

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un calorímetro de estrangulamiento adaptado para el laboratorio de termofluidos

INGE-2948

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Robert Alexander Heras Briones

Jean Carlos Ramírez Rodríguez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a Dios, quien en su infinito amor me cargó cuando más duro fue este camino, a mis padres, a mis hermanos, a mi tío quien en vida fue el ingeniero John Briones, a mi perrita Mona quien me acompañó hasta cuando pudo en mis largas noches de estudio y a Pamela quien siempre me apoyó en cada paso. También a aquellos que por situaciones adversas tuvieron que abandonar la carrera y renunciar a este sueño.

Robert Heras Briones

Este trabajo lo dedico a la memoria de mi padre, quien siempre soñó con verme graduado en la ESPOL. Le prometí que alcanzaría esta meta, y hoy cumplo con ese deseo que fue también el mío. Este logro es para honrar su recuerdo, su esfuerzo y el ejemplo de vida que me dejó.

Jean Carlos Ramírez Rodríguez

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a la Virgen. A mis papás quienes, en su amor, siempre me incentivaron a estudiar y apuntar alto. A mis hermanos el doctor Pablo Heras, los ingenieros Christopher Heras y Andrea Heras, por su paciencia y soporte. A la ingeniera Pamela Naranjo por siempre escucharme y animarme cuando dudaba de mis capacidades, te amo. A mis amigos que me sacaban una sonrisa cuando más angustiado me sentía. A los profesores apasionados, porque sin lugar a duda, me demostraron que esta es la mejor ingeniería que existe. A todos mi más profundo agradecimiento.

Robert Heras Briones

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar este proceso académico. Expreso mi más sincera gratitud a mi madre y a mi hermana, por su apoyo incondicional y constante motivación a lo largo de este camino. Agradezco también a toda la familia Ramírez Alvarado, quienes me brindaron su respaldo en los primeros pasos de esta aventura académica. De manera especial, a mi tío Pedro Ramírez, por haberme transmitido el amor y la pasión por esta carrera, inspirándome a continuar con perseverancia hasta alcanzar esta meta.

Jean Carlos Ramírez Rodríguez

Declaración Expresa

Yo/Nosotros Robert Alexander Heras Briones y Jean Carlos Ramírez Rodríguez acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, _____ del 2025.



Robert Alexander Heras Briones



Jean Carlos Ramírez Rodríguez

Evaluadores

Miguel Quilambaqui Jara, PhD.
PROFESOR DE MATERIA

M.Sc. Jorge Duque Rivera.
TUTOR DE PROYECTO

Resumen

El presente proyecto tiene como finalidad el diseño de un calorímetro de estrangulamiento adaptado para el laboratorio de termo fluidos de la universidad, destinado específicamente a la planta de potencia. El problema identificado radica en la ausencia de un instrumento de medición que permite evaluar la calidad del vapor generado por la caldera, particularmente a la salida donde el vapor húmedo alcanza una presión de 10 bar según el encargado del laboratorio. Esta carencia limita el análisis térmico y el control de la eficiencia del sistema, afectando negativamente la comprensión de fenómenos clave en la transferencia de energía. La importancia del diseño propuesto es su capacidad para proporcionar una herramienta tanto didáctica como técnica que permita determinar la calidad del vapor bajo condiciones de estrangulamiento. La medición de la calidad del vapor es esencial para evaluar el rendimiento de equipos térmicos, optimizar la eficiencia del ciclo de potencia y enriquecer las practicas experimentales realizadas por los estudiantes. Entre los objetivos principales se encuentra el diseño de un dispositivo que permita estimar la calidad del vapor, mediante una válvula de estrangulamiento, incorporando una etapa adicional con una resistencia eléctrica que contribuya a mejorar las condiciones de medición, esta adaptación permitirá alcanzar un estado más apropiado para el análisis del vapor, favoreciendo una mayor precisión en los resultados. El desarrollo del proyecto implica la selección adecuada de materiales, sensores y la modelación del sistema utilizando herramientas CAD. Como resultado, se obtuvo un diseño completo y validado teóricamente, que sirva como base para futuras implementaciones. Este dispositivo contribuirá a mejorar las capacidades experimentales del laboratorio de termofluidos y fortalecerá significativamente el aprendizaje en el área de plantas de potencia.

Palabras clave: Calorímetro, calidad de vapor, planta de potencia, presión de vapor, vapor saturado

Abstract

This proposal aims to design a throttling calorimeter adapted for the thermos-fluids laboratory at the university, specifically for the power plant system. The identified problem lies in the absence of a measuring instrument that allows for the evaluation of steam quality generated by the boiler, particularly at the outlet where wet steam reaches a pressure of 10 bar. This lack of measurement capability limits thermal analysis and efficiency control of the power plant, hindering the understanding of essential energy transfer phenomena. The importance of the proposed design lies in its ability to serve as both a didactic and technical tool for studying steam behavior under throttling conditions. Measuring steam quality is essential for assessing the performance of thermal equipment, improving the efficiency of the power cycle, and enhancing the experimental practices conducted by students. One of the main objectives is to design a device that estimates the quality of saturated steam at the boiler outlet using a throttling valve, incorporating an additional stage with an electric resistance to improve measurement conditions. This adaptation will enable more accurate analysis by bringing the steam to a more suitable state for evaluation. The project will involve proper selection of materials and sensors, as well as modeling and simulation of the system using CAD tools. As a result, a complete and theoretically validated design is expected, serving as a foundation for future implementations. This device will enhance the experimental capabilities of the thermos-fluids laboratory and significantly strengthen learning in the field of power plants.

Keywords: *calorimeter, steam quality, power plant, steam pressure, saturated steam*

ÍNDICE GENERAL

Contenido

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas	VIII
Índice de planos	IX
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Marco Teórico.....	4
1.4.1 Vapor húmedo.....	4
1.4.1.1 Calidad de vapor	4
1.4.2 Ciclos termodinámicos.....	5
1.4.2.1 Procesos isoentálpicos	5

1.4.3	Métodos para determinar la calidad de vapor	5
1.4.3.1	Calorímetro de separación	5
1.4.3.2	Calorímetro de estrangulamiento	6
1.4.3.2.1	Estrangulamiento	7
1.4.3.2.2	Verificación de estrangulamiento	8
1.4.3.3	Calorímetro eléctrico	8
1.4.3.3.1	Calentamiento por resistencia eléctrica.....	9
1.4.3.3.1.1	Resistencia de hilo bobinado	10
1.4.3.3.1.2	Calentadores tubulares	10
1.4.3.4	Calorímetro de estrangulamiento modificado.....	11
1.4.4	Transferencia de calor.....	13
1.4.4.1	Conducción	14
1.4.4.2	Convección	14
1.4.4.3	Pérdidas térmicas en cámara de expansión.....	15
1.4.5	Muestro isocinético.....	15
1.4.6	Número de Mach.....	16
Capítulo 2.....		18
2.	Metodología.....	18
2.1	Análisis de esquema de funcionamiento del calorímetro.....	18
2.1.1	Criterios de selección.....	19
2.1.2	Matriz de decisión de calorímetro.....	20
2.2	Cálculo de diseño.....	21
2.2.1	Diseño de tubería	21
2.2.1.1	Flujo másico de muestro	22
2.2.1.2	Presión.....	23

2.2.1.3 Cálculo del diámetro de la tubería	23
2.2.1.4 Selección de válvula	25
2.2.2 Potencia de resistencia eléctrica.....	26
2.2.3 Orificio de estrangulamiento.....	28
2.2.3.1 Consideraciones de orificio.....	28
2.2.3.2 Criterio isocinético.....	29
2.2.3.3 Cálculo del orificio de estrangulamiento (tobera isentrópica)	29
2.2.3.4 Verificación de flujo bloqueado (estrangulamiento sónico)	31
2.2.3.5 Correlaciones de orificio.....	31
2.2.4 Cámara de expansión.....	32
2.2.4.1 Diseño de cámara de expansión.....	32
2.2.4.2 Dimensionamiento de cámara de expansión.....	33
2.2.4.3 Aislamiento térmico de cámara de expansión	34
Capítulo 3.....	36
3. Resultados y análisis.....	36
3.1 Determinación de la calidad de vapor.....	36
3.2 Diseño de forma.....	38
3.3 Materiales.....	39
3.3.1 Tuberías.....	40
3.3.2 Válvulas de cierre rápido	40
3.3.3 Resistencia eléctrica.....	40
3.3.4 Bridas y placa orificio.....	41
3.3.5 Cámara de expansión.....	42
3.3.6 Aislamiento térmico.....	43

3.3.7 Instrumentación.....	43
3.3.8 Accesorios de unión.....	44
3.4 Costos de materiales	44
Capítulo 4.....	46
4. Conclusiones y recomendaciones	48
4.1 Conclusiones.....	48
4.2 Recomendaciones	49
Bibliografía	50
ANEXO A: MANUAL DE CALDERA.....	51
ANEXO B: PATENTE DE CALORÍMETRO	54
ANEXO C: ESPECIFICACIONES INSTRUMENTACIÓN	59
ANEXO D: GUÍA DE PRÁCTICA DE CALIDAD DE VAPOR	60
ANEXO E: TABLAS TERMODINÁMICAS	63
ANEXO F: PLANOS DE CALORÍMETRO	70

Abreviaturas

CAD	Computer-Aided Design
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenibles

SIMBOLOGÍA

bar	Bares
Pa	Pascales
psi	Libras por pulgadas cuadrada
W	Watts
kW	Kilo Watts
m	Metros
mm	Mili metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
°C	Grados celsius
K	Kelvins
mK	Mili Kelvins
kg	Kilo gramos
lb	Libra
s	Segundos
h	Horas
in	Pulgadas
J	Joules
kJ	Kilo Joules

