contexto, se considera necesario el desarrollo de una metodología para estimar la fracción de trabajo de las trampas de vapor mediante el análisis de los diagramas de funcionamiento obtenidos de la inspección por ultrasonido.

1.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para determinar la fracción de trabajo de trampas de vapor a través del método ultrasónico de inspección.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica y estado del arte de los métodos de inspección, tipos de trampas de vapor y modo de falla.
2. Desarrollar el diseño conceptual del detector ultrasónico para adquisición y almacenamiento de datos.
3. Definir el montaje apropiado del detector ultrasónico en trampas de vapor.
4. Desarrollar una metodología para determinar la fracción de trabajo de trampas de vapor mediante el análisis de las curvas de funcionamiento de trampas de vapor.

1.3 Alcance

El proyecto tiene como objetivo desarrollar un procedimiento para estimar la fracción de trabajo de trampas de vapor mediante la inspección con el método ultrasónico en dos industrias del país. Para ello, se inicia con la recopilación de información sobre el funcionamiento de las trampas de vapor, los tipos de trampas en la industria, su modo de falla y las técnicas de inspección. Entre estas técnicas se estudia el método ultrasónico y las características del equipo de medición.

Para llevar a cabo las campañas de inspección se ha adquirido un nuevo sensor ultrasónico. Por esa razón, se realiza el diseño conceptual de conexiones del equipo y la configuración con el data logger para adquisición y almacenamiento de datos. Las inspecciones se desarrollan en trampas de vapor de una Planta Industrial de Alimentos y en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología DECAB.

De las mediciones se obtiene curvas del funcionamiento de las trampas de vapor. Estas gráficas son analizadas para determinar la fracción de trabajo. En este punto se desarrolla un procedimiento de cálculo mediante la relación de las variables: sonido y condensado descargado.

1.4 Marco teórico

En el presente capítulo se describe sobre los conceptos fundamentales sobre el sistema de vapor, funcionamiento de las trampas de vapor y las técnicas de inspección.

Sistemas de Vapor

La generación de vapor se destaca como un método altamente eficaz para la transferencia de energía. El vapor se forma en calderas o generadores de vapor mediante el calentamiento del agua a presión constante. Se da lugar a la vaporización del agua en estado de líquido comprimido [11].

Los sistemas de vapor son un conjunto de componentes y equipos que permiten generar, transportar y utilizar vapor en operaciones industriales. Estos sistemas aprovechan las propiedades del vapor de agua para satisfacer las necesidades térmicas de los diferentes procesos [12]. El ciclo del vapor se evidencia en Figura 1.1. Se inicia con la vaporización del agua líquida debido a la combustión de los gases de la caldera [12]. Después, el vapor se dirige hacia los equipos de consumo para proporcionar calor a los distintos procesos de la planta. Para completar el sistema, el condensado generado por el uso de vapor es drenado en los tanques de almacenamiento mediante trampas de vapor [2]. En conjunto, estos elementos aseguran un funcionamiento eficiente y continuo del sistema de vapor en aplicaciones industriales.

Debido a su fácil disponibilidad y propiedades para transferencia de energía es ampliamente usado a nivel industrial. Es usado en varias aplicaciones desde la producción de energía mecánica hasta aplicaciones que requieren calentamiento de procesos industriales y espacios. De manera que, juega un papel fundamental en diversas industrias, incluyendo química, energética, médica, textil, de calefacción y transporte [11].

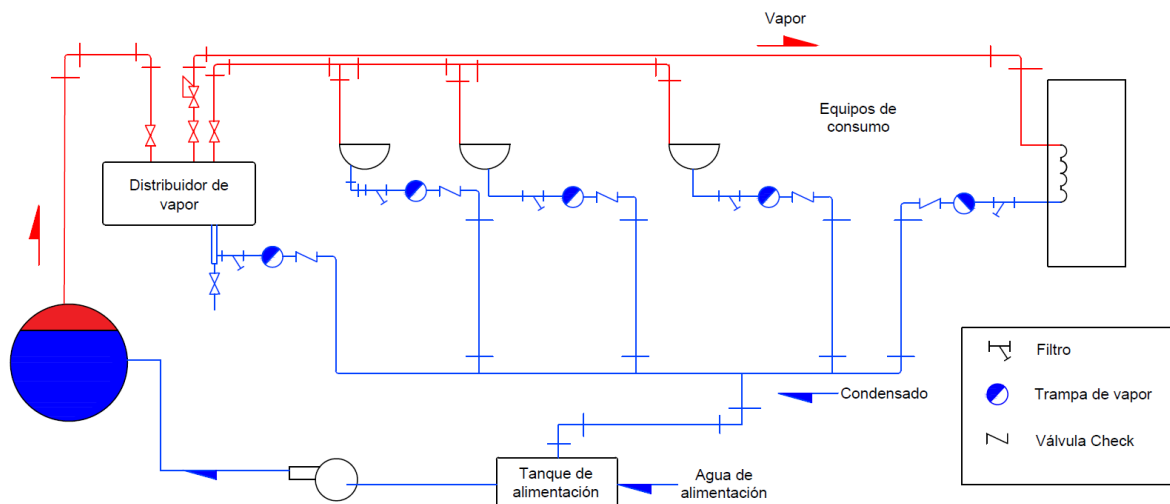


Figura 1.1. Representación Sistema de Vapor.

Fuente: Adaptado de [8]

Recuperación de Condensado

El condensado y vapor flash son subproductos del consumo de vapor y requieren ser drenados. El condensado acumulado causa ciertas anomalías en el sistema, tales como golpe de ariete, ruido y abrasión en la línea de distribución [13]. El aire y gases no condensables como CO₂ son removidos junto con el condensado [14]. Esta es una ventaja importante porque estos fluidos son perjudiciales para el rendimiento del sistema. Se ha identificado también, que este fluido contiene cerca del 25 % de la energía del vapor del que procede [15]. Esta cantidad es valiosa para ser aprovechada en el sistema. Por otro lado, el vapor flash o revaporizado se produce debido a la evaporación parcial del condensado cuando hay una reducción de presión en la salida de la trampa de vapor [5]. Se caracteriza por ser de la misma calidad que el vapor liberado por la caldera y por su alto contenido energético.

Considerando las propiedades termodinámicas de este fluido bifásico la recuperación de condensado es una posibilidad eficiente de ahorro de consumo de energía. El condensado y revaporizado son redirigidos a un tanque de recuperación presurizado [16]. Esto para separar estos fluidos y aprovechar la energía residual del vapor. El condensado puede ser usado como agua de alimentación de la caldera y el vapor flash en procesos de calentamiento a baja presión. Esta recuperación representa un ahorro en términos energéticos, económicos y de sostenibilidad ambiental.

Trampas de Vapor

Las trampas de vapor son válvulas que establecen el nexo entre el vapor vivo y el condensado. Se colocan después de los equipos de consumo en las líneas de retorno de condensado. Estos dispositivos trabajan ya sea por la diferencia de densidades, temperatura o por las propiedades termodinámicas de cada fluido [17]. De modo que, se abren dejando pasar condensado y se cierran cuando detectan la presencia de vapor.

Los gases no condensables y el aire del sistema son removidos con el condensado, entonces las trampas de vapor permiten también evacuar estos fluidos [18]. Por estas razones, se identifica la importancia de su uso en la industria para garantizar la eficiencia del sistema mediante el uso correcto de vapor, reduciendo su desperdicio y evitando pérdidas económicas. Las trampas de vapor se clasifican en función al fenómeno físico que incide en su modo de operación. La norma ISO 6704:1982 clasifica a las trampas de vapor en tres categorías: trampas mecánicas, termostáticas y termodinámicas [19].

- **Trampas de Vapor Mecánicas**

El principio de funcionamiento de este tipo de trampas se basa en la diferencia de densidad entre el condensado y vapor. El vapor permanece en la zona superior de la trampa y el condensado se acumula en la parte inferior. Esta acción provoca el desplazamiento del flotador que resulta en la apertura y cierre de la válvula [20]. Se emplean en actividades con presiones elevadas y vapor sobrecalentado, son empleadas para drenar grandes volúmenes de condensado [8].

Las trampas de vapor mecánicas más comunes son de flotador y termostática; y de cubeta invertida. La diferencia entre este tipo de trampas es su modo de descarga, continua e intermitente, respectivamente. Es decir, la descarga de las trampas de flotador y termostato es continua dependiendo de la carga de condensado generado. Por su parte, las de balde invertido dependen de la flotación del cubo. El cubo flota y cierra la válvula cuando el vapor está presente. Al condensarse el vapor, el cubo se hunde. Esto abre la válvula y permite que el condensado sea descargado [21]

A continuación, se presenta el esquema de una trampa de vapor de cubeta invertida en Figura 1.2.

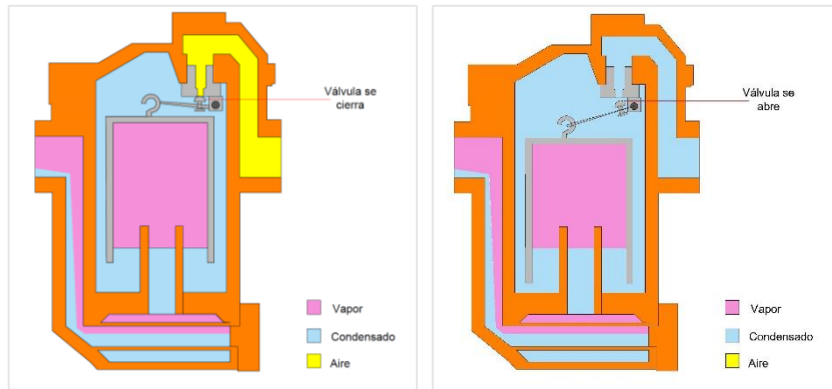


Figura 1.2. Trampa mecánica de cubeta invertida: a) cerrada, b) abierta.

Fuente: Adaptado de [20]

- **Trampas de Vapor Termostáticas**

Este tipo de trampas operan en función de la temperatura del vapor circundante. Esta característica permite identificar entre vapor y gases no condensables más fríos. Se activan mediante un elemento bimetálico o una cápsula tipo fuelle lleno de líquido vaporizante. Por esa razón, en este grupo se identifica las trampas de fuelle de presión balanceada, de expansión de líquido y bimetálicas [22].

Las trampas de expansión de líquido utilizan un elemento lleno de aceite que se expande al calentarse para cerrar la válvula. La descarga se realiza con una temperatura de ajustable entre 60 °C y 100 °C. De esta manera, se asegura la eliminación de grandes cantidades de aire y condensado frío durante el arranque. Por su parte, las trampas de presión equilibrada son una mejora de las trampas de expansión de líquido. El componente clave es una cápsula que contiene una mezcla especial de líquido y agua. Esta mezcla tiene un punto de ebullición más bajo que el del agua. Cuando el condensado pasa por la trampa, el calor vaporiza el líquido en la cápsula, y provoca la expansión y el cierre de la válvula. Por último, las trampas de vapor bimetálicas son dispositivos que utilizan la expansión y contracción de metales diferentes para controlar la descarga de condensado en sistemas de vapor [11], [22].

En Figura 1.3 se evidencia el mecanismo de operación de una trampa bimetálica.

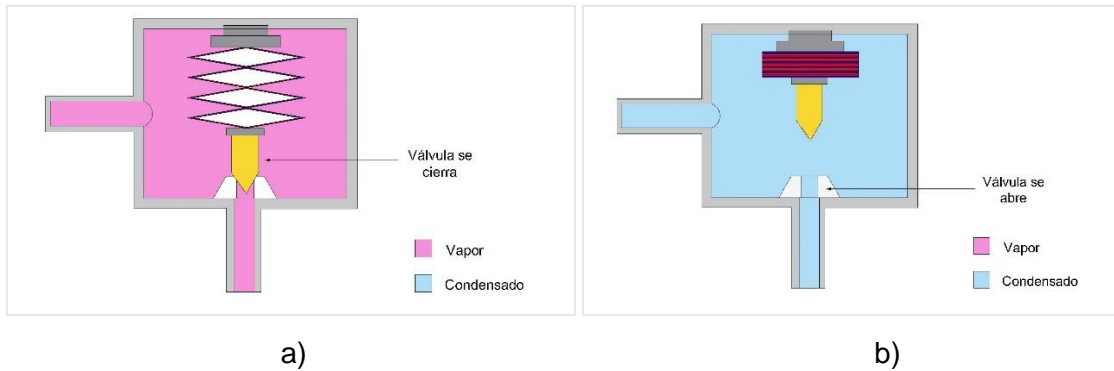


Figura 1.3. Trampa termostática bimetalica: a) cerrada, b) abierta

Fuente: Adaptado de [23]

- **Trampas de Vapor Termodinámicas**

Estas trampas operan mediante la variación de las propiedades termodinámicas y dinámicas de los fluidos del agua y vapor flash. Este proceso genera fuerzas que actúan en ambos lados del disco, que es el único elemento móvil de este tipo de trampa. La descarga inmediata del condensado y aire generan una presión que eleva el disco. Esto permite la descarga de condensado. En el momento que ingresa el condensado caliente, se libera vapor flash a alta velocidad. Este vapor crea una zona de baja presión debajo del elemento móvil. De manera que, el disco se cierra. Seguidamente, cuando el vapor flash se condensa, la presión en la cámara superior disminuye, permitiendo que el disco se eleve y abra el puerto para la descarga del condensado. Este proceso cíclico asegura que el condensado se elimine de manera eficiente mientras se controla el flujo de vapor [24], [25].