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Caldera 10 bar Thompson	2
Figura 2. Calorímetro actual de ESPOL.....	3
Figura 3. Calorímetro de separación.....	6
Figura 4. Calorímetro de estrangulamiento	7
Figura 5. Resistencia de hilo bobinado	10
Figura 6. Ejemplo de calentador tubular	11
Figura 7. Calorímetro de estrangulamiento modificado.....	12
Figura 8. Gráfica de temperatura vs entropía en un calorímetro de estrangulamiento modificado.....	18
Figura 9. Flujograma de funcionamiento de un calorímetro de vapor.....	25
Figura 10. Válvula de cierre rápido	25
Figura 11. Dibujo esquemático del calorímetro de estrangulamiento modificado.....	37
Figura 12. Diseño CAD de calorímetro de estrangulamiento modificado	38
Figura 13. Vista superior del calorímetro.....	39
Figura 14. Vista lateral de la resistencia eléctrica	40
Figura 15. Bridas de placa orificio	40
Figura 16. Cámara de expansión	41
Figura 17. Manómetro analógico	41
Figura 18. Termómetro analógico.....	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Asignación de pesos.....	20
Tabla 2. Matriz de decisión ponderada	21
Tabla 3. Velocidades recomendadas para diseño de tuberías de vapor.....	22
Tabla 4. Cálculo de la velocidad según el diámetro de la tubería	25
Tabla 5. Costo de material por ítem.....	43
Tabla 6. Pulgadas diametrales.....	45
Tabla 7. Costo mano de Obra.....	255

INDICE DE PLANOS

PLANO 1 Calorímetro de estrangulamiento

CAPÍTULO 1

1. Introducción

La medición correcta de la calidad de vapor es fundamental para el análisis y optimización de sistemas de generación de energía, ya que esta tiene una influencia directa en el rendimiento y eficacia de los ciclos termodinámicos. En la formación profesional de ingenierías es fundamental disponer de herramientas prácticas para analizar esta variable, lo que permite a los estudiantes reforzar conocimientos teóricos y a la vez, desarrollar habilidades experimentales aplicables.

Hay ciertas formas en las que se puede determinar la calidad de vapor a partir de prácticas de laboratorio, haciendo uso de calorímetros de estrangulamiento, separación, combinados, entre otros.

El presente trabajo se basa en el diseño de un calorímetro de estrangulamiento modificado para medir la calidad de vapor a la salida de una caldera en el laboratorio de Termofluidos de ESPOL, donde se identificarán y seleccionarán materiales e instrumentos adecuados para el funcionamiento de este.

1.1 Descripción del problema

El calorímetro actual que posee el laboratorio de termofluidos se encuentra fuera de funcionamiento. Este era un calorímetro ya de modelo antiguo que utilizaba un método de separación y estrangulamiento. Se requiere el diseño de un nuevo dispositivo que garantice prácticas para estudiantes con el fin de determinar la calidad del vapor a la salida de la caldera de la planta de potencia. Se conoce que la presión de vapor es de 10 bar y que este es vapor húmedo.

Mediante un calorímetro de estrangulamiento se puede determinar la calidad de vapor, sin embargo, estos son limitados a trabajar con una calidad de vapor elevada, superior al 90%, por lo que es necesario un sistema adicional que ayude a elevar la calidad de vapor.

1.2 Justificación del problema

El diseño de un calorímetro de estrangulamiento brinda una respuesta a la necesidad de un instrumento capaz de determinar la calidad de vapor para el laboratorio de ESPOL, puesto que el anterior que se tenía, ya no opera más por su longevidad. La calidad de vapor es crucial para sistemas termodinámicos, puesto que impacta directamente en la eficiencia de los ciclos de potencia. La ausencia de este equipo impide que los estudiantes comprendan a través de la práctica, los principios fundamentales del comportamiento del vapor.

Figura 1. Caldera 10 bar THOMPSON.



Nota. Fotografía tomada actual de la caldera del laboratorio de termofluidos de ESPOL.

En la figura 1, se puede observar la caldera que posee ESPOL se usa en la actualidad para distintas prácticas de laboratorio, sin embargo, no se pueden desarrollar prácticas con el objetivo de determinar la calidad de vapor a la salida de esta, dado que el calorímetro de separación y estrangulamiento que posee está fuera de servicio.

Figura 2. *Calorímetro actual de ESPOL.*



Nota. Fotografía tomada actual del calorímetro de separación y estrangulamiento de ESPOL.

En la figura 2, se visualiza un calorímetro combinado, siendo de separación y estrangulamiento. Durante cierto periodo se realizaron prácticas de laboratorio para determinar la calidad de vapor siguiendo una guía establecida por el técnico docente responsable del laboratorio de termofluidos.

Implementar un nuevo dispositivo mejorará la calidad de enseñanza y a su vez, permitirá el desarrollo de competencias en análisis de sistemas termodinámicos. Este proyecto se alinea con los objetivos de innovación educativa y sostenibilidad tecnológica.

Este tema, también se alinea con algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible como el ODS4: “*Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos*” (Naciones Unidas, 2023). El proyecto fortalece la formación práctica de estudiantes de ingeniería, ofreciendo un dispositivo para mejorar el aprendizaje técnico, de forma que aumenta el acceso a educación técnica y profesional de calidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un calorímetro de estrangulamiento mejorado capaz de determinar la calidad de vapor para el laboratorio de Termodinámicos de ESPOL.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar un dispositivo capaz de determinar la calidad de vapor en un rango amplio de calidades
- Seleccionar los materiales acordes al requerimiento de diseño del calorímetro
- Diseñar un modelo CAD tridimensional del calorímetro en función de cálculos de diseño obtenidos

1.4 Marco teórico

1.4.1 Vapor húmedo

El vapor húmedo se define como un estado de un fluido, en el cual existe una mezcla en equilibrio de vapor saturado y de líquido saturado. (Calventus, et al., 2006)

1.4.1.1 Calidad de vapor

La calidad o título de vapor se calcula como la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla.

$$x = \frac{m_{\text{vapor saturado}}}{m_{\text{total}}} \quad 1.1$$

Esto quiere decir que la calidad de vapor debe estar entre 0 y 1 o también desde 0% a 100%. Este concepto solo tiene sentido para vapor húmedo. En vapor húmedo, la calidad puede servir como una de las dos propiedades intensivas independientes necesarias para describir un estado (Cequeira y Fontana, 2019).

1.4.2 Procesos termodinámicos

Luis Virto Albert (2017) menciona que, un proceso termodinámico es una transformación en que alguna de las variables que caracteriza el sistema se modifica con el transcurso del tiempo.

1.4.2.1 Proceso isoentálpico

Este es un proceso termodinámico en el cual no se produce ningún cambio de entalpía, ni se realiza trabajo alguno, siendo que se realiza de forma adiabática, por lo cual no existe intercambio de calor. Entonces, se tiene que una sustancia puede variar de un estado a otro, de forma que la entalpía inicial es la misma que la final. Sin embargo, esto no quiere decir que la entalpía permanezca constante durante todo el proceso (Sánchez, 2015).

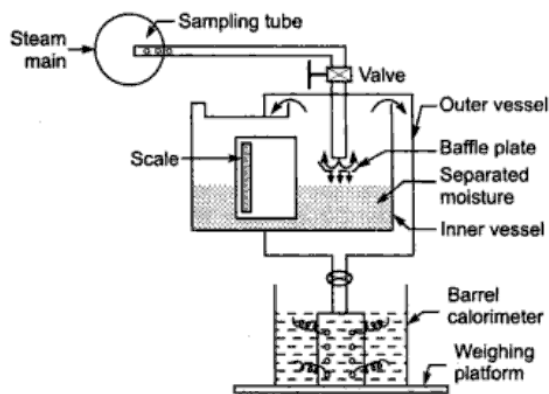
1.4.3 Métodos para determinar la calidad de vapor

Para determinar con precisión esta calidad es necesario identificar la proporción de vapor seco frente a agua líquida presente en una mezcla, lo cual es crucial para evitar daños en equipos, mejorar el control de procesos y optimizar el consumo energético. Para esta finalidad, se han desarrollado diversos métodos e instrumentos, entre los que destacan los calorímetros, dispositivos especializados que permiten medir la calidad del vapor mediante principios físicos como la transferencia de calor o la separación de fases.

1.4.3.1 Calorímetro de separación

El calorímetro de separación permite extraer las partículas de agua presentes en el vapor húmedo mediante un mecanismo de acción centrífuga. Este proceso inicia cuando el vapor entra al dispositivo y es forzado a modificar su trayectoria a través de una copa con perforaciones como se muestra en la figura 3 (Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M., 2012).

Figura 3. Calorímetro de separación



Nota. La figura muestra el esquema de funcionamiento de un calorímetro de separación. Fuente: Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M. (2012).

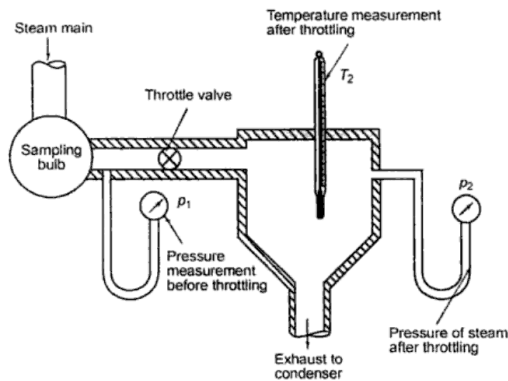
Debido a su mayor masa, las gotas de agua tienden a desplazarse hacia las paredes del recipiente y separarse del flujo principal. Parte de esta humedad se filtra por la copa, otra cae como gotas grandes, y una fracción adicional queda adherida a las superficies internas del separador. Todo el condensado recogido es medido utilizando un tubo de vidrio calibrado, mientras que el vapor seco que permanece atraviesa un condensador donde se transforma en líquido, lo que permite conocer su masa. A partir de ambas mediciones se estima la fracción de sequedad del vapor (Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M., 2012).

1.4.3.2 Calorímetro de estrangulamiento

El calorímetro de estrangulamiento opera reduciendo bruscamente la presión de una muestra de vapor húmedo a través de una válvula u orificio, permitiendo que se transforme en vapor sobrecalentado al salir a la atmósfera. En esta nueva condición, se mide la temperatura y, con apoyo de las tablas de vapor, se determina la entalpía correspondiente. Como este proceso es considerado isoentálpico (es decir, la entalpía se mantiene constante antes y después de la expansión: $h_1 = h_2$), se asume que la entalpía del vapor sobrecalentado es igual a la de la muestra original. Para mejorar la precisión de la medición, se utiliza un manómetro que indica

la presión en el punto de expansión esto se puede observar en la figura 4 (Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M., 2012).

Figura 4. Calorímetro de estrangulamiento



Nota. La figura muestra el esquema de funcionamiento de un calorímetro de separación. Fuente: Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M. (2012).

Es fundamental que todo el sistema esté térmicamente aislado, ya que cualquier pérdida de calor alteraría el proceso y afectaría la exactitud del valor obtenido. Este tipo de calorímetro es especialmente adecuado para medir vapor de alta calidad, ya que es necesario que, tras la expansión, la muestra alcance el estado de vapor sobrecalentado fuera del dispositivo.

1.4.3.2.1 Estrangulamiento

El estrangulamiento es un proceso termodinámico en el cual la energía de presión de un fluido se transforma irreversiblemente en energía térmica, sin recuperación útil de energía. Este fenómeno ocurre usualmente mediante flujo viscoso turbulento, y se caracteriza por una caída significativa de presión. A diferencia de dispositivos como boquillas o difusores, los dispositivos de estrangulamiento no aprovechan la energía del fluido para realizar trabajo útil, sino que simplemente disipan la energía de presión. Los dispositivos de estrangulamiento suelen ser pequeños y operar con altas velocidades de flujo, lo que limita el tiempo de residencia del fluido y hace que el transporte de calor sea insignificante. Por esta razón, se considera comúnmente que el proceso es adiabático, independientemente de si el dispositivo

está aislado o no. Además, debido a su tamaño reducido, el cambio en energía potencial específica entre la entrada y salida es despreciable. Aunque las velocidades de entrada y salida pueden diferir, el cambio en energía cinética específica suele ser menor al 2–3% de la entalpía total, por lo que también se considera despreciable. El proceso de estrangulamiento se caracteriza por ser isentálpico, es decir, ocurre a entalpía constante. Esto permite simplificar el análisis termodinámico, especialmente cuando no se dispone de información detallada sobre velocidades. En tales casos, se puede asumir que los términos de energía cinética son iguales o despreciables (Balmer, 2011).

El orificio opera en flujo crítico y el proceso a través de la restricción es adiabático, sin trabajo, con igualdad de entalpía $h_1 = h_2$. Este supuesto es ampliamente aceptado en la teoría de flujo compresible (Fox, 2011).

1.4.3.2 Verificación de estrangulamiento

La condición de estrangulamiento se comprueba usando la relación de presión crítica

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right)} \quad 1.2$$

Si la presión aguas abajo es menor que P^* , el flujo está estrangulado y la garganta opera a Mach 1 (Cengel, Cimbala, 2018).

1.4.3.3 Calorímetro eléctrico

El funcionamiento del calorímetro eléctrico se basa en llevar una mezcla de vapor húmedo al estado de vapor sobrecalentado mediante calentamiento, sin emplear estrangulamiento como en otros métodos. Al conocer la cantidad de calor suministrado por el calentador eléctrico y la entalpía final del vapor sobrecalentado, es posible determinar la entalpía inicial de la mezcla (Singh, Bhavikatti y Chandra, 2006).

Si se considera un flujo másico constante de vapor húmedo m , el calor suministrado por el calentador Q_{add} , y las entalpías antes y después del calentamiento como h_1 y h_2 , respectivamente, la ecuación de energía para flujo estacionario sin pérdidas térmicas se expresa como:

$$mh_1 + Q_{add} = mh_2 \quad 1.3$$

Al despejar y reordenar esta ecuación, se obtiene una expresión que permite calcular la calidad del vapor (x):

$$x = \frac{h_2 - \left(h_1 + \frac{Q_{add}}{m}\right)}{h_{v1} - h_{l1}} \quad 1.4$$

Donde h_{v1} y h_{l1} corresponden a las entalpías del vapor saturado y del líquido saturado a la presión inicial, respectivamente.

Una desventaja importante de este tipo de calorímetro es que, si la calidad del vapor es muy baja, se requiere una elevada cantidad de energía para alcanzar el estado de sobrecalentamiento, lo que implica un alto consumo de potencia eléctrica (*Singh, Bhavikatti y Chandra, 2006*).

1.4.3.3.1 Calentamiento por resistencia eléctrica

Las resistencias eléctricas tienen la finalidad de provocar una caída de voltaje a través de estas. Estas suelen ser utilizadas a menudo en procesos de calentamiento como hornos secadores, autoclaves, etc. Estas resistencias son definidas por la potencia que son capaces de disipar, valor que se determina con las siguientes expresiones:

$$P = VI \quad 1.5$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$P = I^2 R$$

1.6

Donde P es la potencia medida en Watts (Fallas, 2007).

1.4.3.3.1.1 Resistencias de hilo bobinado

Esta se utiliza cuando se requieren potencias elevadas de disipación de calor. Están constituidas por un hilo conductor bobinado en forma de hélice sobre un sustrato cerámico. Estas presentan una gran estabilidad térmica a lo largo del tiempo (Fallas, 2007).

Figura 5. Resistencia de hilo bobinado.

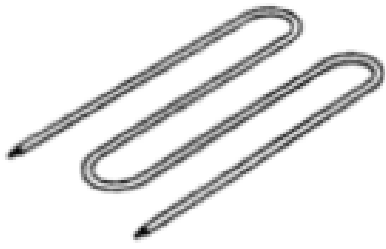


Nota. La figura muestra el esquema de composición de la resistencia de hilo bobinado. Fuente: Fallas (2007).

1.4.3.3.1.2 Calentadores tubulares

Los calentadores tubulares son ampliamente utilizados en la industria del termoformado por su bajo costo, durabilidad y versatilidad. Están compuestos por un alambre de nicromo enrollado dentro de una cubierta de acero rellena con material aislante, lo que permite que se calienten de forma uniforme. Pueden instalarse rectos o doblarse en distintas formas, y cada elemento puede controlarse individualmente o en conjunto. Aunque ofrecen una larga vida útil y resistencia al desgaste, su eficiencia no es la más alta, ya que gran parte del calor se dispersa en el entorno en lugar de concentrarse en el material termoplástico. Para mejorar esto, se utilizan reflectores detrás de los elementos calefactores, los cuales redirigen el calor hacia la lámina. Si tienen forma parabólica, el calor reflejado se distribuye de manera más homogénea (Florián, 1996).

Figura 6. Ejemplo de calentador tubular.



Nota. Estos calentadores también son considerados como resistencias eléctricas y pueden ser fabricados en diferentes formas.

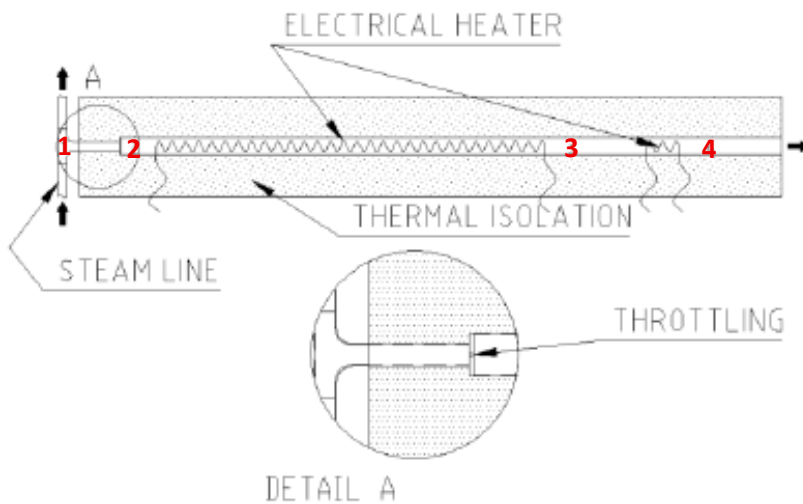
Fuente: Florián (1996).

1.4.3.4 Calorímetro de estrangulamiento modificado

Según el artículo “*Design of modified throttling calorimeter for low steam quality measurements*” (Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M., 2012) se indica que es posible desarrollar un calorímetro de estrangulamiento modificado, combinando el principio de funcionamiento del calorímetro de estrangulamiento con el calorímetro eléctrico. Esto con el fin de que el dispositivo sea capaz de determinar la calidad de vapor en un amplio rango de calidades.

El principio de funcionamiento de este calorímetro modificado se basa en que haya un estrangulamiento inicial dimensionado para causar un aumento previo en la calidad del vapor, reduciendo la presión y a la vez, causando que parte del líquido se evapore. Si la calidad de vapor no es superior a un 85%, puede que la caída de presión no sea la suficiente para obtener un vapor sobrecalentado. Por esto último, agregar calor ayuda a alcanzar el estado sobrecalentado. Se usa un calentador eléctrico para sobrecalentar el vapor, además de aplicar una capa de aislamiento térmico para evitar pérdidas de calor al entorno. La figura 7, ilustra un ejemplo de diseño del instrumento, agregando también un medidor de caudal del fluido.