Se caracterizan por su capacidad de trabajar en un amplio rango de presiones y en condiciones de vapor sobrecalentado sin sufrir daños por el golpe de ariete. Presenta bajo rendimiento en exteriores debido a la condensación del vapor sobre el disco en ambientes fríos, lo que mantiene la trampa abierta.

Existe tres tipos fundamentales de trampas termodinámicas, diferenciados por el diseño de la válvula que emplean para abrir y cerrar el puerto. Se distingue la trampa termodinámica de disco, de pistón o de palanca. La trampa de vapor tipo disco se evidencia en Figura 1.4.

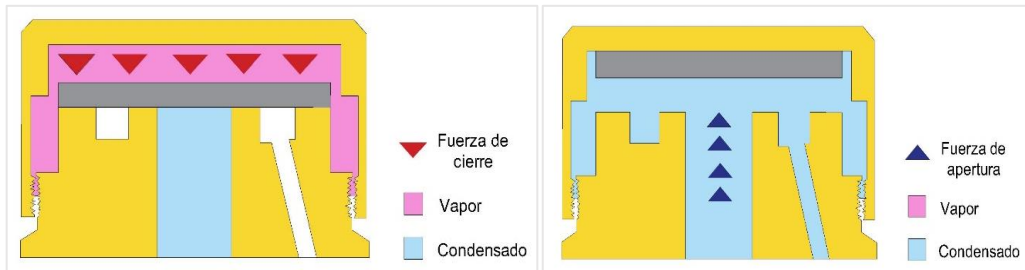


Figura 1.4. Trampa de vapor termodinámica de disco.

Fuente: Adaptado de [26]

Modo de Falla en Trampas de Vapor.

Las trampas de vapor presentan tipos de fallo en condición abierto, cerrado. La falla en posición abierta provoca que el vapor vivo se descargue a la atmósfera y exista una pérdida de vapor significativa. El resultado genera pérdidas económicas relacionadas con los costos de generación de vapor. Sin mencionar que afecta la seguridad e integridad del proceso debido que la acumulación de vapor vivo incrementa la temperatura del ambiente y provocar quemaduras [12]. Este tipo de falla se puede dar debido a la erosión del asiento y las superficies de sellado de la válvula. Esto impide que la trampa cierre de manera adecuada, lo que puede convertir una pequeña fuga [11].

Por su parte, puede existir fallas en condiciones cerradas, debido a la acumulación de suciedad de las tuberías, los óxidos e incrustaciones. Este tipo de falla provoca la acumulación de condensando en el sistema de vapor. Por lo tanto, se reduce la eficiencia del sistema por el inadecuado calentamiento del proceso [12]. En Tabla 1.1 se detalla una descripción de los modos de falla de acuerdo con cada tipo de trampa y en función de su modo de operación. El modo de operación se presenta según la carga de condensado de la trampa de vapor.

Tabla 1.1. Modos de falla en Trampas de Vapor

Tipo de trampa	Modo de operación				Tipo de falla
	Sin carga	Carga	Carga Normal	Sobrecarga	
Trampa de cubeta invertido Trampa mecánica	Poco Goteo	Intermitente	Intermitente	Continuo	Abierta
Flotador y termostática Trampa mecánica	No hay acción	Continuo	Continuo	Continuo	Cerrada
Trampa de Disco Termodinámica	No hay acción	Usualmente Gotea	Intermitente	Continuo	Abierta
Trampa: fuelle y bimetalico Trampa Termostática	No hay acción	Intermitente	Intermitente	Continuo	Abierta

Fuente: Adaptado de [17]

Principios de Inspección

En plantas industriales, se estima que alrededor del 35% y 60% de las trampas de vapor no operan de manera adecuada en el sistema de vapor o se pierde por fugas en el sistema. Por esa razón, es importante desarrollar un proceso de gestión y mantenimiento de las trampas de vapor. El objetivo del programa es reducir las pérdidas de vapor y aumentar la eficiencia energética y a su vez obtener ahorros económicos. Sin dejar de lado, los beneficios ambientales que trae consigo el ahorro de vapor [25].

El proceso de gestión del mantenimiento empieza con la identificación y el registro de las trampas de vapor. Se inicia con la identificación las trampas de vapor para tener una base de datos con el tipo, ubicación, fabricante, modelo, entre otras características de la trampa [8]. Seguidamente, se define el recorrido de inspección y se elige un método de inspección. Para iniciar con la inspección, se verifica que el sistema esté operativo a partir de la temperatura superficial de la trampa de vapor. El procedimiento de verificación se define en el diagrama de decisión de la Figura 1.5.

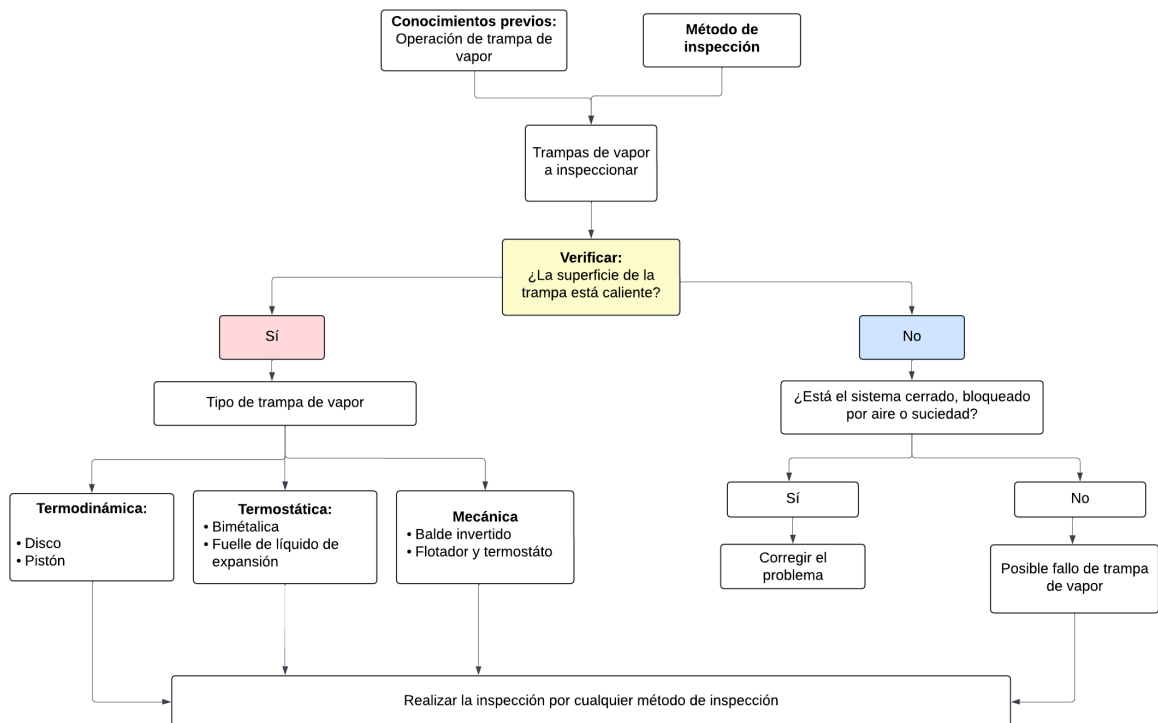


Figura 1.5. Diagrama de inspección de trampas de vapor.

Fuente: Adaptado de: [11]

Frecuencia de Inspección

La frecuencia de inspección de las trampas de vapor se determina según los procesos de producción de la planta y la presión de trabajo del sistema. A mayores niveles de presión, se requiere una inspección más frecuente. Esto se debe a las condiciones variables y desafiantes en las que operan las trampas de vapor. Establecer una frecuencia adecuada de inspección es crucial para mantener la operación óptima del sistema de vapor. Y de esta manera, prevenir problemas como la pérdida de energía y la reducción de la vida útil de las trampas [12]. En ese sentido, en Tabla 1.2 se detalla la frecuencia recomendada para la inspección de trampas de vapor, según el tipo de sistema y su presión operativa.

Tabla 1.2. Frecuencia de inspección sugerido.

TIPO DE SISTEMA	CARACTERÍSTICAS	PERÍODO DE INSPECCIÓN
De alta presión	Más de 1034 kPa	Semanal o mensual
De media presión	De 206 a 1034 kPa	Mensual o Trimestral
De baja presión	Menos de 206 kPa	Anual

Fuente: Adaptado de [12]

Métodos de inspección

Utilizar diversos métodos de inspección es fundamental para evaluar el rendimiento de las trampas de vapor y desarrollar un plan de monitoreo eficaz. Los métodos de inspección son visual, térmicos, por sonido y vibraciones y electrónicos [27]. Cada uno presenta ventajas y limitaciones, de modo que para una correcta gestión de inspección se recomienda la combinación de estos. A continuación, se describe los métodos de inspección.

- **Método Visual**

Esta técnica de inspección se caracteriza por la observación de vapor que es descargado a la atmósfera. Se limita a realizar el análisis en sistemas abiertos y depende de la capacidad de interpretación del inspector para reconocer entre vapor flash o re-vaporizado [28]. De modo que, la presencia de cantidades elevadas de vapor vivo o la falta de descarga serán un indicio para identificar si la trampa falla en condición abierta o cerrada.

- **Método Térmico**

Se fundamenta en medir la temperatura aguas arriba y aguas debajo de la trampa de vapor, aproximadamente 30 cm [29]. Para ello, se emplea dispositivos de detección como visor infrarrojo, pirómetro, termopar, o cámaras termográficas. El principio de inspección de esta técnica asume que la temperatura aguas abajo incrementa cuando hay descarga de vapor, de modo que se infiere sobre una posible falla [27]. Sin embargo, es una teoría poco fiable pues la temperatura de vapor saturado y condensando puede ser similar y por ende los resultados serán erróneos [8].

- **Método Ultrasónico**

El fluido al pasar por un orificio reducido cambia su movimiento de flujo laminar a turbulento. Este cambio se traduce en vibraciones de frecuencia elevada que son sonidos no audibles, es decir, que el oído humano no recepta [30]. La característica del ultrasonido generado depende del tipo de fluido. Generalmente un sonido similar al silbido es propio del vapor vivo, y un sonido tipo ola de mar para el condensado [28].

Se emplean equipos como estetoscopios o detectores ultrasónicos que filtran los sonidos audibles, ruido de exterior y detectan solo el ultrasonido. Los detectores de ultrasonido son dispositivos que utilizan sondas de contacto para convertir señales ultrasónicas en señales eléctricas. Estas señales luego se convierten en sonido audible medido en decibeles (dB). Los datos forman una curva de funcionamiento de la trampa de vapor a lo largo del tiempo. De modo que el análisis de este diagrama proporciona información crucial sobre su rendimiento y estado operativo [8]. En Figura 1.6 se evidencia la combinación de técnicas inspección visual y ultrasonido de una trampa termodinámica.



Figura 1.6. Fotografía de trampa descargando a la atmósfera.

Fuente: [Propia]

2 METODOLOGÍA

La metodología del estudio se estructura en dos secciones, la inspección por ultrasonido de trampas de vapor de industrias del país y tratamiento de datos para la obtención de la fracción de trabajo. Sobre las campañas de mediciones para la inspección de trampas de vapor se llevaron a cabo en una planta industrial de alimentos y en la Planta Piloto del Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología DECAB, de la Facultad de Ingeniería Química. Por razones de confidencialidad se omite el nombre de la industria de alimentos. Se inspeccionó trampas termodinámicas de disco, termostáticas y de flotador y termostato. Las mediciones se llevaron a cabo durante los procesos de producción durante un tiempo de medición muestral y durante el proceso de producción. Se midió también, el flujo de condensado descargado en una de las trampas del DECAB. Esta medición fue posible solo en esta trampa porque descarga a la atmósfera y es de fácil acceso.

En la segunda sección se realizó un tratamiento de datos para replantear la fracción de trabajo y validar la definición. Se planteó un procedimiento de cálculo de la fracción de trabajo mediante los datos de descarga de condensado medido y el área bajo la curva de los diagramas de ultrasonido. Para la validación, se comparó las mediciones de flujo másico y ultrasonido mediante técnicas de estadística comparativa. Una vez hecho esto se aproximó la definición planteada a las trampas de vapor termostáticas y de flotador y termostato. La descripción de la metodología se describe en Figura 2.1.