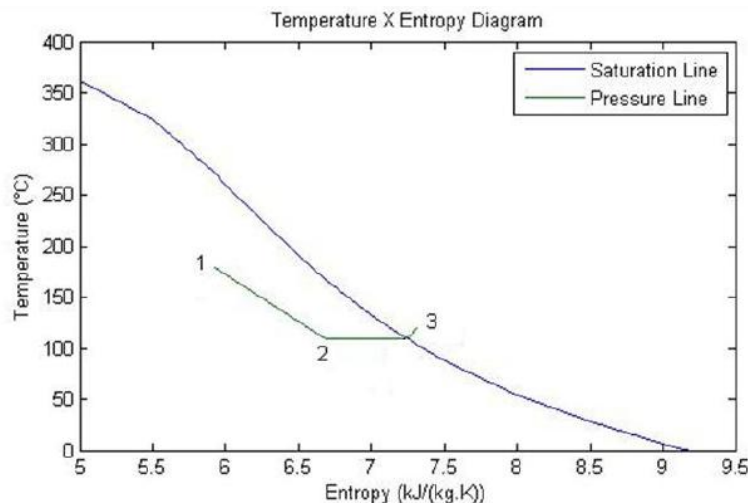
Figura 7. Calorímetro de estrangulamiento modificado



Nota. La figura muestra el esquema de funcionamiento de un calorímetro modificado. Fuente: Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M. (2012)

En la figura 7, se observa cómo se conecta en el punto A el calorímetro a la tubería de la caldera, donde ingresa el vapor y pasa a través de una zona de calentamiento por resistencia eléctrica con una potencia determinada que define la tasa de transferencia de calor. Una vez ha pasado por este “precalentamiento”, continúa a través de una placa orificio que conecta a la cámara de expansión y se da el proceso de sobrecalentamiento.

Figura 8. Gráfica de temperatura vs entropía para un calorímetro de estrangulamiento modificado.



Nota. La figura muestra una gráfica referencial, no son valores exactos para el calorímetro modificado diseñado en el presente trabajo. Fuente: Moura, A. R. de S., Gazel, H.F., & Nogueira, M.F.M. (2012)

En este calorímetro no hay trabajo externo aplicado y la energía cinética puede ser despreciable, la ecuación de balance de energía sería (Moran, Shapiro, 2009):

$$\begin{aligned}
0 &= Q_{cv} - W_{cv} + m[(h_1 - h_3) + \frac{v_1^2 - v_3^2}{2} + g(z_1 - z_2)] \\
0 &= Q_{2-3} + m(h_1 - h_3)
\end{aligned}
\tag{1.7}$$

La entalpía en el punto 3, que es post calentamiento, se puede determinar midiendo la presión y temperatura en esa región, por lo que la calidad de vapor se puede calcular por la siguiente expresión:

$$x = \frac{h_1 - h_{l_1}}{h_{v_1} - h_{l_1}} \tag{1.8}$$

Donde h_{v_1} y h_{l_1} son encontrados conociendo la presión y temperatura en la línea de vapor de la región 1. Por ende, se tiene que la calidad de vapor sería:

$$x = \frac{h_3 - (h_{l_1} + Q_{2-3}/m)}{h_{v_1} - h_{l_1}} \tag{1.9}$$

Para determinar el flujo másico m , se aplica el principio de trabajo de un flujo térmico como en la ecuación 1.7 para el flujo de 2-3. El balance de energía para un volumen de control en las regiones 3 y 4 sería:

$$Q_{3-4} = m(h_4 - h_3)$$

Despejando m :

$$m = \frac{Q_{3-4}}{(h_4 - h_3)} \tag{1.10}$$

1.4.4 Transferencia de calor

La transferencia de calor es un proceso fundamental en la ingeniería y las ciencias aplicadas, mediante el cual la energía térmica se transmite de un cuerpo o sistema a otro debido a una diferencia de temperatura. Este fenómeno puede presentarse en diversas situaciones cotidianas e industriales, y ocurre a través de tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación. Cada uno de estos modos responde a distintos principios físicos y condiciones específicas del medio en el que se produce. Comprender los procesos de transferencia de calor permite analizar, diseñar y optimizar sistemas térmicos como intercambiadores de calor, equipos de refrigeración, motores, hornos y procesos energéticos en general. Para el diseño que se presenta en este trabajo, solo se considerarán los mecanismos de conducción y convección (Incropera, 2005).

1.4.4.1 Conducción

La conducción es un proceso de transferencia de calor que se produce a nivel microscópico, como resultado de la interacción entre partículas dentro de un material, sin que exista movimiento visible del mismo, el calor se desplaza desde las regiones más calientes hacia las más frías, impulsando por colisiones entre moléculas o átomos, así como por vibraciones internas o, en el caso de los metales, por el movimientos de electrones libres, Este fenómeno puede observarse en sólidos, líquidos y gases, y se describe matemáticamente mediante la ley de Fourier, que establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura y a la conductividad térmica del material (Incropera, 2005).

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad 1.11$$

Donde:

q_x'' : Flujo de calor (W/m²), tasa de transferencia de calor

$\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura

k : Conductividad térmica del material (w/mK)

1.4.4.2 Convección

La convección es un mecanismo de transferencia de calor que combina dos procesos, el movimiento molecular aleatorio y el desplazamiento global del fluido. Este fenómeno ocurre cuando un fluido entra en contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que genera regiones llamadas capas límite: una para la velocidad del flujo y otra para la distribución térmica. Cerca de la superficie, el calor se transfiere principalmente por difusión molecular, mientras que más lejos se transfiere por el arrastre del fluido. La convección puede clasificarse

como forzada o natural. También puede haber convección mixta si ambos efectos están presentes. Además de la transferencia de calor sensible, en algunos casos también se transfiere calor latente si hay cambio de fase, como en la ebullición o la condensación. Matemáticamente, la convección se describe con la ley de enfriamiento de Newton, donde el flujo de calor depende de la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie, y de un coeficiente llamado h , que varía según las propiedades del fluido, la geometría y el tipo de flujo (Incropera, 2005).

$$q_x'' = h(T_s - T_\infty) \quad 1.12$$

Donde:

q_x'' : Flujo de calor (W/m²), tasa de transferencia de calor

T_s : Temperatura de superficie

T_∞ : Temperatura del fluido alejado de la superficie

h : Coeficiente de transferencia de calor (W/m²K; depende de la geometría de la superficie tipo de flujo y propiedades termodinámicas).

1.4.4.3 Pérdidas térmicas en cámara de expansión

Acorde a la norma “ASTM C547-17: Standard Specification for Mineral Fiber Pipe Insulation”, el cálculo de pérdidas térmicas muestra que la corrección entálpica (Δh) es muy pequeña frente a la entalpía total del vapor sobrecalentado, lo que permite considerar la cámara como cuasi adiabática. Esto se refuerza con el uso de aislamiento de lana de roca.

1.4.5 Muestreo isocinético

El muestreo isocinético es un proceso necesario para obtener una muestra representativa de partículas de un flujo de gas o aire, especialmente cuando el caudal de dicho flujo es variable. Un muestreo anisocinético, es decir, cuando la velocidad del muestreo y la del flujo

principal no coinciden, puede causar un error significativo al medir el tamaño de las partículas, ya que las partículas gruesas pueden no entrar en la sonda de muestreo. El muestreo isocinético se realiza con el fin de evitar este problema, asegurando que el muestro se realice en las mismas condiciones del flujo para obtener mediciones precisas. Esto según el artículo “*Development of Variable Flow Rate Isokinetic Sampling System for 0.5-0.15 μm Aerodynamic Diameter Particles*” (Ichitsubo H., Otani Y., 2012).

La velocidad de la muestra debe igualar la de la corriente principal para asegurar que la fracción extraída sea representativa. Este principio es fundamental en las normas de muestreo de gases. Esto basado en la norma “ISO 10780:1994–Stationary source emissions – Measurement of velocity and volume flowrate of gas streams in ducts”.

La velocidad sónica en la garganta (Mach 1) es un fenómeno local de flujo compresible, mientras que la velocidad en la derivación se fija por criterios de transporte (20–30 m/s) para garantizar un muestreo estable (Fox, 2011).

1.4.6 Número de Mach

Este es uno de los parámetros adimensionales más importantes en el campo de la aerodinámica, utilizado para caracterizar flujos compresibles, es decir, aquellos en los que la velocidad del fluido supera el 30% de la velocidad del sonido. Este número establece la relación entre la velocidad de un objeto o de un flujo y la velocidad local del sonido en ese medio.

$$M_a = \frac{\text{Velocidad}_{\text{objeto/fluido}}}{\text{Velocidad}_{\text{sonido}}} \quad 1.13$$

La clasificación de los flujos en distintos regímenes depende del valor del número de Mach, identificándose principalmente cinco categorías: el régimen incompresible, que ocurre cuando la velocidad del flujo es menor al 30% de la velocidad del sonido ($Ma < 0.3$) y donde los efectos de compresibilidad se consideran despreciables; el régimen subsónico,

correspondiente a valores menores a la unidad ($Ma < 1$) pero lo suficientemente altos para que la compresibilidad no pueda ignorarse; el régimen transónico, que abarca flujos con números de Mach cercanos a la unidad ($Ma \approx 1$); el régimen supersónico, presente cuando $Ma > 1$; y finalmente el régimen hipersónico, asociado a velocidades muy superiores a la del sonido, donde Ma es mayor que 1 (Zacarías A., González J., Granados A., Mota A., 2020).

La velocidad sónica en la garganta es un fenómeno local de flujo compresible, mientras que la velocidad en la derivación se fija por criterios de transporte (20–30 m/s) para garantizar un muestreo estable. Es fundamental distinguir entre ambas para no confundir los criterios de diseño (Fox, 2011).