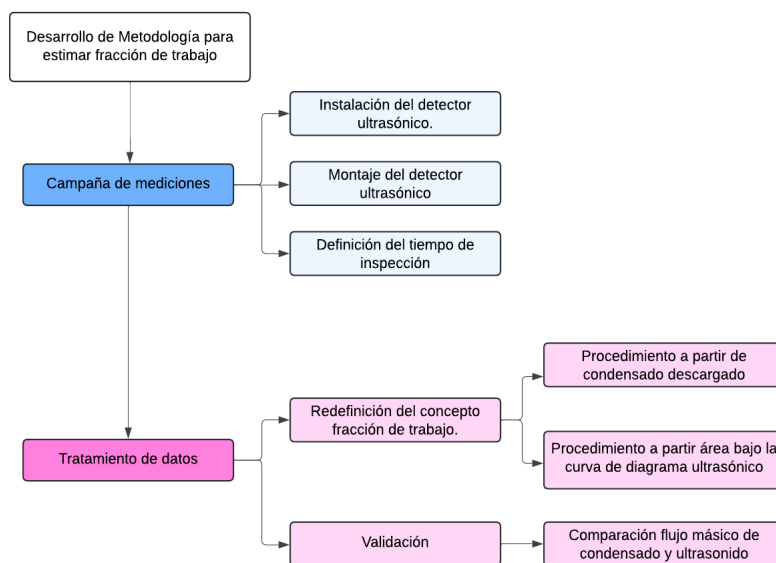


Figura 2.1. Resumen de la metodología planteada

Fuente: [Propia]

2.1 Campaña de inspección

En esta sección se detalla las experiencias de inspección con ultrasonido de las trampas de vapor identificadas en la Industria de Alimentos y en la Planta Piloto del Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología, DECAB. Se presenta también, el procedimiento para de medición de condensado que se realizó en la trampa termodinámica de la Planta Piloto DECAB. Un resumen de las inspecciones realizadas se presenta en ANEXO 2

Identificación y registro de las tramas de vapor.

Se inició con la identificación de las trampas de vapor de cada industria. Se describió el tipo de trampa, equipo de consumo al que está conectada, fabricante, modelo, diámetro de conexión y orificio, y tiempo de operación.

- **Industria de Alimentos**

En esta empresa se identificó que la producción y consumo de vapor se desarrolla en cuatro etapas: generación, distribución, consumo de vapor y retorno de condensado. La caldera de generación de vapor trabaja a una presión de 94 psi. El equipo de distribución dirige el vapor hacia cinco digestores, que son los principales equipos de consumo y estos a su vez se conectan a los purgadores de vapor para descargar condensado hacia la línea de retorno. Los digestores se emplean para el procesamiento de desechos orgánicos de la planta y trabajan de manera continua durante todo el tiempo de operación de la caldera. El consumo de vapor promedio de estos equipos es de 22 t-vapor/d. Por esa razón, debido a esta carga de condensado están instaladas trampas de flotador y termostato. Se llevó a cabo el levantamiento de información de las características de trabajo de las trampas de vapor, esta información se recopila en Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Equipos de consumo y trampas de vapor de Industria Alimenticia

N°	Equipo de consumo	Código	Tipo	Marca	Modelo	Diámetro de conexión (in)	Modo de operación-equipos de consumo	Tiempo de operación (h)
1	Digestor 1	A_TV1	Flotador y termostato	Armstrong	A8 125	2	Continuo	16
2	Digestor 2	A_TV2	Flotador y termostato	Armstrong	A6 125	1 1/2	Continuo	16

N°	Equipo de consumo	Código	Tipo	Marca	Modelo	Diámetro de conexión (in)	Modo de operación-equipos de consumo	Tiempo de operación (h)
3	Digestor 3	A_TV3	Flotador y termostato	Armstrong	A6 125	2	Continuo	16
4	Digestor 4	A_TV4	Flotador y termostato	Armstrong	A6 125	1 1/2	Continuo	12
5	Digestor 5	A_TV5	Flotador y termostato	Armstrong	A8 125	2	Continuo	12

Fuente: [Propia]

- **Planta Piloto del DECAB**

En la Planta Piloto DECAB se identificó que el sistema de vapor consta de tres etapas: generación, distribución y consumo de vapor. La planta no cuenta con sistema de retorno de condensado. Se inspeccionó las trampas de vapor conectadas a los equipos: marmita y destilador.

El proceso implementado en la marmita es el calentamiento de agua hasta el punto de ebullición. Se trabajó con 20 l de agua desde una temperatura de 19 °C y presión de operación de 58 psi. Para la drenar el condensado está instalada una trampa termodinámica. En el destilador se lleva a cabo el proceso de purificación del agua para el uso de prácticas en los laboratorios de la Facultad de Química de la EPN. El proceso se desarrolló a una presión de 29 psi y es empleado para tratar agua a una temperatura de 19.4°C hasta estabilizarse en 93 °C. Se encuentra instalada una trampa de tipo termostática bimetalica. Los datos de los equipos y trampas de vapor se describen en Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Equipos de consumo y trampas de vapor de la Planta Piloto DECAB

N°	Equipo de consumo	Código	Tipo	Marca	Modelo	Diámetro de conexión	Modo de operación, equipos de consumo	Tiempo de operación (h)
1	Marmita	D_TV1	Termodinámica de Disco	Spirax Sarco	TD 52 MLC	1/2	Por proceso	0.5
2	Destilador	D_TV2	Termostática Bimetalica	Spirax Sarco	-	1 1/2	Por proceso	16

Fuente: [Propia]

Estimación del tiempo de inspección

Las trampas de vapor funcionan de manera continua o por proceso. El modo continuo se refiere a la operación constante durante el período de funcionamiento de la caldera. Por su parte, la trampa opera solo durante el tiempo de proceso del equipo de consumo [10]. El modo y tiempo de operación para cada tipo de trampa se detalla en Tabla 2.1 y Tabla 2.2. Se evidencia que los tiempos de operación de los purgadores son extensos como para realizar la inspección durante este lapso. Por esa razón, es fundamental fijar un período de medición representativo del proceso, este valor se estimó mediante la definición del tamaño de muestra para una población finita a partir de Ecuación 2.1.

$$n = \frac{N \times Z^2_{\alpha} \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z^2_{\alpha} \times p \times q}$$

Ecuación 2.1. Tamaño de muestra.

Fuente: [31, p. 5].

Donde:

N : Tamaño de la Población, s

Z : Valor crítico, calculado en tablas de distribución normal estándar.

α : Nivel de confianza.

p : Proporción esperada, 0.5

q : Proporción esperada de fallo, 0.5.

d : Error de predicción de (1%-9%)

Cabe destacar que el tamaño de la población se refiere al tiempo de operación del purgador en segundos. El nivel de confianza se relaciona de manera directa con el tamaño de muestra, por lo que se optó por trabajar con un nivel de 95% y 99%. Esto para comparar el comportamiento de la trampa en ambos tiempos de medición. Por último, se trabajó con un error de predicción de 5%, de acuerdo con valores recomendados en [31, p. 4].

Instalación del detector ultrasónico

Los equipos que se utilizaron para la instalación son el detector ultrasónico de referencia Ultra Trak 850s y un Data Logger (OM-DAQXL).

- **Sensor ultrasónico Ultra Trak 850**

El sensor ultrasónico es un equipo empleado para la monitorización de trampas de vapor a partir del ultrasonido originado por el fluido al atravesar un orificio. Su rango de operación se encuentra en el intervalo de 0 db a 100 db y cuenta con una sensibilidad automática para eliminar interferencias de ruido provenientes del medio [32]. El detalle de las características del sensor se encuentra en ANEXO 1.

El sensor consta de tres partes que se evidencia en Figura 2.2. Estas son el 1) módulo de escaneo, 2) módulo de conexión, 3) módulo de contacto. Por la dificultad de acceso a las trampas de vapor se fabricó dos módulos de contacto, una punta de contacto y un bloque imantado.

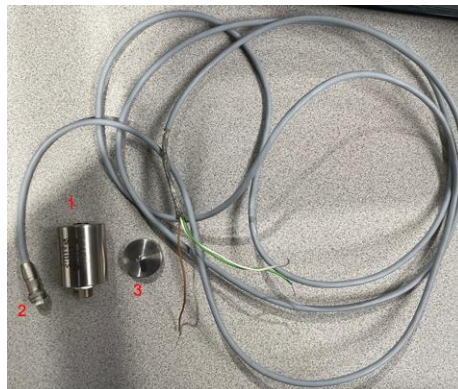


Figura 2.2. Fotografía sensor ultrasónico ULTRA TRAK 850

Fuente: [Propia]

Para lectura, visualización y almacenamiento de datos empleó el equipo OM-DAQXL de OMEGA. Este equipo cuenta con 8 entradas analógicas y una fuente externa de 24 VDC. Para la instalación del sensor, se configuró uno de los canales de acuerdo con las características de la señal de salida del sensor.

- **Circuito de instalación del detector ultrasónico**

Para la configuración del circuito de conexiones se identificó los siguientes componentes:

- Cables del sensor ultrasónico detallados en Tabla 2.3.
- Resistencia de 249 ohmios a modo de seguridad, para regular el paso de corriente por el sensor.
- Cable extra para cerrar el circuito.

El sensor ultrasónico requiere de una alimentación de voltaje de 24 VDC, por lo que se empleó la fuente externa de OM-DAQXL que proporciona ese voltaje. El polo positivo de la fuente se conectó al cable 1 y el negativo se conecta al cable 2, ambos cables son del sensor. Se colocó una resistencia en el canal 1 de la data logger OM-DAQXL, paralelo a este y se conectó el positivo del canal 1 con el cable 3 del sensor. Para cerrar el circuito se unió los polos negativos del canal 1 y de la fuente de alimentación. En la Figura 2.3 se representa el esquema del circuito de conexión del DU.

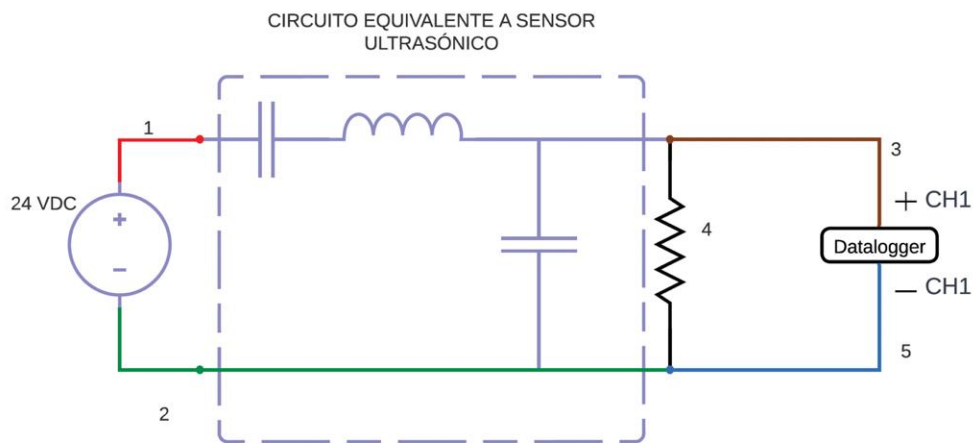


Figura 2.3. Conexión del DU a la data logger OM-DAQXL.

Fuente: [Propia]

Tabla 2.3. Detalle de cables del DU

Color de cables	Función
Rojo (1)	Cable para conexión con fuente alimentación
Rojo (2)	Cable de señal
Verde (3)	Tierra

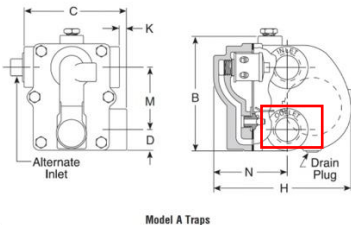

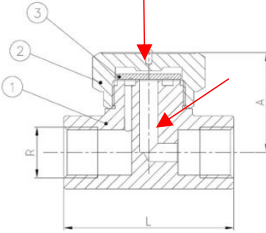

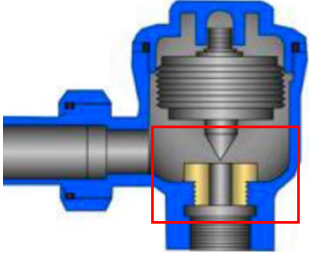

Fuente: [32, p. 7]

Montaje del detector ultrasónico

Para el montaje del DU es necesario conocer el orificio de descarga de la trampa de vapor debido que esta región es la fuente de ultrasonido [33]. La ubicación del orificio de descarga depende del tipo de trampa de vapor. Para localizar dicho orificio se revisó su mecanismo de accionamiento Y catálogo de las trampas de vapor a inspeccionar. Para montar el DU sobre la trampa de vapor se colocó el módulo de contacto imantado sobre trampas magnéticas o sujetadores plásticos en aquellas que no son magnéticas. A su vez, en

trampas de vapor con curvaturas o con espacios pequeños en relación con el diámetro del módulo imantado, se empleó la punta de contacto. La ubicación del DU para cada tipo de trampa de vapor se presenta en Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Ubicación del sensor para cada tipo de trampa de vapor.

Tipo de trampa	Mecanismo de la trampa de vapor	Ubicación del DU
Mecánica – Flotador y termostato		
Termodinámica de disco		
Termostática bimetalica		

Fuente:[34, p. 3], [35, p. 3]

Obtención de datos de mediciones

Una vez montado el sensor en la trampa de vapor se configura el canal de salida para la obtención de datos. Se inició reconociendo que la señal de salida del detector es corriente (mA). Esta señal es proporcional a un cambio lineal en el nivel de ultrasonido, medido en db. De acuerdo con las especificaciones del sensor [32] se aplicó Ecuación 2.2 para convertir los datos medidos en señal ultrasónica.

$$db = 6.3211 \times I_0(mA) - 2.9169$$

Ecuación 2.2. Relación de conversión de mA a db

Fuente: [32, p. 7].

Donde:

I_0 : Datos de corriente medidos con el DU, mA.

Medición de condensado

La Norma ISO 4185 es un estándar de carácter internacional que define el procedimiento para medir la cantidad de caudal de líquido en conductos cerrados [36]. Esta norma presenta dos metodologías de medición: pesaje estático y dinámico. Ambos procedimientos se basan en la medición de masa del líquido descargado en un tanque de pesaje durante un intervalo de tiempo. El pesaje estático recolecta una cantidad específica de líquido en un tiempo determinado, mientras que el pesaje dinámico monitoriza el peso del líquido en flujo continuo a través del tanque.

El proceso de medición inicia con la determinación la masa inicial del tanque de pesaje y cualquier líquido residual. Luego, se utiliza un desviador para dirigir el flujo del líquido hacia el tanque, iniciando un temporizador para registrar el tiempo de llenado necesario. Una vez que se considera que el llenado es suficiente para alcanzar la precisión deseada, se registra la masa final del tanque junto con el líquido acumulado. Con estos datos, incluyendo la diferencia de masas y el tiempo de llenado medido, se calcula la tasa de flujo del líquido según lo especificado en Ecuación 2.3.

$$q_m = \frac{m}{t} = \frac{m_1 - m_0}{t} \times 1.00106$$

Ecuación 2.3. Cálculo de flujo másico.

Fuente: [36]

La norma plantea el uso de distintos aparatos de almacenamiento, uno de ellos es el tanque de pesaje. El tanque debe ser hermético de debe tener la capacidad suficiente considerando los flujos esperados. No está definido una forma específica y es posible que se requiera paredes internas o deflectores para estabilizar el líquido y reforzar el tanque. La Norma ISO 7841, que define el procedimiento para medir la cantidad de vapor perdido en trampas de vapor, especifica que debe emplearse una capa de agua fría en el fondo del tanque [37]. Debido a la densidad del líquido cambia con la temperatura. El agua fría ayuda a mantener una temperatura constante dentro del tanque, minimizando las variaciones en la densidad del líquido y mejorando la precisión de la medición.

Para el propósito de esta investigación, la medición de flujo de condensado se realiza a partir del método de pesaje dinámico. Para ello, se trabajó con un tanque de 40 l y una balanza de 100 kg.

2.2 Tratamiento de datos

En esta sección se presenta los procedimientos para la estimación del porcentaje de trabajo de las trampas de vapor y las técnicas estadísticas para su validación.

Definición de fracción de trabajo

Según la literatura científica, no se define la fracción de trabajo de trampas de vapor. En un trabajo previo desarrollado por Guallpa [10] se definió la fracción de trabajo como el sumatorio tiempo de apertura de la trampa de vapor respecto al tiempo de operación. En esos instantes de apertura hay descarga de condensado. Se obtiene el porcentaje de descarga al relacionarlo con el tiempo completo de operación, mediante Ecuación 2.4.

$$F_{trabajo} = \frac{\sum t_{abierta}}{\sum t_{abierta} + \sum t_{cerrada}}$$

Ecuación 2.4. Fracción de trabajo definida por Guallpa.

Fuente: [10]

Donde:

$\sum t_{abierta}$	Sumatoria de tiempo abierta
$\sum t_{cerrada}$	Sumatoria de tiempo cerrada

Para aplicar este procedimiento se requiere establecer un límite de ultrasonido que indique cuando la trampa está cerrada. Se planteó ciertas discusiones respecto a esta definición que se describen en la sección de resultados.

En este trabajo de investigación se redefine el concepto de fracción de trabajo como una medida de la eficiencia de acuerdo con las siguientes metodologías:

1. Metodología por descarga de condensado (FTC) relaciona la cantidad de condensado realmente descargado con la capacidad máxima teórica de descarga. El valor de condensado drenado se obtiene siguiendo el procedimiento de medición experimental de condensado. Por su parte, el valor máximo se obtiene de la curva de carga de condensado definida por el fabricante y depende de la presión

diferencial de la trampa de vapor y el diámetro conexión. Esta fracción de trabajo se representa en Ecuación 2.5.

$$FT_C = \frac{\text{Condensado drenado} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)}{\text{Condensado drenado máximo} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)}$$

Ecuación 2.5. Fracción de trabajo por descarga de condensado.

Metodología por diagrama ultrasonido (FTU) se basa en relacionar el área bajo la curva del ultrasonido con la cantidad de condensado drenado durante el tiempo de operación. Y, la descarga de condensado máximo corresponde al área máxima del diagrama de ultrasonido, que se traza a partir del valor máximo. Este método de cálculo se expresa mediante Ecuación 2.6.

$$FT_U = \frac{\text{Área de curva db vs tiempo}}{\text{Área máxima}}$$

Ecuación 2.6. Fracción de trabajo con ultrasonido.

- **Función trapezoidal**

Con el objetivo de estimar el área bajo la curva de las gráficas en decibeles vs tiempo se aplicó la función de integración numérica trapezoidal. Esta regla se define mediante el área del trapecio que se genera al trazar una pendiente debajo de la curva y se calculó mediante Ecuación 2.7. Se utilizó el tiempo de medición como variable dependiente y los valores de ultrasonido como variable independiente.

$$\int_a^b f(x) = (b - a) \times \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

Ecuación 2.7. Función trapezoidal.

Fuente: [38, p. 621]

Indicadores estadísticos de comparación de flujo másico y ultrasonido

En distintas áreas del quehacer científico, se emplea indicadores estadísticos para la comparación entre conjuntos de datos. Estos permiten evaluar cuantitativamente el grado de relación entre variables [39]. Para este estudio, se empleó el coeficiente de correlación Rho Spearman y la prueba Kolmogórov-Smirnov (k-s test) para verificar la relación entre flujo másico y ultrasonido.

- **Coefficiente Rho-Spearman**

Es un índice que describe la relación entre dos variables. El coeficiente describe cómo cambian dos variables juntas. Esta variación puede ser positiva si cambian en la misma dirección o negativa si cambian en direcciones opuestas. El coeficiente de Spearman toma valores de -1 o 1, para definir correlaciones positivas o negativas perfectas. Se considera una correlación significativa cuando el coeficiente está por encima de 0.7 o por debajo de -0.7. Un valor cercano a 0 indica ausencia de correlación entre los datos [40][41]. A continuación, se presenta la ecuación para calcular el coeficiente Rho-Spearman.

$$\gamma^R = 1 - \frac{6 \sum id_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Ecuación 2.8. Correlación Rho-Spearman

Fuente:[41]

Donde:

n : Tamaño de muestra

d_i : Suma de las diferencias de rangos al cuadrado

- **Prueba Kolmogórov-Smirnov**

El test de Kolmogórov-Smirnov (KS) es una prueba no paramétrica utilizada para analizar si dos conjuntos de datos independientes provienen de la misma distribución, determinando la relación entre ambos conjuntos. Este análisis se basa en la diferencia absoluta entre las funciones de distribución acumulada (CDFs) de ambos conjuntos de datos [42]. La prueba establece una hipótesis nula con un intervalo de confianza del 5 al 95%. Para que el test sea considerado positivo, el valor del indicador KS debe ser mayor a 0.05 [43]. En este caso, la hipótesis definida es que los datos de flujo de condensado están correlacionados con el nivel de ultrasonido.

De este modo, para esta investigación se requiere que el K-S test sea positivo y el coeficiente de Spearman este en los rangos admisibles. La Tabla 2.5 resume los valores límite que los indicadores deben cumplir para validar ambos conjuntos.

Tabla 2.5. Valores aceptables de los indicadores estadísticos

Estadístico	Rango	Valor mínimo aceptable	Valor máximo
K-S test	0 - 1	0.05	1
Spearman	0 - 1	-0.7 o 0.7	1

Fuente: [40], [42]

Para la estimación de estos estadísticos se emplean distintos paquetes computacionales tales como Matlab, Excel y R Studio. En este proyecto se emplea el software R Studio.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología planteada.

Diagramas de ultrasonido de trampas de vapor

Se inspeccionó los purgadores de vapor durante los procesos producción de los equipos de consumo. Los tiempos de inspección se calcularon a partir del tamaño de muestra con 95% y 99%, y se detallan en

Los diagramas obtenidos mediante la inspección por ultrasonido proporcionan una representación del modo teórico de operación de los purgadores de vapor. En la Figura 3.1., el diagrama de la trampa termodinámica muestra ciclos distintos de apertura y cierre, característicos de su descarga intermitente. En contraste, el diagrama de la trampa de flotador y termostato en la Figura 3.2, se observa una modulación del ultrasonido entre 20 dB y 30 dB, lo cual es consistente con su descarga continua y modulante.

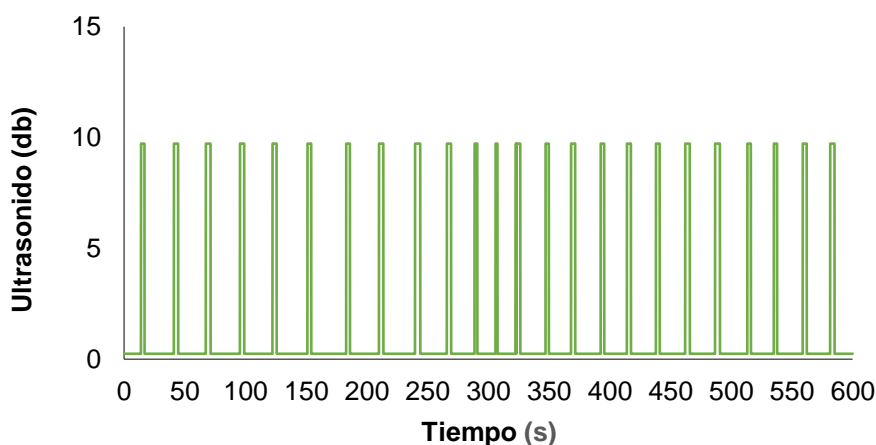


Figura 3.1. Diagrama de ultrasonido de trampa termodinámica TV1 - Planta Piloto DECAB.

Fuente: [Propia]

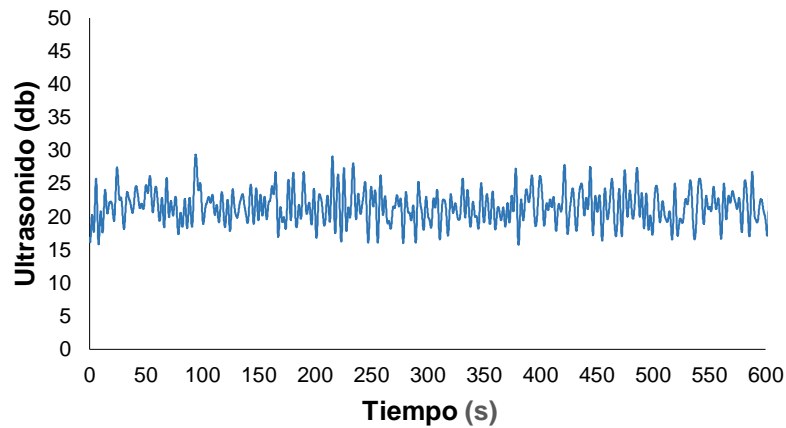


Figura 3.2. Diagrama de ultrasonido de trampa de flotador TV1 - Planta Alimentos.
Fuente: [Propia]

Discusión de la definición previa de fracción de trabajo

Se realizó el cálculo de fracción de trabajo a partir del tiempo de apertura de la trampa de vapor. Para ello, es necesario determinar el umbral de cierre del purgador. Seguidamente, se identificó los intervalos de tiempo cuando el nivel de ultrasonido supera el umbral establecido. Para de la trampa termodinámica, este procedimiento resulto sencillo porque los ciclos de apertura y cierre de la trampa son claramente identificables, debido a su modo de operación. En Figura 3.3 se muestra el límite de cierre, que corresponde al valor mínimo de ultrasonido registrado, que es cercano a cero. Esto quiere decir que, no se genera ultrasonido porque no hay flujo de condensado en el orificio de descarga.