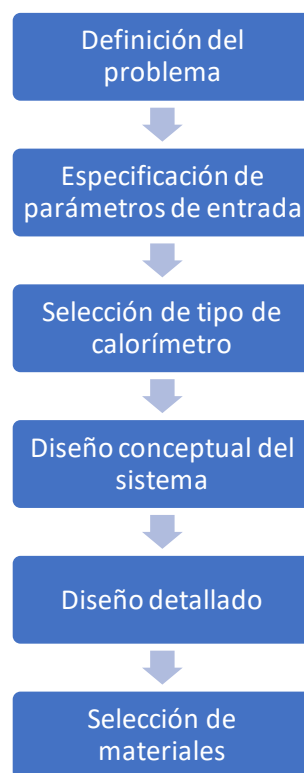
CAPÍTULO 2

2. Metodología

2.1 Análisis de esquema de funcionamiento del calorímetro

En términos generales, el funcionamiento de un calorímetro se basa en el principio de conservación de la energía, específicamente en el equilibrio térmico entre el vapor ingresante y el medio donde se produce su condensación, o entre las condiciones antes y después de una expansión (como ocurre en un calorímetro de estrangulamiento). Existen diferentes tipos de calorímetros (de estrangulamiento, separadores, combinados), pero todos comparten un proceso de diseño similar:

Figura 9. *Flujograma de proceso de diseño de un calorímetro de vapor*



Nota. La figura muestra un proceso de diseño general para estos equipos.

2.1.1 Criterios de selección

Uno de los criterios fundamentales en la selección del tipo de calorímetro más adecuado es el rango de calidad del vapor en el que el dispositivo puede operar con mayor precisión. Este parámetro es especialmente relevante ya que en ciertas ocasiones se requiere medir vapor con diferentes niveles de humedad en condiciones controladas. Adicionalmente, se consideraron otros criterios técnicos como la exactitud de la medición, la complejidad de construcción, el costo estimado, el mantenimiento requerido, la seguridad en la operación y la adecuación al entorno académico. En función de estos aspectos, se desarrolló una tabla comparativa que sintetiza el desempeño relativo de cada alternativa de diseño (estrangulamiento, separador y combinado), sirviendo como base para una elección fundamentada.

Para dar continuidad a la metodología de selección del diseño del calorímetro, se establecieron criterios de evaluación basados en el estudio previo de los diferentes tipos de calorímetros. A cada criterio se le asignó un peso específico, siendo determinados en función de la relevancia técnica, educativa y operativa de cada aspecto dentro del entorno académico. A continuación, se presenta la tabla 1, con la asignación de pesos, detallando los criterios utilizados, el valor porcentual asignado a cada uno y su respectiva justificación.

Tabla 1. *Asignación de pesos*

Criterio	Peso %	Justificación
Rango de Calidad	25	Es el criterio más relevante, ya que el calorímetro debe adaptarse al tipo de vapor generado por la caldera del laboratorio (húmedo, seco o sobrecalentado).
Precisión de medición	20	Fundamental para obtener resultados confiables en prácticas académicas.
Complejidad Constructiva	15	Se busca que el equipo sea útil para la enseñanza, permitiendo observar y analizar fenómenos térmicos.
Costo estimado	20	Se consideró la facilidad de fabricación con los recursos disponibles en el laboratorio.
Mantenimiento	10	El diseño debía mantenerse dentro de un presupuesto razonable.
Seguridad	10	Importante para asegurar la durabilidad y operatividad del equipo a largo plazo.

Nota. Pesos específicos de cada uno de los criterios de evaluación considerados

2.1.2 Matriz de decisión de calorímetro

Como parte del proceso de selección del diseño más adecuado para el calorímetro destinado al laboratorio de termo fluidos, se elaboró una matriz de decisión ponderada que permite comparar de forma cuantitativa las diferentes alternativas evaluadas. Esta herramienta metodológica integra los criterios previamente definidos y ponderados según su importancia relativa, y asigna una calificación a cada alternativa en función de su desempeño respecto a cada criterio. Posteriormente, dichas calificaciones se multiplican por los pesos correspondientes, obteniendo así un puntaje ponderado para cada opción. La suma total de estos puntajes permite identificar la alternativa con mejor desempeño global.

Tabla 2. Matriz de decisión ponderada

Criterio	Peso %	Calentamiento	Estrangulamiento	Separador	Modificado
Rango de Calidad	25	5	4	3	5
Precisión de medición	20	3	5	3	5
Complejidad Constructiva	15	4	4	3	4
Costo estimado	20	4	4	3	4
Mantenimiento	10	3	4	3	3
Seguridad	10	4	4	5	4
Total	100	3.7	4.2	3.2	4.35

Nota. El análisis final de la Matriz indica como ganadora la opción de un calorímetro Modificado

El calorímetro modificado obtuvo el mayor puntaje ponderado (4.35/5) tal como se observa en la tabla 2, consolidándose como la mejor opción. Su versatilidad para trabajar en un amplio rango de calidades de vapor (desde vapor húmedo hasta sobrecalentado), junto con su alta precisión y excelente aplicabilidad en el entorno educativo, justifican su selección como la alternativa más completa y robusta para el laboratorio de termo fluidos. Aunque implica una mayor complejidad de construcción y costo relativo, estas desventajas se compensan con una capacidad superior de adaptación a distintas condiciones experimentales.

2.2 Calculo de diseño

2.2.1 Diseño de tubería

El diseño de tuberías para la conducción de vapor debe considerar, entre otros factores, la velocidad del fluido, ya que de ella dependen la eficiencia del transporte térmico, la pérdida de carga, la posibilidad de erosión interna, generación de ruidos, y fenómenos no deseados

como el golpe de ariete. En tramos cortos de hasta 20 metros, las pérdidas por fricción suelen ser despreciables, lo cual permite trabajar con mayores velocidades sin afectar significativamente la eficiencia del sistema. Sin embargo, se recomienda un enfoque conservador, especialmente cuando el vapor es húmedo o en condiciones de operación no estabilizadas. Diversas fuentes técnicas y académicas, como Spirax-Sarco, Forbes Marshall y la norma ASME MFC-3M, establecen rangos típicos de velocidades en función del estado del vapor y la aplicación específica.

Tabla 3. *Velocidades recomendadas para diseño de tuberías de vapor*

Tipo de Vapor	Longitud del tramo	Velocidad recomendada (m/s)
Vapor Saturado	Tramo corto (<20 m)	20-30
Vapor Saturado	Tramo largo (>30 m)	15-25
Vapor recalentado	Cualquier longitud	30-40
Vapor húmedo	Cualquier longitud	10-15

2.2.1.1 Flujo másico de muestreo

El caudal de muestra hacia el colorímetro se fijó en $\dot{m} = 32 \text{ kg/h}$ en función de la adopción de una derivación de $\frac{1}{2}$ ", cuyo uso se encontró en la revisión de configuraciones de calorímetros comerciales de estrangulamiento, un ejemplo es el Ellison serie 900, que incorpora puerto de muestreo de $\frac{1}{2}$ ", de esta manera, la selección del flujo está vinculada directamente a diámetro, garantizando que las velocidades obtenidas se encuentren dentro de los rangos recomendados para vapor húmedo como indica la tabla 3 y que la muestra pueda transportarse de manera estable y representativa. Con este criterio, el diseño asegura el sobrecalentamiento tras la expansión y reduce la potencia adicional necesaria para la resistencia eléctrica. A continuación, se presentan los cálculos y la tabla que demuestran cómo se verifica

la velocidad resultante en la línea de muestreo, confirmando que el diseño cumple con los rangos recomendados.

$$\dot{m} = 32.7 Kg/h, (0.00907 \frac{kg}{s})$$

2.2.1.2 Presión

Para el dimensionamiento de la tubería es importante conocer la presión de trabajo y la presión atmosférica, para la primera se tomarán los datos del manual de la caldera.

$$P_{atm} = 14.72 \text{ psi} , \text{ presión atmosférica de Guayaquil}$$

$$P_m = 145 \text{ psi} , \text{ presión de trabajo de la caldera}$$

Para los cálculos se utilizará la presión absoluta de trabajo.

$$P_{trabajo} = P_{atm} + P_m \tag{2.1}$$

$$P_{trabajo} = 14.72 + 145 = 159.72 \text{ psi}$$

2.2.1.3 Calculo del diámetro de tubería

Para realizar el cálculo de la tubería utilizaremos la siguiente ecuación:

$$m = \rho V A \tag{2.2}$$

Donde:

m = Flujo masico

ρ = densidad

V= velocidad del vapor

A= área de sección de tubería

Con la ayuda de los datos previamente escritos y tablas termodinámicas, determinamos el volumen específico del vapor.

$$v = 0.17722 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

Con la definición de densidad hallamos que:

$$\rho = \frac{1}{v} \quad 2.3$$

$$\rho = \frac{1}{0.16300} = 5.21 \text{ Kg/m}^3$$

Se tiene que:

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad 2.4$$

Se analiza diámetro de tuberías comerciales como ¼ in, se calcula la velocidad:

$$A = \pi \frac{0.0015^2}{4}$$

$$V = \frac{m}{\rho A} \quad 2.5$$

$$V = \frac{0.00907}{5.21(3.1669 \times 10^{-5})} = 54.97 \text{ m/s}$$

Para seleccionar el diámetro de tubería adecuado, se utiliza una tabla de Excel para iterar con la variable del posible diámetro de la tubería.

Tabla 4. Cálculo de la velocidad según el diámetro de la tubería

Diámetro Tubería CED 40 (in)	Flujo Vapor (Kg/s)	Volumen especifico (m3/Kg)	Diámetro (m)	Área (m2)	Velocidad (m/s)
1/4	0.00907	0.1895	0.00635	3.17E-05	54.97
1/2	0.00907	0.1895	0.0127	1.96E-04	8.88
3/4	0.00907	0.1895	0.01905	3.43E-04	5.07
1	0.00907	0.1895	0.025	5.57E-04	3.12
1 1/4	0.00907	0.1895	0.03175	9.67E-04	1.80
1 1/2	0.00907	0.1895	0.0381	1.32E-03	1.32

Nota. Se tiene una densidad de 5.64 kg/m3 y una presión de trabajo de 159.72 psi.

En la tabla 4, se realizó un procedimiento de iteración, en el cual se variaron los diámetros de tubería para acorde a la norma ASME MFC-3M, seleccionar la opción adecuada. Siendo así que el diámetro correcto es de ½ in.