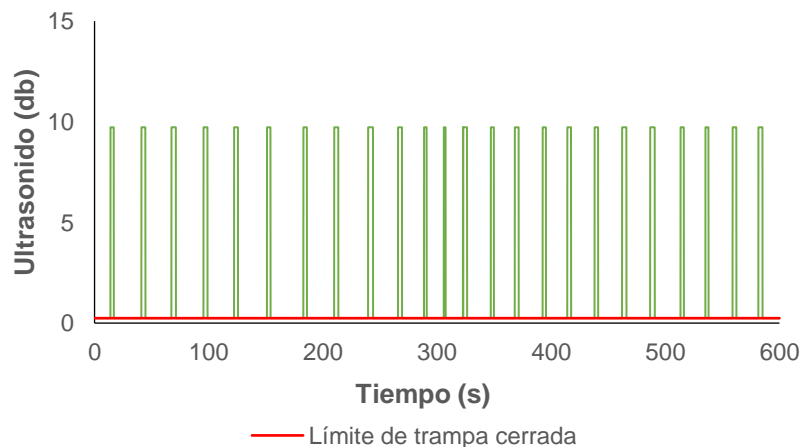


Figura 3.3. Diagrama de trampa termodinámica y su umbral de cierre.
La línea roja representa el límite de cierre.

Fuente: [Propia]

No ocurre lo mismo en las trampas de flotador y termostato. Se sabe que, por su modo de descarga este purgador no tiene un ciclo de cierre. Para aplicar la metodología basada en el tiempo de apertura de trampas, se consideró que niveles de ultrasonido bajos o cercanos a cero indican que la trampa está cerrada. Se establecieron tres umbrales distintos. El primero se determinó utilizando el valor mínimo de los datos. El segundo se calculó como el promedio de los valores mínimos observados. El tercero se definió a partir del percentil 25 de los datos, que incluye aquellos con menor repetitividad en la muestra. En Figura 3.4 se observa el diagrama y las restricciones de cierre.

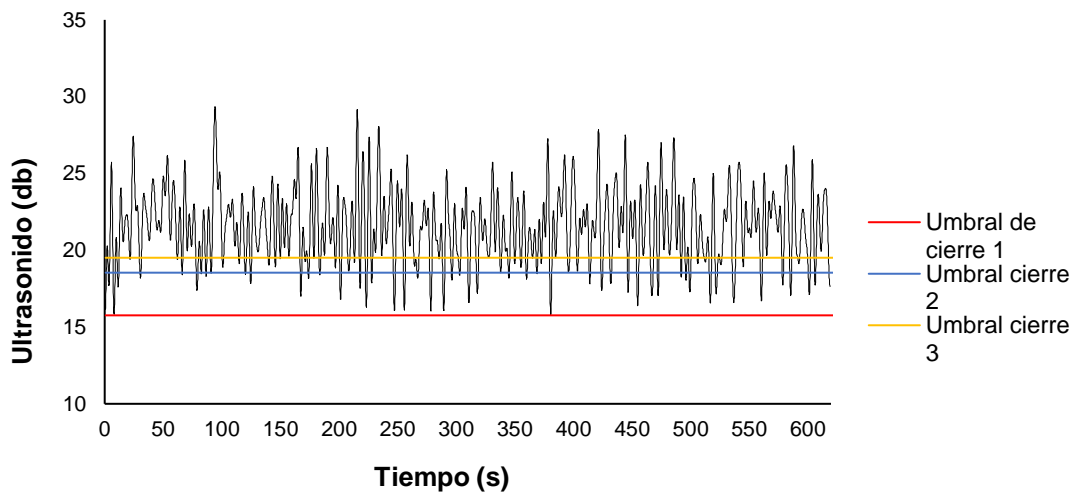


Figura 3.4. Diagrama de trampa de flotador con los límites de cierre. Las líneas representan los umbrales.

Fuente: [Propia]

Los resultados del porcentaje de trabajo para cada criterio de cierre se presentan en Tabla 3.1. Se identifica que la fracción de trabajo varía significativamente de acuerdo con el umbral definido. En este punto resulta complicado seleccionar un umbral debido a la falta de normativas o límites definidos en la literatura científica. De este modo, se comprueba la ambigüedad de la metodología, pues definir el límite es subjetivo.

Tabla 3.1. Fracción de trabajo por tiempo de apertura

Fracción de trabajo	
Límite de cierre 1	99.98%
Límite de cierre 2	89.99%
Límite de cierre 3	79.99%

Fuente: Propia

Otra desventaja de este procedimiento es que, se asume una descarga máxima de condensado en cada tiempo de apertura pues este concepto solo identifica la duración de tiempo. Sin embargo, en Figura 3.4, se evidencia que los picos de descarga no son siempre máximos en los intervalos de tiempo abierto. De manera que, se sobreestima la cantidad de condensado descargado. Este valor influye a la hora de diseñar el tanque de recuperación de condensado pues se sobredimensionaría el tamaño del tanque.

Esta definición es aplicable sin problema en las trampas termodinámicas, siempre que las descargas generen el mismo nivel de ultrasonido durante todos los tiempos de apertura.

Relación entre flujo másico de condensado y ultrasonido

Se aplicó los indicadores de Kolmogórov-Smirnov y coeficiente de Rho-Spearman a los sets de datos de flujo y ultrasonido de la trampa termodinámica. Se empleó el paquete de estadística R Studio. El programa para obtención de coeficientes se encuentra en ANEXO 7. El resultado de la prueba de Kolmogórov-Smirnov (K-S) es de 0.99. Este valor se encuentra dentro del límite admisible. La superposición de las curvas y la marca roja en la Figura 3.5 reflejan que la distancia máxima entre las variables es de $2.7105e-20$. Esto significa que los valores de flujo de condensado y ultrasonido presentan la misma distribución. Esta correlación perfecta indica que el ultrasonido puede ser utilizado como una medida precisa y confiable del flujo másico de condensado.

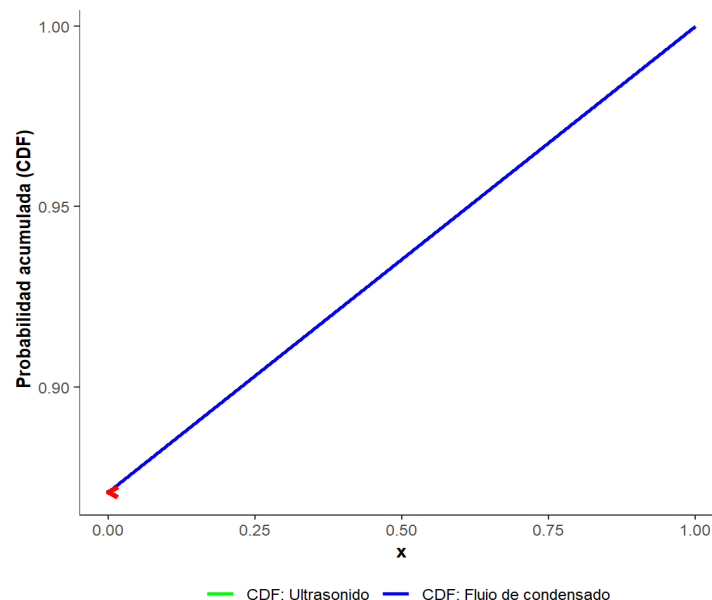


Figura 3.5. Función de distribución acumulada de flujo másico y ultrasonido.

Fuente: [Propia]

Por su parte, el valor de Rho-Spearman de 1 obtenido en este análisis revela una correlación positiva perfecta entre el flujo másico de condensado y las mediciones de ultrasonido. Esto significa que existe una relación directamente proporcional entre estas dos variables. Es decir, a mayor flujo másico de condensado, mayor será la lectura del ultrasonido y viceversa. En otras palabras, ambas variables aumentan o disminuyen en la misma proporción.

Fracción de trabajo por flujo de condensado y diagrama de ultrasonido

Una vez validada la relación entre la descarga de condensado y el nivel de ultrasonido se calculó la fracción de trabajo a partir de ambos conjuntos de datos. Esta comparación se realizó para la trampa de vapor termodinámica, pues en esta se midió la cantidad de condensado liberado.

Se calculó el porcentaje de trabajo por el método de descarga de condensado considerando que se drenó 2.5 kg/s durante los 10 minutos de medición. Por su parte el valor de descarga máxima se obtuvo mediante los valores establecidos por el fabricante de la trampa TD52 MLC [44, p. E]. El procedimiento para determinar la descarga máxima de condensado se presenta en ANEXO 6. La fracción de trabajo de acuerdo con la capacidad de descarga de condensado se presenta en Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Fracción de trabajo con carga de condensado

Condensado descargado (kg/s)	2.50
Condensado máximo a descargar durante la medición (kg/s)	19.92
FTC	12.55%

Fuente: [Propia]

Por otro lado, al aplicar la metodología por ultrasonido se obtienen los resultados mostrados en Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Fracción de trabajo por diagrama de ultrasonido

Área total	6000.00
Área bajo la curva del diagrama	775.00
FTU	12.92%

Fuente: [Propia]

Se evidencia que los porcentajes de trabajo son de 12.5 y 12.9% para ambos casos, respectivamente, tal como se muestra en Tabla 3.2 y Tabla 3.3. Es notorio la proximidad

entre estos valores, con un margen de diferencia menor a 5%. En ese sentido, se infiere la oportunidad de calcular esta fracción mediante los diagramas db vs tiempo. Es una ventaja debido a la complejidad del procedimiento para medir la cantidad de condensado generado. Sobre todo, cuando el flujo de condensado es intermitente o en las industrias donde es imposible detener o variar los procesos.

El valor de fracción de trabajo ofrece una idea de la cantidad de condensado descargado por la trampa de vapor. La trampa descargará y dirigirá el 13 % del condensado máximo para el que está diseñada hacia los tanques de recuperación. En el diseño de tanques de condensado, se ignora este valor y se asume un factor de 100%, es decir que la trampa descarga su máxima cantidad. De esta manera, el calcular esta fracción se evita el sobredimensionamiento de los sistemas de recuperación.

Fracción de trabajo para cada tipo de trampa

Se calculó la fracción de trabajo a partir del diagrama de ultrasonido para los demás tipos de trampas de vapor. Cabe recalcar que, se requiere de comprobación experimental y estadística tal como se hizo para la trampa termodinámica. Debido que, en las trampas termostáticas y de flotador y termostato no fue posible realizar la medición de flujo másico, pues los procesos industriales no podían ser interrumpidos.

El resultado de la fracción de trabajo para cada tipo de trampa inspeccionada se detalla en Tabla 3.4. Los porcentajes de trabajo de las trampas flotador y termostato resaltan frente a las demás. Esto se explica porque este tipo de trampa es empleada para manejo de altas cargas de condensado y el consumo de vapor es mayor. Además, es una trampa que siempre descarga. A diferencia de la trampa termodinámica que es usada en un proceso con menor consumo de vapor.

Además, se calculó la fracción de trabajo para los diagramas de las inspecciones realizadas durante los tiempos muestrales de 95% y 99% de confiabilidad. Los resultados que se resumen en Tabla 3.4 muestran que los porcentajes de trabajo son similares en ambos casos. Las variaciones de error oscilan entre el 1% y el 10%. Esto es ventajoso, ya que garantiza resultados confiables incluso en inspecciones de menor duración. Esto es importante en procesos industriales, donde las inspecciones pueden complicarse porque las trampas de vapor están en áreas de difícil acceso.

Tabla 3.4. Resultados de la fracción de trabajo

Código	Tipo de trampa	Fracción de trabajo, 99% confiabilidad	Fracción de trabajo, 95% confiabilidad	Error
D_TV1	Termodinámica	12.91%	11.91 %	7.75%
D_TV1	Termostática	48.31%	48.735	1%
A_TV1	Flotador y termostato	73.35%	69.93%	4.66%
A_TV2	Flotador y termostato	84.65%	84.89%	1%
A_TV3	Flotador y termostato	82.85%	86.83%	4.80%

Fuente: [Propia]

3.2 Conclusiones

En el desarrollo de este proyecto se inició con la revisión bibliográfica del funcionamiento de las trampas de vapor, su modo de operación y modos de falla. La norma ISO 6704 define tres generalidades de trampas de vapor: mecánica, termodinámica y termostática. Se identificó que este tipo de trampas falla de manera abierta o cerrada. Estas fallas provocan pérdidas significativas de vapor o acumulación de condensado que disminuye la transferencia de calor en el sistema. Esta información fue necesaria para el reconocimiento de los tipos de trampa en las mediciones de campo. Además, permitió verificar que los diagramas de ultrasonido se relacionen con el comportamiento teórico de las trampas.

En cuanto al diseño conceptual del detector ultrasónico se realizó el circuito de conexiones del sensor con el data logger. Este circuito se diseñó según las características de un circuito piezoeléctrico. Para esta conexión se requirió una fuente de voltaje externa y una resistencia de 249 ohmios. Se configuraron los canales de la data logger para lectura de datos de corriente, que es la unidad de salida del detector. Una vez realizado esto, se considera la relación lineal existente entre la corriente y ultrasonido para obtener las mediciones en decibelios, dB.

Una vez realizada la configuración para adquirir datos, se montó el detector en las trampas de vapor. Es esencial reconocer la fuente de ultrasonido que se genera en el orificio de descarga. En esta zona se produce el cambio de flujo laminar a turbulento generando un ultrasonido que es detectado por el sensor. Se empleó la ficha técnica de la trampa de vapor para identificar la zona de descarga. De esta manera, se asegura una detección precisa y confiable del ultrasonido emitido durante el funcionamiento de la trampa de vapor.

El cálculo de la fracción de trabajo permite dimensionar la cantidad de condensado descargado en un sistema de vapor. Este valor es de máxima importancia en el diseño de tanques de recuperación para evitar el sobredimensionamiento. Para ello, se desarrolló una metodología que se basó en correlacionar el área bajo la curva del diagrama de ultrasonido con la cantidad de condensado descargado. Se comprobó que estos dos conjuntos de datos presentan una correlación positiva y pertenecen a la misma distribución estadística. Se verificó utilizando el indicador Rho de Spearman y la prueba de Kolmogórov-Smirnov. De manera que, es posible usar el ultrasonido como medida de flujo de condensado. Este resultado representa una ventaja ya que permite calcular la fracción de trabajo utilizando exclusivamente los diagramas de ultrasonido. Este enfoque es más práctico en comparación con la medición directa del condensado, facilitando su implementación y uso en entornos industriales.

Esta metodología se validó para las trampas termodinámicas. En las trampas termostáticas y de flotador y termostato la medición de condensado no se pudo realizar debido a la dificultad de interrumpir los procesos industriales. Por lo tanto, la correlación en estos casos aún requiere validación adicional. Sin embargo, en este documento se aproximó la metodología desarrollada a las trampas en cuestión.

3.3 Recomendaciones

Es crucial desarrollar inspecciones de trampas de vapor que combinen distintas técnicas de inspección. Por esa razón, se recomienda implementar un equipo de audición para la inspección de trampas de vapor. Esto permitirá esto permite mejorar la interpretación de los diagramas obtenidos con el sonido del flujo en el purgador.

Para trabajos futuros se recomienda realizar pruebas experimentales del flujo de condensado descargado de las trampas de termostáticas y de flotador y termostato. Para verificar la relación entre flujo másico de condensado y ultrasonido. Y de esa manera aplicar la metodología planteada en este documento.

Sería interesante aplicar la metodología de estimación de fracción de trabajo en el diseño de tanques de recuperación de condensado para optimizar su tamaño y capacidad. Al implementar esta metodología, se puede obtener una evaluación precisa de la cantidad de condensado que se descarga en el sistema, lo que permite diseñar tanques que se ajusten más adecuadamente a las necesidades reales del proceso.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Davenport y N. Wayth, *Statistical Review of World Energy*, 73rd edition. 2024.
- [2] V. B. Nguyen, «Does governance contribute to the public spending – CO2 emissions nexus in developing economies? Policy lessons for sustainable development», *Public Sect. Econ.*, vol. 48., n.º 1, pp. 79-101, mar. 2024, doi: 10.3326/pse.48.1.4.
- [3] V. V. Venkatesan, «Steam System Improvement: A Case Study», *Energy Eng.*, vol. 96, n.º 1, pp. 16-29, ene. 1999, doi: 10.1080/01998595.1999.10530445.
- [4] M. E. Walker, Z. Lv, y E. Masanet, «Industrial Steam Systems and the Energy-Water Nexus», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, n.º 22, pp. 13060-13067, nov. 2013, doi: 10.1021/es403715z.
- [5] Spirax Sarco, «Introduction to Condensate Recovery | Spirax Sarco». Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/condensate-recovery/introduction-to-condensate-recovery?sc_lang=en-GB
- [6] A. Zeb, «Design rules for steam condensate systems», 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.13695.69287.
- [7] R. A. Vera Viera, «Trampas de vapor para la mejora de la eficiencia energética en el sector industrial», *Polo Conoc. Rev. Científico - Prof.*, vol. 7, n.º 3, p. 27, 2022, Accedido: 29 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8399863>
- [8] V. H. Hidalgo Diaz, J. L. Palacios Encalada, y A. P. Peña, «Técnicas de Gestión Energética en Sistemas de Vapor», *Rev. Politécnica*, vol. 35, n.º 3, Art. n.º 3, feb. 2015, Accedido: 29 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/348
- [9] A. García Pérez, «Análisis e implantación de medidas de eficiencia energética en redes de distribución de vapor y condensado», *Analysis and implementation of energy efficiency measures in steam and condensate loops*, oct. 2017, Accedido: 29 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/6043>
- [10] C. V. Gualpa Tamayo, «Determinación de la fracción de trabajo de trampas de vapor en la industria ecuatoriana usando el método ultrasónico», bachelorThesis, Quito,

2016., 2016. Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16635>

[11] EMERSON, *Yarway Industrial Steam Trapping Handbook*. Estados Unidos, 2017.

[12] Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), «Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor.», 2011.

[13] N. R. Alvarez González, «Eficiencia energética en la red de distribución de vapor a través de la recuperación del condensado en una industria de alimentos», other, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. Accedido: 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>

[14] J. J. Gómez Dalgo, «Rediseño y recuperación del sistema de retorno de condensado para el ahorro de energía de la empresa Ecuajugos», bachelorThesis, 2012. Accedido: 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16617>

[15] Spirax Sarco, «Ahorro de Costos en la Recuperación de Condensado», Recuperación de condensado con sistemas de vapor. Accedido: 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.spiraxsarco.com/global/es-PE/blog/ahorro-de-costos>

[16] F. Goodarzvand-Chegini, L. Samiee, y N. Rahmanian, «Energy savings from flash steam recovery: An industrial case study», *Energy Convers. Manag. X*, vol. 19, p. 100393, jul. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100393.

[17] Spirax Sarco, *DESIGN OF FLUID SYSTEMS*. Blythewood, 2004.

[18] A. E. Borroto Nordelo, *Ahorro de Energía en Sistemas de Vapor*. Finland: Universidad de Cienfuegos, 2005.

[19] International Organization for Standardization, ISO, «ISO 6704:1982 - Automatic steam traps — Classification», ISO. Accedido: 23 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/13145.html>

[20] TLV, «Cómo trabajan las trampas Mecánicas: Una mirada a su mecanismo y méritos», TLV. Accedido: 4 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/steamtrap-basics/mechanical-steam-traps>

- [21] Spirax Sarco, «Mechanical Steam Traps | Spirax Sarco». Accedido: 8 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-traps-and-steam-trapping/mechanical-steam-traps?sc_lang=en-GB
- [22] Spirax Sarco, «Thermostatic Steam Traps | Spirax Sarco». Accedido: 8 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-traps-and-steam-trapping/thermostatic-steam-traps?sc_lang=en-GB
- [23] TLV, «Cómo funcionan las trampas de vapor termostáticas de tipo bimetalico: Una mirada a sus mecanismos y ventajas», TLV. Accedido: 7 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/steamtrap-basics/how-bimetal-traps-work>
- [24] Spirax Sarco, «Learn About steam | Thermodynamic Steam Traps | Spirax Sarco». Accedido: 8 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-traps-and-steam-trapping/thermodynamic-steam-traps?sc_lang=en-GB
- [25] Programa de Eficiencia Energética Industrial de ONUDI, *Manual de Optimización de Sistemas de Vapor Industrial*. Colombia, 2018.
- [26] TLV, «Cómo Trabaja una Trampa de Disco: Una Mirada a su Mecanismo y sus Méritos | TLV». Accedido: 7 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/steamtrap-basics/how-disc-traps-work>
- [27] W. T. Deacon, «Testing traps pays dividends». Plant Services, 1991.
- [28] TLV, «A Guide to Steam Trap Testing», TLV. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tlv.com/steam-info/steam-theory/trap-considerations/steam-trap-test>
- [29] K. Paffel, «Methods For Testing Steam-Trap Stations», Chemical Engineering. Accedido: 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.chemengonline.com/methods-testing-steam-trap-stations/>
- [30] UE Systems, «ULTRAPROBE 100, Manual de Instrucciones». UE Systems. [En línea]. Disponible en: <https://www.uesystems.com/wp-content/uploads/manual-es-UP100.pdf>

- [31] S. Aguilar-Barojas, «Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud», *Salud En Tabasco*, vol. 11, n.º 1-2, pp. 333-338, 2005, Accedido: 8 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206>
- [32] UE Systems, «Manual del sensor analógico inteligente UltraTrak 850S - UE Systems», MANUAL DEL SENSOR ANALÓGICO INTELIGENTE ULTRATRAK 850S. Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.uesystems.com/downloads/manual-ultratrak-850s-smart-analog-sensor/>
- [33] UE System, «Inspección de purgadores de vapor – ahorro de costes y eficiencia energética», UE Systems. Accedido: 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.uesystems.com/es/resources/webinars/>
- [34] Spirax Sarco, «Purgador de boya cerrada: FT14 y FT14HC (1" HC, 1¼", 1½" y 2")». 2009.
- [35] Spirax Sarco, «Purgadores de vapor termodinámicos: TD52M, TD52MLC, TD52MA y TD52MLCA». 2023.
- [36] International Organization for Standardization, ISO, «ISO 4185:1980 - Measurement of liquid flow in closed conduits — Weighing method». Accedido: 11 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/9959.html>
- [37] International Organization for Standardization, ISO, «ISO 7841:1988 - Automatic steam traps — Determination of steam loss — Test methods», ISO. Accedido: 11 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/14762.html>
- [38] S. Chapra, *Metodos numericos para ingenieros*, 6ª Ed. México: McGraw-Hill, 2011.
- [39] G. Zhao *et al.*, «Spearman rank correlations analysis of the elemental, mineral concentrations, and mechanical parameters of the Lower Cambrian Niutitang shale: A case study in the Fenggang block, Northeast Guizhou Province, South China», *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 208, p. 109550, ene. 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109550.
- [40] P. Schober, C. Boer, y L. Schwarte, «Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation», *Anesth. Analg.*, vol. 126, p. 1, feb. 2018, doi: 10.1213/ANE.0000000000002864.

- [41] E. Apaza Zúñiga *et al.*, «La Correlación de Pearson o de Spearman en caracteres físicos y textiles de la fibra de alpacas», *Rev. Investig. Vet. Perú*, vol. 33, n.º 3, may 2022, doi: 10.15381/rivep.v33i3.22908.
- [42] A. Moráguez-Iglesias, M. del P. Espinosa-Torres, y A. G.- Huerta, «La prueba de hipótesis Kolmogorov-Smirnov para dos muestras pequeñas con una cola», *Luz*, vol. 14, n.º 1, pp. 78-90, 2015.
- [43] R. H. C. Lopes, I. D. Reid, y P. R. Hobson, «The two-dimensional Kolmogorov-Smirnov test», *Proceedings of Science*, 2007. Accedido: 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/1166>
- [44] Spirax Sarco, «Purgadores de vapor termodinámicos | Colombia | Spirax Sarco». Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.spiraxsarco.com/global/es-CO/products/steam-traps/thermodynamic-steam-traps>

5 ANEXOS

ANEXO 1. Especificaciones técnicas del sensor

En esta sección se detalla las características técnicas para la conexión del sensor ultrasónico. Se presenta también la ecuación de correlación y la curva entre corriente (mA) y ultrasonido (dB).