2.2.1.4 Selección de válvula

Se ha seleccionado una válvula de cierre rápido para ser instalada en la línea de vapor, considerando el diámetro de la tubería 1/2 in. Este tipo de válvula es ideal para aplicaciones de vapor debido a su cierre hermético, facilidad de operación y alta resistencia a la presión y temperatura. Además, su construcción robusta y bajo mantenimiento la hacen adecuada para garantizar un control confiable del flujo en sistemas de conducción de vapor saturado.

Figura 10. Válvula de cierre rápido.



Nota. Esta válvula será utilizada al ingreso del sistema del calorímetro y a la salida de la cámara de expansión.

2.2.2 Potencia de resistencia eléctrica

Con el fin de dimensionar la resistencia eléctrica del calorímetro de estrangulamiento, se consideró que la muestra puede ingresar al calentador en condiciones de vapor húmedo a la presión de línea de 11 bar. Bajo este supuesto, la potencia requerida depende directamente de la calidad de vapor a la entrada (x_{in}) ya que una fracción líquida mayor exige aporte energético para completar la vaporización y alcanzar el sobrecalentamiento deseado en la cámara, por esta razón, se evaluaron distintos escenarios de calidad ($x=0.8$; $x=0.85$) con el objetivo de estimar la potencia mínima y máxima que debería entregar la resistencia. Este análisis permite seleccionar un valor nominal que asegure la condición de vapor sobrecalentado en la descarga, garantizando la validez del método de estrangulamiento incluso en situaciones conservadoras de mayor humedad.

$$Q_{ideal} = m \Delta h \quad 2.6$$

Donde:

$$Q_{ideal} = \text{Potencia de calentador}$$

$$m = \text{Flujo masico } 0.00907 \text{ Kg/s}$$

$$\Delta h = \text{Cambio de entalpías}$$

Estado objetivo en la cámara (sobrecalentado, a $P_2 \approx 1 \text{ bar}$)

$$h_{2\text{ obj}} = h_g + C_p \Delta T \quad 2.7$$

Donde:

$$h_{2\text{ obj}} = \text{entalpia objetiva en la cámara de expansión}$$

$$h_g = 2676 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} = \text{entalpia de vapor seco a 1 bar}$$

$C_p = 2.08 \text{ KJ/Kg K}$ Calor específico

$\Delta T = 20 \text{ K}$ (Diferencia de temperatura supuesta para alcanzar sobrecalentado en la cámara)

$$h_{2 \text{ obj}} = 2676 + 2.08 \times 20 = 2718 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Para calcular h_{toma} utilizaremos los valores tabulados en la tabla de vapor de agua a 11 bar

$$T_{sat} = 184^\circ\text{C}$$

$$h_f = 781 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \text{ (entalpia de líquido saturado)}$$

$$h_g = 2776 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \text{ (entalpia de vapor saturado seco)}$$

$$h_{fg} = 1995 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \text{ (calor latente)}$$

Cálculos con escenarios de calidad a la entrada

a) Caso conservador $x_{in} = 0.85$

$$h_{toma} = h_f + x (h_{fg})$$

$$h_{toma} = 781 + 0.85 \times 1995 = 2477 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\Delta h = 2718 - 2477 = 241 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{ideal} = 0.00907 \times 241000 \approx 2.19 \text{ KW}$$

b) Caso más húmedo $x_{in} = 0.80$

$$h_{toma} = 781 + 0.80 \times 1995 = 2377 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\Delta h = 2718 - 2377 = 341 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{ideal} = 0.00907 \times 341000 \approx 3.09 \text{ KW}$$

De acuerdo con los escenarios analizados, la potencia del calentador varía entre 2.19 y 3,09 kW según la calidad de entrada del vapor. Por ello, se adopta una resistencia de 3 kW, que garantiza el sobrecalentamiento de la muestra aun en condiciones conservadoras de mayor humedad.

2.2.3 Orificio de estrangulamiento

2.2.3.1 Consideraciones de orificio

Con el fin de realizar los cálculos pertinentes para el dimensionamiento del orificio hacemos uso de los resultados obtenidos hasta ahora.

Datos:

$$P_1 = (\text{Presión aguas arriba del orificio}) = 11 \text{ bar abs}$$

$$T_1 = (\text{Temperatura aguas arriba}) = 210^\circ\text{C} = 483.15 \text{ K}$$

$$\dot{m}_{\text{linea}} = 380 \text{ Kg/h} = 0.1056 \text{ Kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{boca}} = 32.7 \text{ Kg/h} = 0.00907 \text{ Kg/s}$$

$$A_{\text{linea}} = 0.002164 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{linea}} = 5.21 \text{ kg/m}^3$$

$$A_{\text{boca}} = 0.00019607 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{linea}} = 0.002164 \text{ m}^2$$

Constantes termodinámicas del vapor aproximadas:

$$\gamma = 1.3, R = 461 \text{ J/Kg K}, C_p = 1997.66 \text{ J/Kg K}$$

2.2.3.2 Criterio isocinético

Para asegurar representatividad en la muestra, se busca que la velocidad en la línea de muestreo sea igual a la de la línea principal.

$$V_{boca} = V_{linea}$$

Velocidad en la línea:

$$V_{linea} = \frac{\dot{m}}{\rho_{linea} A_{linea}} \quad 2.8$$

$$V_{linea} = \frac{0.1056}{(5.21)002164} = 9.37 \text{ m/s}$$

Velocidad en la boca:

$$V_{boca} = \frac{0.00907}{(5.21)00019607} = 8.88 \text{ m/s}$$

Diferencia relativa es:

$$\frac{V_{linea} - V_{boca}}{V_{linea}} \times 100 \quad 2.9$$

$$\frac{9.37 - 8.88}{9.37} \times 100 = 5.2 \%$$

Normas de muestreo como ASTM D1066 e ISO 10780 consideran aceptable un error de $\pm 10 \%$. Por tanto, el diseño cumple el criterio isocinético con la configuración actual.

2.2.3.3 Cálculo del orificio de estrangulamiento (tobera isentrópica)

Se asume un flujo isentrópico a través de un orificio convergente (principio de conservación de la energía y ecuaciones de flujo compresible)

Temperatura de remanso (estancamiento):

$$T_0 = T_1 + \frac{V_{linea}^2}{2C_p} \quad 2.10$$

Dado que V_{linea} es pequeño consideramos $T_0 = 483.17 \text{ K}$

Densidad de estancamiento:

$$\rho_0 = \rho_1 \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad 2.11$$

$$\rho_0 = 4.94 \text{ kg/m}^3$$

Calculamos el flujo crítico y área de garganta, para esto utilizamos gasto masico en condiciones sónicas:

$$\dot{m} = \rho_0 A^* \sqrt{\gamma R T_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad 2.12$$

Despejando el área critica tenemos que

$$A^* = \frac{\dot{m}}{\rho_0 \sqrt{\gamma R T_0}} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad 2.13$$

$$A^* = 5.83 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Diámetro de la garganta

$$D^* = \sqrt{\frac{4A^*}{\pi}} \quad 2.14$$

$$D \approx 2.73 \text{ mm}$$

2.2.3.4 Verificación de flujo bloqueado (estrangulamiento sónico)

La presión crítica en la garganta se obtiene de:

$$\frac{P^*}{P_0} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma + 1}} \quad 2.15$$

$$\frac{P^*}{P_0} = 6 \text{ bar}$$

Dado que la descarga se considera atmosférica $P_2=1$ bar, se cumple que $P_2 < P^*$ por lo tanto, el flujo está estrangulado (sónico) y el cálculo para A^* es válido.

2.2.3.5 Correlaciones de orificio

El análisis del flujo a través del orificio se contrastó con la fórmula de Napier, una relación empírica propuesta por Robert D. Napier en 1866 para estimar el caudal de vapor en condiciones de estrangulamiento. Esta expresión, permite calcular el flujo másico únicamente en función de la presión absoluta y el diámetro del orificio, facilitando verificaciones rápidas del orden de magnitud de los resultados obtenidos con modelos termodinámicos más rigurosos (Napier, 1866; Emerson Process Management, 2015).

$$\dot{m} = 0.00907 \text{ kg/s} = 0.0200 \text{ lb/s}$$

$$P_1 = 11 \text{ bar} = 159.54 \text{ psi}$$

Napier:

$$\dot{m} = \frac{A_2 P_1}{70} \quad 2.16$$

$$A_2 = 8.776 \times 10^{-3} \text{ in}^2, D = 0.1057 \text{ in} = 2.685 \text{ mm}$$

2.2.4 Cámara de expansión

2.2.4.1 Diseño de cámara de expansión

Los parámetros empleados para el dimensionamiento de la cámara de expansión, con una velocidad promedio cercana a 5 m/s y un tiempo de residencia de aproximadamente 0.1 s, corresponden a criterios prácticos comúnmente utilizados en el diseño de equipos de proceso con vapor. Diversas guías de ingeniería, como Engineering Toolbox (Engineering Toolbox, 2003, "Recommended Velocities in Steam Systems"), indican que en aplicaciones donde se busca estabilidad y mezcla uniforme conviene trabajar con velocidades bajas, del orden de pocos metros por segundo. De forma similar, la ecuación de Souders–Brown, aplicada al diseño de separadores vapor-líquido, establece límites de velocidad reducidos para prevenir el arrastre de gotas. En cuanto al tiempo de permanencia, la definición clásica de “residence time” como la razón entre volumen del equipo y caudal de flujo respalda la adopción de un valor de 0.1 s como referencia adecuada en un diseño preliminar (Red-Bag Engineering Guides, 2013).