Sensor Parameter	Parameter Description
Power Supply Voltage	23 VDC to 26 VDC
Power Supply Current Draw	30mA DC Max, Typical
Current Output Type	Milliamp DC, Demodulated/Heterodyned
Current Output Response	Linear, Proportional to 0 dB to 100 dB of Change in Detected Ultrasonic Signal
Current Output Range	0.500 mA DC to 16.280 mA DC @ 0.158 mA/dB of Change in Detected Ultrasonic Signal (Typical)
Current Output Compliance Voltage	3.3 VDC
dB Output Transfer Function	dB Output = + 6.321 x (Current Output Reading), mA DC - 2.917 Db
Current Output Accuracy	Less Than ± 1 dB of Reading, Typical
Ambient Operating Temperature Range	Standard Range = -20 °C to +60 °C Extended Range = -30 °C to +80 °C (Requires High Temp Cable)
Δ Current Output (Temperature)	+2 dB @ - 20 °C -2 dB @ +60 °C +3 dB @ -30 °C -4 dB @ +80 °C
Sensitivity Adjustment	Automatic, Thru the 0 dB to 100 dB Output Range
Connection Cable	3 Wire with Shield, Removable
Cable lengths	3 meters (10 ft.) 10 meters (33 ft.) 20 meters (66 ft.) 30 meters (100 ft.)
Cable/Housing Connector	Harsh Environment, Meets or Exceeds IP67 and NEMA 6P
Cable/Housing Shielding	RF Shielded
Housing	Stainless Steel, Water Resistant and Dust Proof, Meets IP67 and NEMA 6P
Transducer	Piezoelectric
Method of Attachment	10/32 UNF Mounting Hole
Firmware	Upgradable

*Note: Specifications are subject to change without notice.

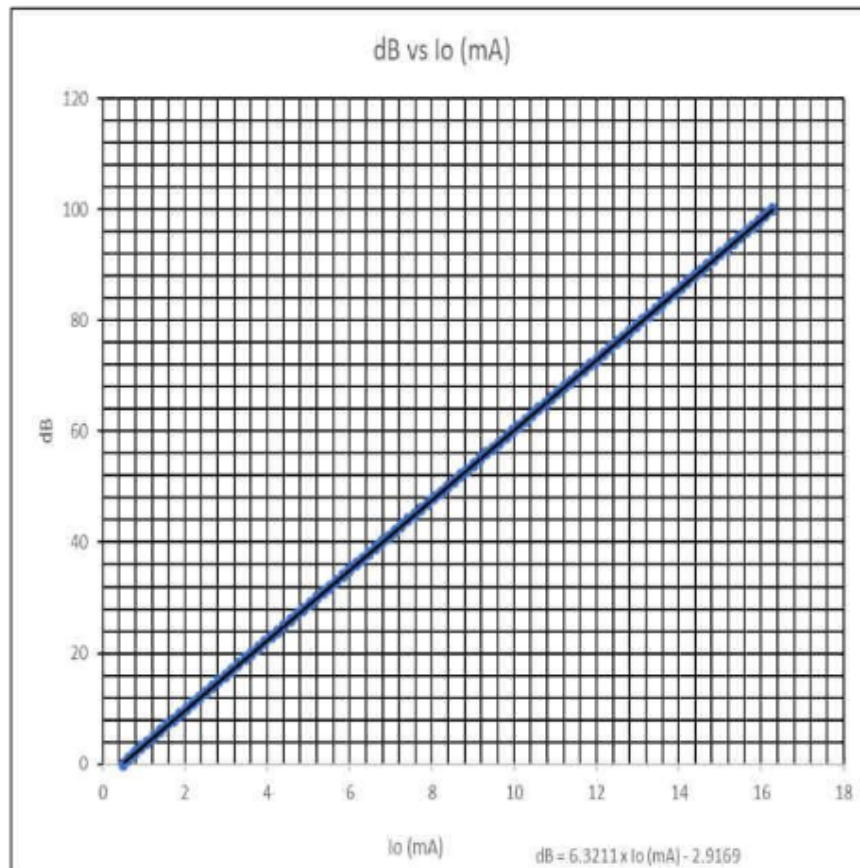
1.4.3 Wiring Connections

Wire Colour	Function
Black	Ground
Red	Power Supply (V_{supply}) +24 VDC Nominal +23 to +26 Typical
Clear	Current Output 16.3 mA Max
Green	RF Shield

1.4.4 Current Output & Power Supply Current Draw

The 850S's quiescent power supply current draw is approximately 12mA. In sensing mode add the current output to the quiescent power supply current draw to obtain the operational power supply current draw (30mA maximum typical).

1.4.5 Typical Transfer Curve



ANEXO 2. Resumen de las campañas de inspección

Industria de Alimentos



Figura 5.1. Inspecciones iniciales de temperatura y método auditivo de una trampa de flotador y termostato.

Fuente: [Propia]

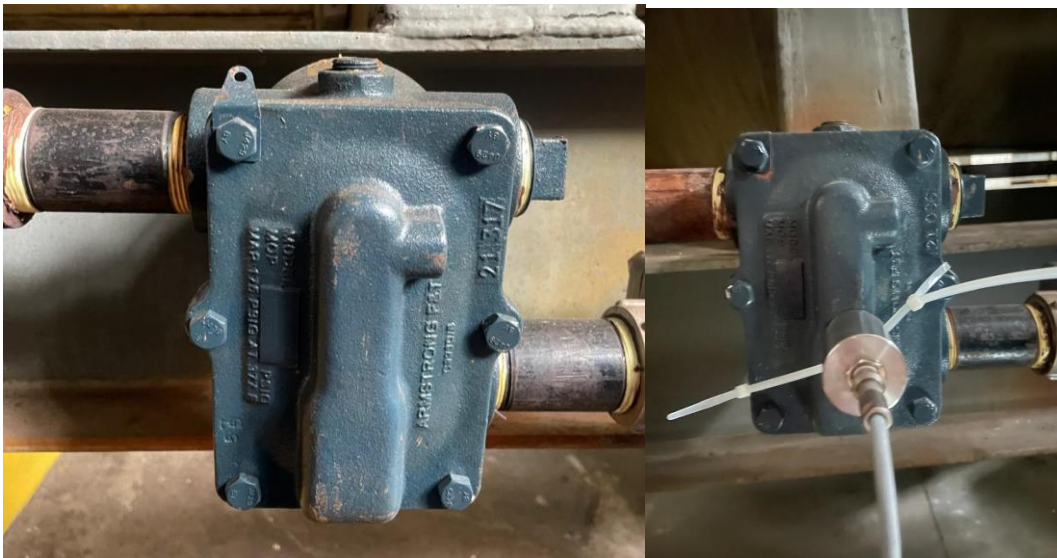


Figura 5.2. Trampa de flotador y termostato y montaje del sensor.

Fuente: [Propia]

A continuación, se presenta videos de funcionamiento de tres trampas de vapor de flotador y termostato empleadas en los digestores 1-3.

[Videos Trampas Vapor](#)

**Planta Piloto del Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología
DECAB**



Figura 5.3. Equipos de consumo de la Planta Piloto DECAB.

Fuente: [Propia]



Figura 5.4. Montaje del sensor en la trampa termostática

Fuente: [Propia]

Medición de condensado



Figura 5.5. Sistema implementado para medición de condensado.

Fuente: [Propia]

ANEXO 3. Tiempo muestral para medición con ultrasonido.

Tabla 5.1. Tiempo muestral de medición con ultrasonido.

Industria de Alimentos						
N°	Equipo de consumo	Código	Tipo	Tiempo de operación (h/día)	Tiempo de medición, 99% de confiabilidad (min)	Tiempo de medición, 95% de confiabilidad (min)
1	Cocinador 1	A_TV1	Flotador y termostato	16	10	6
2	Cocinador 2	A_TV2	Flotador y termostato	16	10	6
3	Cocinador 3	A_TV3	Flotador y termostato	16	10	6
4	Cocinador 4	A_TV4	Flotador y termostato	12	10	6
5	Cocinador 5	A_TV5	Flotador y termostato	12	10	6

Planta Piloto DECAB						
N°	Equipo de consumo	Código	Tipo	Tiempo de operación (h/día)	Tiempo de medición, 99% de confiabilidad (min)	Tiempo de medición, 95% de confiabilidad (min)
1	Marmita	D_TV1	Termodinámica	1	9	5
2	Destilador	D_TV2	Termostática	12	10	6

Fuente: Propia

ANEXO 4. Diagramas de las trampas de vapor de la Planta de Alimentos

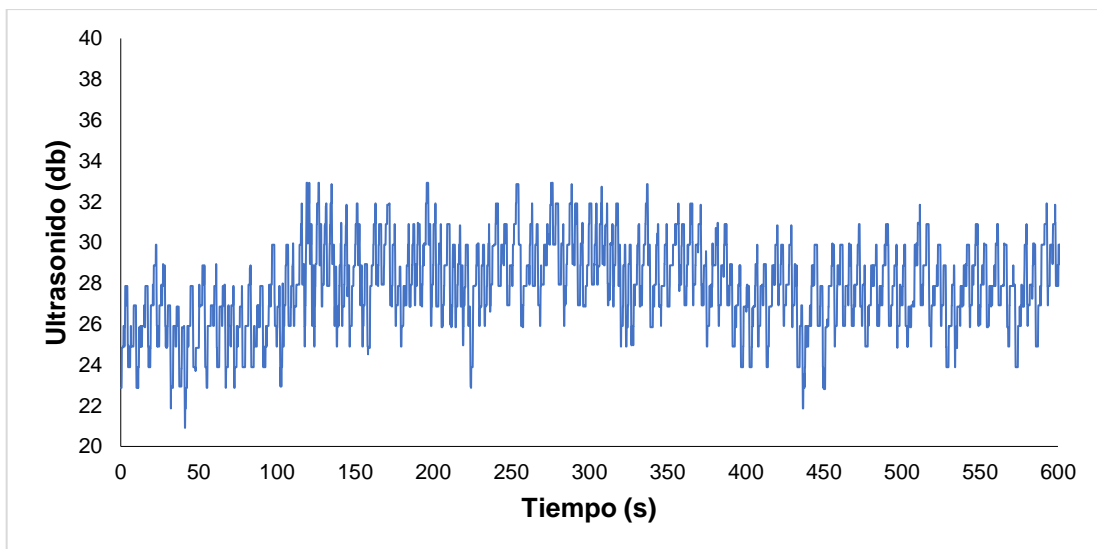


Figura 5.6. Ultrasonido de trampa de flotador y termostato TV2- Planta de Alimentos.

Fuente: Propia

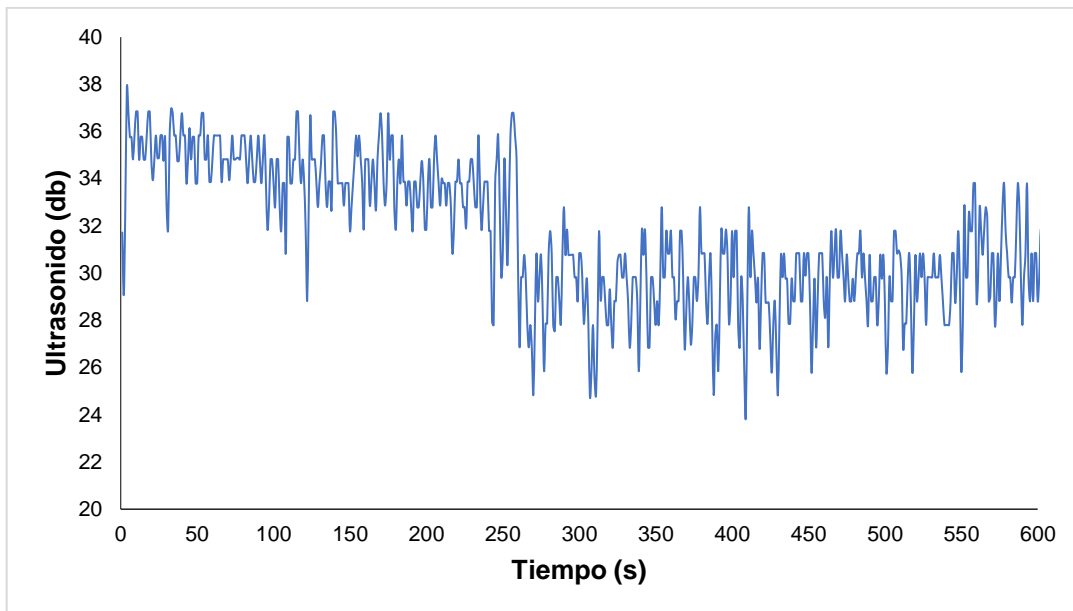


Figura 5.7. Ultrasonido de trampa de flotador y termostato TV3 – Planta de Alimentos.

Fuente: Propia

ANEXO 5. Diagramas de las trampas de vapor del DECAB

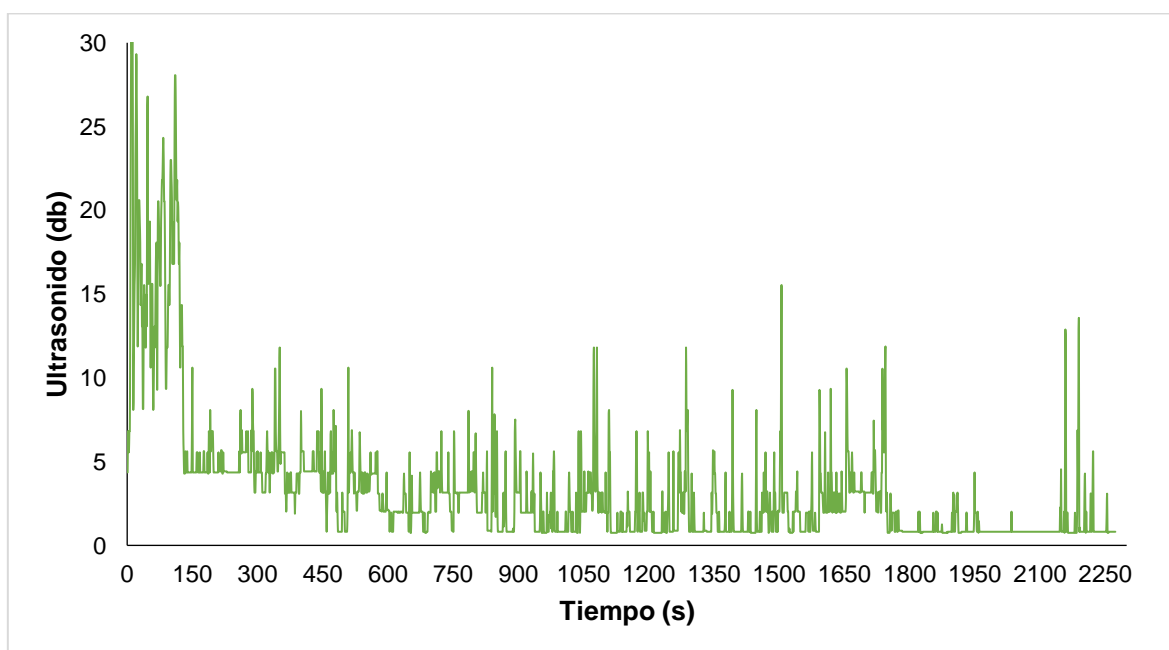


Figura 5.8. Ultrasonido de trampa termostática - Destilador.

Fuente: Propia

ANEXO 6. Estimación de la descarga máxima de condensado

La carga máxima de condensado es el punto de intersección entre la presión diferencial de la trampa de vapor y el diámetro de conexión. Se trabajó con una presión 3.5 kPa y el diámetro de ½ in.

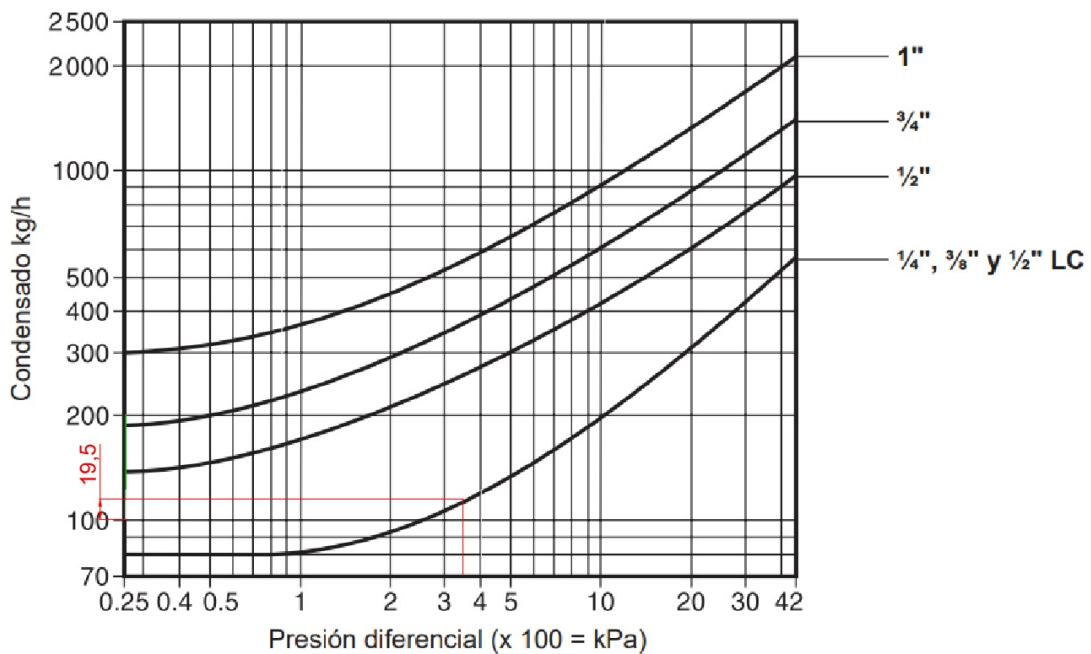
De acuerdo con la intersección, se tiene que:

$$\text{condensado_m\u00e1ximo} = 119.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Como el tiempo de medición fue durante 10 minutos es necesario trabajar con el flujo de condensado en kg/s.

$$\text{condensado_m\u00e1ximo} = 119.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} \times 10\text{min}$$

$$\text{condensado_m\u00e1ximo} = 19.92 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$



ANEXO 7. Código para estimar los indicadores estadísticos de comparación

```

# Cargando Libreria -----
-----
library( readxl )

## Warning: package 'readxl' was built under R version 4.2.1

library( tidyverse )

## Warning: package 'tidyverse' was built under R version 4.2.1

## — Attaching packages ————— tidyverse 1.3.2 —
## ✓ ggplot2 3.4.3      ✓ purrr  1.0.2
## ✓ tibble  3.2.1      ✓ dplyr  1.1.3
## ✓ tidyr   1.3.0      ✓ stringr 1.5.0
## ✓ readr   2.1.3      ✓ forcats 0.5.2

## Warning: package 'ggplot2' was built under R version 4.2.3
## Warning: package 'tibble' was built under R version 4.2.3
## Warning: package 'tidyr' was built under R version 4.2.3
## Warning: package 'readr' was built under R version 4.2.1
## Warning: package 'purrr' was built under R version 4.2.3
## Warning: package 'dplyr' was built under R version 4.2.3
## Warning: package 'stringr' was built under R version 4.2.3
## Warning: package 'forcats' was built under R version 4.2.1

## — Conflicts ————— tidyverse_conflicts() —
## ✗ dplyr::filter() masks stats::filter()
## ✗ dplyr::lag()     masks stats::lag()

library( Matching )

## Warning: package 'Matching' was built under R version 4.2.3

## Loading required package: MASS
##
## Attaching package: 'MASS'
##
## The following object is masked from 'package:dplyr':
##
##   select
##
## ##
## ## Matching (Version 4.10-14, Build Date: 2023-09-13)
## ## See https://www.jsekhon.com for additional documentation.

```

```

## ## Please cite software as:
## ## Jasjeet S. Sekhon. 2011. ``Multivariate and Propensity Score Mat
ching
## ## Software with Automated Balance Optimization: The Matching packa
ge for R.``
## ## Journal of Statistical Software, 42(7): 1-52.
## ##

# Lectura de datos -----
-----
estacionario <- read_excel("C:/Users/melany/Desktop/KV/estacionario.xlsx
",
                           sheet = "Prueba de Kolmogrov", skip = 15)

## New names:
## • `` -> `...12`
## • `` -> `...13`
## • `` -> `...14`
## • `` -> `...15`
## • `` -> `...16`
## • `` -> `...17`

# Preparacion de datos -----
-----
estacionario$db = estacionario$`db (y)`
estacionario$fm = estacionario$`FLUJO MASICO (y)`
estacionario = estacionario[ , c( "N", "db", "fm" ) ]
# Creando data frame -----
-----
datos <- data.frame( x = rep( estacionario$N, 2 ),
                    Valor = c( estacionario$db, estacionario$fm ),
                    Variable = c( rep( "db", 6000 ), rep( "fm", 6000 )
) )
datos %>%
  ggplot( aes( x = Valor, fill = Variable ) ) +
  geom_density( alpha = 0.5 ) +
  scale_fill_manual( values = c( "gray60", "orangered2" ) ) +
  labs( title = "Medidas observadas de 'db' y de 'flujo másico' ",
        subtitle = "Muestras de 6000 observaciones",
        fill = "Variable" ) +
  theme_bw() +
  theme(legend.position = "bottom")

# Cálculo de la función de distribución acumulada empírica
# Se ajustan las funciones ecdf con cada muestra.
ecdf_db <- ecdf( datos %>% filter( Variable == "db" ) %>% pull( Valor )
)
ecdf_fm <- ecdf( datos %>% filter( Variable == "fm" ) %>% pull( Valor )
)
# Se calcula la probabilidad acumulada de cada valor de salario observad
o con cada

```

```

# una de Las funciones ecdf.
grid_valor <- unique( datos %>% pull( Valor ) )
prob_acumulada_ecdf_db <- ecdf_db( v = grid_valor )
prob_acumulada_ecdf_fm <- ecdf_fm( v = grid_valor )
# Se unen Los valores calculados en un dataframe.
df_ecdf <- data.frame(
  valor = grid_valor,
  ecdf_db = prob_acumulada_ecdf_db,
  ecdf_fm = prob_acumulada_ecdf_fm
) %>%
  pivot_longer(
    cols = c( ecdf_db, ecdf_fm ),
    names_to = "variable",
    values_to = "ecdf"
  )
grafico_ecdf <- ggplot( data = df_ecdf,
  aes( x = valor, y = ecdf, color = variable ) ) +
  geom_line( size = 1 ) +
  scale_color_manual( values = c( "gray60", "orangered1" ) ) +
  labs(
    title = "Función de distribución acumulada empírica valor",
    subtitle = "Muestras de 6000 observaciones por variable",
    color = "Variable",
    y = "Probabilidad acumulada"
  ) +
  theme_bw() +
  theme(legend.position = "bottom",
    plot.title = element_text(size = 12))

## Warning: Using `size` aesthetic for lines was deprecated in ggplot2 3
## .4.0.
## i Please use `linewidth` instead.
## This warning is displayed once every 8 hours.
## Call `lifecycle::last_lifecycle_warnings()` to see where this warning
## was
## generated.

grafico_ecdf

# Cálculo de La distancia Kolmogorov-Smirnov
# Se calcula La diferencia absoluta entre Las probabilidades acumuladas
# de cada
# función.
abs_dif <- abs( prob_acumulada_ecdf_db - prob_acumulada_ecdf_fm )
# La distancia Kolmogorov-Smirnov es el máximo de Las distancias absolut
# as.
distancia_ks <- max( abs_dif )
paste("Distancia Kolmogorov-Smirnov:", distancia_ks)

## [1] "Distancia Kolmogorov-Smirnov: 1"

```

```

indice_ks <- which.max( abs_dif )
grafico_ecdf +
  geom_segment( aes(
    x = grid_valor[ indice_ks ],
    xend = grid_valor[ indice_ks ],
    y = prob_acumulada_ecdf_db[ indice_ks ],
    yend = prob_acumulada_ecdf_fm[ indice_ks ]
  ),
  arrow = arrow( ends = "both", length = unit( 0.2,"cm" ) ),
  color = "black" )

# Estadístico
test <- ks.test(
  x = datos %>% filter( Variable == "db" ) %>% pull( Valor ),
  y = datos %>% filter( Variable == "fm" ) %>% pull( Valor )
)

## Warning in ks.test.default(x = datos %>% filter(Variable == "db") %>%
## pull(Valor), : p-value will be approximate in the presence of ties

print( paste0( "El valor del estadístico es ", round( test$statistic, 2
) ) )

## [1] "El valor del estadístico es 1"

print( paste0( "El p-valor es ", round( test$p.value, 2 ) ) )

## [1] "El p-valor es 0"

# Solución por bootstrapping
test_ks_boot <- Matching::ks.boot(
  Tr = datos %>% filter( Variable == "db" ) %>% pull( Valor ),
  Co = datos %>% filter( Variable == "fm" ) %>% pull( Valor ),
  alternative = "two.sided",
  nboots = 5000
)
print( paste0( "El p-valor es ", round( test_ks_boot$ks.boot.pvalue, 2 )
) )

## [1] "El p-valor es 1"

# Analisis de correlaion -----
-----
coef_cor = cor( x = estacionario$db, y = estacionario$fm )
print( paste0( "El coeficiente de correlación de Pearson es ", round( co
ef_cor, 5 ) ) )

## [1] "El coeficiente de correlación de Pearson es 0.999"

# Análisis -----
-----
# Prueba de Kolmogrov para identificar si 'db' y 'fm' tienen la misma di
stribución -----

```


Sean X e Y dos variables aleatorias independientes Las hipótesis nula y alternativa son las siguientes:
H_0 : La distribución de X ES IGUAL a la distribución de Y .
H_1 : La distribución de X ES DIFERENTE a la distribución de Y .

El p-valor es menor a $2.2e-169$, inferior a los niveles de significación habituales,
por lo que no hay pruebas para aceptar la hipótesis nula.
Esto significa que no hay pruebas estadísticas suficientes para concluir que las
distribuciones de las dos muestras (x e y) son significativamente iguales entre sí.