Datos de diseño:

$$P_1 = (\text{Presión aguas arriba del orificio}) = 11 \text{ bar abs}$$

$$T_1 = (\text{Temperatura aguas arriba}) = 210^\circ\text{C} = 483.15 \text{ K}$$

$$\dot{m}_{\text{muestra}} = 32.7 \text{ Kg/h} = 0.00907 \text{ Kg/s}$$

$$P_2 = (\text{Presión de descarga}) = 1 \text{ bar}$$

Constantes termodinámicas del vapor:

$$\gamma = 1.3, R = 461 \text{ J/Kg K}, C_p = 1997.66 \text{ J/Kg K}$$

El proceso de estrangulamiento es isoentálpico ($h_1 = h_2$). Tras expandir a presión atmosférica, la muestra se encuentra en vapor sobrecalentado. El volumen específico se estima con la ecuación de gas ideal:

$$v_2 \approx \frac{RT_2}{P_2} \quad 2.17$$

$$P_2 = 10 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Tomando $T_2 = 200^\circ\text{C} = 473 \text{ K}$

$$v_2 \approx \frac{461 \times 473}{100000} = 2.22 \frac{\text{m}^3}{\text{K}}$$

$$\dot{V}_2 = \dot{m} v_2 = 0.018 \times 2.18 = 0.02020 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.2.4.2 Dimensionamiento de cámara de expansión

Área crítica de cámara de expansión:

$$A_c = \frac{\dot{V}_2}{V_c} \quad 2.18$$

$$A_c = \frac{0.0393}{5} = 4.039 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Diámetro interno:

$$D_c = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}} \quad 2.19$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \times (4.039 \times 10^{-3})}{\pi}} = 0.72 \text{ m}$$

Volumen de la cámara para el tiempo de residencia objetivo:

$$V_c = \dot{V}_2 * t \quad 2.20$$

$$V_c = 0.02020 \times 0.1 = 2.020 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Longitud:

$$L = \frac{V_c}{A_c} \quad 2.21$$

$$L = \frac{2.020 \times 10^{-3}}{4.039 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 0.5 \text{ m}$$

2.2.4.3 Aislamiento térmico de cámara de expansión

Se considera un aislamiento de 30 mm de lana de roca con conductividad $k = 0.04$ W/mK y convección exterior $h = 8$ W/m²K.

Datos geométricos:

$$r_i = (\text{Radio interno}) = 0.05 \text{ m}$$

$$t_s = (\text{espesor pared de acero}) = 2.5 \text{ mm}, \text{radio total externo del acero} = 0.0525 \text{ m}$$

$$t_{ais} = (\text{espesor de aislamiento}) = 30 \text{ mm}, r_e = (\text{radio ext}) = 0.052 + 0.030 = 0.082$$

$$k = (\text{conductividad lana de roca}) = 0.04 \frac{\text{W}}{\text{mk}}$$

$$T_2 = (\text{Temperatura vapor}) = 200^\circ\text{C}, T_{amb} = 25^\circ\text{C}$$

Resistencia por conducción:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_s}\right)}{2\pi k L} \quad 2.22$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{0.082}{0.052}\right)}{2\pi(0.04) \times 0.5} = 3.62 \text{ K/W}$$

Resistencia por convección

$$R_{conv} = \frac{1}{h2\pi r_e L} \quad 2.23$$

$$R_{conv} = \frac{1}{8 \times 2\pi \times (0.082) \times (0.5)} = 0.48 \text{ K/W}$$

Resistencia Total y perdida línea

$$R_{Total} = 4.10 \frac{K}{W}, \quad q = \frac{200 - 25}{4.10} = 42.68 \text{ W}$$

Impacto en la entalpia de la muestra:

$$\Delta h = \frac{q}{\dot{m}} \quad 2.24$$

$$\Delta h = \frac{42.68}{0.018} = 2.37 \text{ KJ/Kg}$$

Este valor es pequeño frente a la entalpía del vapor sobrecalentado ($\sim 2800\text{--}2900 \text{ kJ/kg}$), por lo que la cámara se comporta cuasi adiabática, tal como se requiere para el método de estrangulamiento (la medición se hace en estado sobrecalentado post-expansión).

CAPÍTULO 3

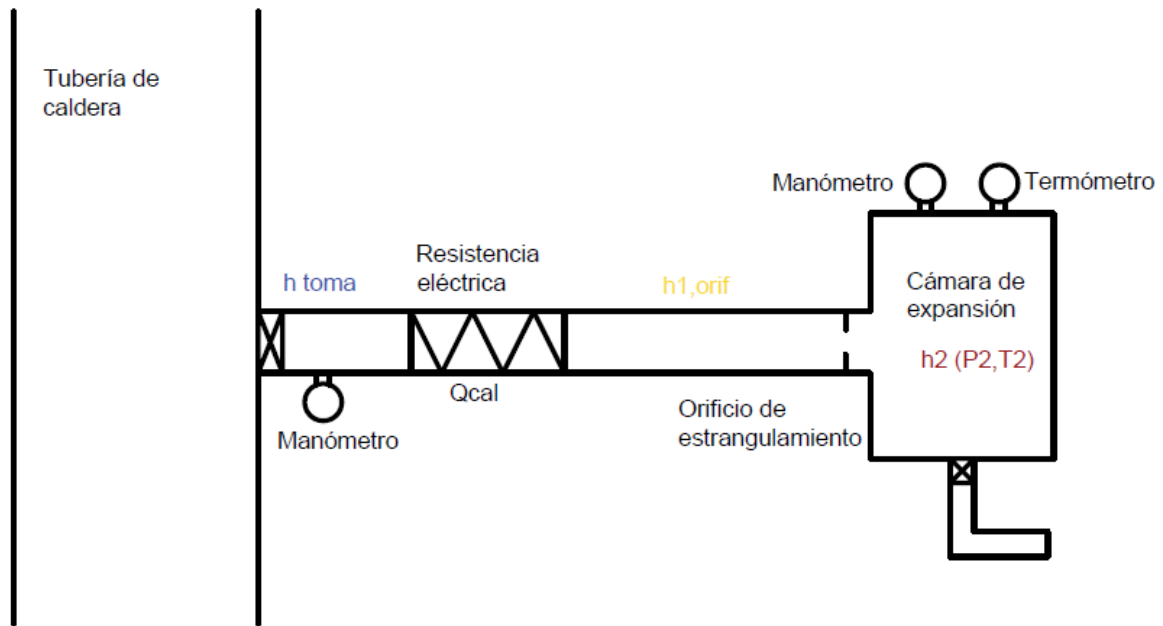
3. Resultados y análisis

A partir de los cálculos desarrollados en el capítulo 2, se elaboraron los planos finales del calorímetro de estrangulamiento modificado, en los que se integran las dimensiones, componentes y materiales seleccionados. El diseño contempla la línea de ingreso de vapor, la válvula de globo de $\frac{1}{2}$ in, el tramo de tubería calculado, la resistencia eléctrica de calentamiento, la placa orificio para el estrangulamiento y la cámara de expansión aislada térmicamente. Cada uno de estos elementos fue dimensionado en función de los criterios de caudal, presión, velocidad, potencia de calentamiento y condiciones de flujo, de forma que se garantice que el dispositivo cumpla con los requerimientos de operación y seguridad establecidos para el laboratorio de termofluidos. Los planos incluyen la vista general del sistema, los detalles constructivos de la cámara de expansión y del orificio de estrangulamiento, así como el esquema de instalación y conexión con la caldera. De esta forma, los resultados gráficos representan la consolidación de la etapa de diseño y constituyen la base para la futura construcción del prototipo.

3.1 Determinación de la calidad de vapor

La estimación de la calidad del vapor en el calorímetro diseñado se apoya en el comportamiento termodinámico del flujo al pasar por un orificio en régimen crítico. Bajo esta condición, el proceso de estrangulamiento se considera isoentálpico, lo que significa que la entalpía del vapor antes y después del orificio es equivalente.

Figura 11. Dibujo esquemático del calorímetro de estrangulamiento modificado.



Nota. Representación de las entalpías antes y después del calentador y del orificio.

Para este diseño se ha incorporado un calentador eléctrico ubicado aguas arriba del orificio, cuya función es asegurar que el vapor descargado en la cámara de expansión llegue en condición de sobrecalentamiento, requisito indispensable para aplicar el método de estrangulamiento. La presencia del calentador implica un aumento de energía en la muestra, de manera que la entalpía justo antes del orificio $h_{1,orif}$ se expresa como:

$$h_{1,orif} = h_{toma} + \frac{\dot{Q}_{cal}}{\dot{m}} \quad 3.1$$

Donde h_{toma} representa la entalpía de la muestra extraída de la línea principal en el punto de muestreo, Q_{cal} corresponde al calor suministrado por la resistencia eléctrica, y $\dot{m}$ es el flujo másico que atraviesa el sistema. Como consecuencia del estrangulamiento, se cumple que la entalpía en la cámara de expansión es igual a la entalpía de entrada al orificio:

$$h_2 = h_{1,orif} \quad 3.2$$

Esto permite expresar la entalpía de la toma en función de la entalpía medida en la cámara y la energía añadida por el calentador:

$$h_{toma} = h_2 - \frac{\dot{Q}_{cal}}{\dot{m}} \quad 3.3$$

El valor de h_2 se obtiene a partir de la medición experimental de la temperatura en la cámara, considerando que la presión en ese punto es aproximadamente atmosférica ($P_2 \approx 1 \text{ bar}$). Con estas dos variables se consulta en las tablas de propiedades del vapor para determinar la entalpía correspondiente al estado de sobrecalentamiento.

Una vez conocido h_{toma} , se calcula la calidad del vapor comparando con las propiedades de saturación a la presión de la línea principal P_1 :

$$x = \frac{h_{toma} - h_f(P_1)}{h_{fg}(P_1)} \quad 3.3$$

Donde $h_f(P_1)$ es la entalpía del líquido saturado y $h_{fg}(P_1)$ el calor latente de vaporización en la presión P_1 .

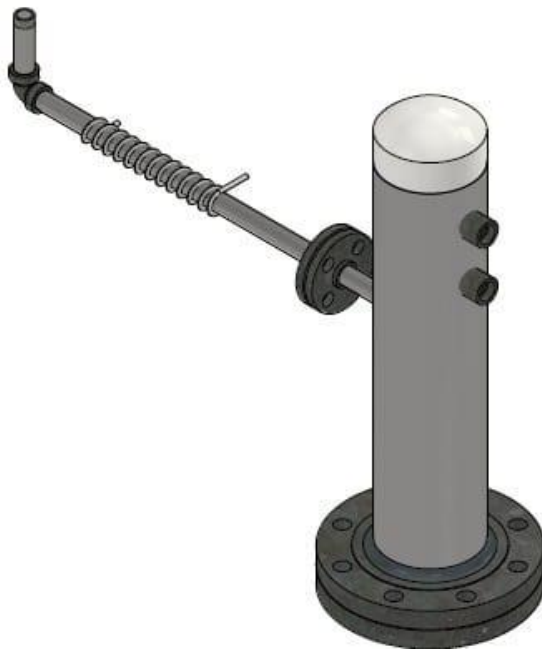
Con este procedimiento se logra que el cálculo de la fracción seca refleje las condiciones reales del vapor en la tubería, corrigiendo el efecto del calentador mediante un balance de energía sencillo. De esta manera, el equipo diseñado proporciona resultados confiables y didácticos para el análisis de la calidad de vapor en prácticas de laboratorio.

3.2 Diseño de forma

Se procedió a modelar el diseño final del calorímetro mediante el software Autodesk Inventor, generando un modelo CAD tridimensional que integra todos los componentes en un solo ensamble. En la vista general se observa el recorrido del vapor desde su ingreso por la tubería principal, controlado por la válvula de cierre rápido de ½ in, hasta la resistencia eléctrica

de precalentamiento, donde se eleva parcialmente la temperatura del fluido para favorecer la obtención de vapor sobrecalentado. Posteriormente, el flujo atraviesa el orificio de estrangulamiento, donde se produce la caída de presión isoentálpica que transforma al vapor en una condición más adecuada para la medición. Finalmente, el vapor se conduce hacia la cámara de expansión aislada térmicamente, donde se estabilizan las variables de presión y temperatura, permitiendo realizar las lecturas necesarias para determinar la calidad del vapor. Esta disposición refleja de manera integral el principio de funcionamiento del calorímetro modificado y consolida la transición de los cálculos teóricos al diseño gráfico del prototipo.

Figura 12. *Diseño CAD de calorímetro de estrangulamiento modificado.*



Nota. La resistencia eléctrica tiene una fuente de energía externa.

3.3 Materiales

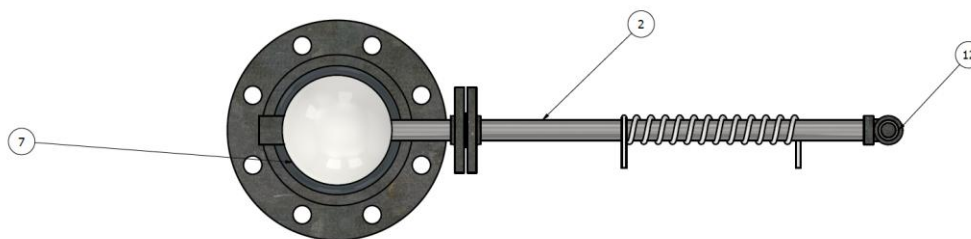
La selección de materiales para la construcción del calorímetro de estrangulamiento modificado se realizó considerando las condiciones de operación del sistema (presión ≈ 10 bar, temperatura ≈ 210 °C), así como criterios de seguridad, durabilidad, facilidad de fabricación y

disponibilidad en el mercado local. A continuación, se detallan los principales elementos que conforman el prototipo, indicando el material seleccionado y su función dentro del dispositivo.

3.3.1 Tuberías

En cuanto a la conducción del fluido, se seleccionaron diferentes tramos de tubería en acero inoxidable ASTM A312 TP316L. Para la línea principal se determinó el uso de un tramo de ½ in Schedule 40S (diámetro exterior 114,3 mm y espesor 8,56 mm), con una longitud de 500 mm, garantizando resistencia adecuada al flujo de ensayo.

Figura 13. Vista superior del calorímetro.



Nota. La tubería de ingreso es el elemento 2.

3.3.2 Válvulas de cierre rápido

Se incorporan 2 válvulas de cierre rápido de 1/2 in hechas de acero inoxidable, una instalada en la línea de ingreso del vapor al calorímetro y otra instalada a la salida de la cámara de expansión que debe permanecer abierta para brindar presión atmosférica al sistema y validar la medición de la presión dentro de la misma.

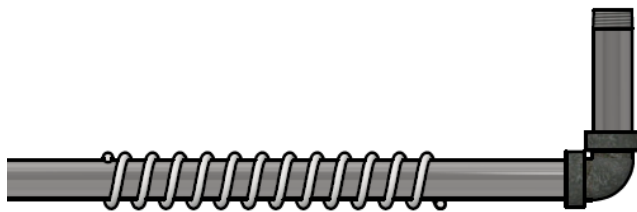
3.3.3 Resistencia eléctrica

Para la etapa de precalentamiento se selecciona una resistencia eléctrica tipo cartucho de hilo bobinado, construida en acero inoxidable con aislante cerámico. Esta resistencia disipa la potencia calculada en el capítulo 2, elevando la temperatura del vapor húmedo para favorecer

la transición hacia el estado de vapor sobrecalentado antes de la expansión. Esta resistencia debe de brindar una potencia de 3 kW.

El sistema incorpora un calentador eléctrico de inmersión, diseñado con vaina de acero inoxidable 316L para garantizar transferencia térmica eficiente. Su potencia se ajustó al rango de operación requerido para el calorímetro, con control mediante termostato. Este elemento asegura el control de temperatura a la que debe de llegar el fluido en función de la medición inicial antes del proceso de estrangulamiento, con el fin de que sea regulable para diferentes calidades de vapor.

Figura 14. *Vista lateral de la resistencia eléctrica.*



Nota. Esta resistencia rodea el tramo de tubería para aumentar la temperatura del vapor.

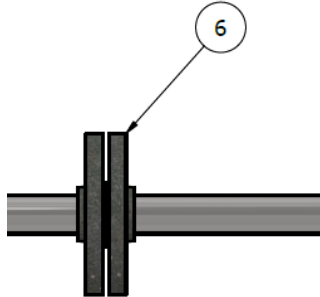
3.3.4 Bridas y placa orificio

En el diseño del calorímetro se emplean bridas normalizadas según ASME B16.5, fabricadas en acero ASTM A105 o acero inoxidable AISI 304, cuya función principal, además de servir como uniones mecánicas, ser el acople de la placa orificio. Se cuenta con dos bridas deslizantes de ½ in Clase 150, empleadas en líneas secundarias de conexión; y una brida ciega de 4 in Clase 150, destinada al cierre de extremo y a la posibilidad de inspección o pruebas de presión. La disposición de estas bridas garantiza tanto la resistencia mecánica del sistema como el control del flujo a través del estrangulamiento.

El estrangulamiento del vapor se logra mediante una placa orificio en acero inoxidable AISI 304, diseñada con un diámetro de garganta de 2.73 mm. Este valor garantiza condiciones

de flujo crítico (sónico) y una adecuada relación entre caída de presión y gasto másico, asegurando la representatividad de la muestra.

Figura 15. *Bridas de placa orificio.*

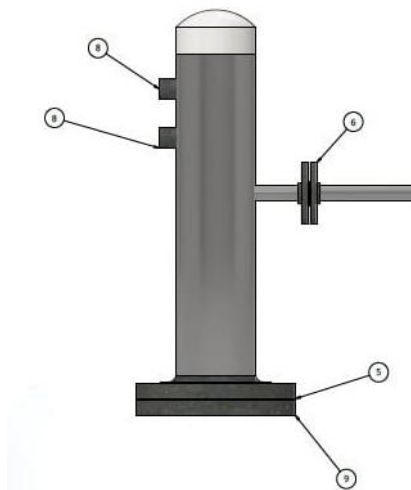


Nota. Bridas de 1/2 in con una placa orificio entre ambas de aproximadamente 2.73mm.

3.3.5 Cámara de expansión

La cámara de expansión está fabricada en acero al carbono ASTM A106 Gr. B, con dimensiones de un diámetro de 4 in Schedule 40S (diámetro exterior 114,3 mm y espesor 8,56 mm) de alto y una altura de 50 cm. Este componente permite estabilizar las variables de presión y temperatura del vapor, facilitando una medición precisa de sus propiedades termodinámicas. En la parte inferior cuenta con una brida ciega y una deslizante, ambas de 4 in Clase 150, con el fin de facilitar las condiciones de desmontaje para realizar un mantenimiento a la parte interior de la cámara de expansión.

Figura 16. *Cámara de expansión.*



Nota. Esta tiene una forma cilíndrica.

3.3.6 Aislamiento térmico

La cámara de expansión y las secciones críticas de tubería son recubiertas con un aislamiento de lana de roca de 30 mm de espesor, con conductividad térmica de $0.04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Este material reduce significativamente las pérdidas de calor al ambiente, garantizando que el sistema se comporte de manera cuasi adiabática durante el proceso de medición.

3.3.7 Instrumentación

Para la obtención de datos experimentales, se debe de instalar 2 manómetros de al menos 10 bar, dado que esa es la presión máxima a la que puede trabajar la caldera. Estos manómetros son instalados de forma que uno está antes del proceso de calentamiento y el otro se encuentra en la cámara de expansión.

Figura 17. Manómetro analógico



Nota. Son 2 manómetros, ambos de al menos 10 bar.

Adicionalmente se debe de instalar 1 termómetro de al menos 250° considerando que el vapor alcanza el sobrecalentamiento a los 210° . Este equipo va instalado en la cámara de expansión y posee una longitud aproximada de 30 cm, por lo cual sí puede ingresar en este componente.

Figura 18. Termómetro analógico



Nota. El termómetro debe ser capaz de medir al menos 250° dadas las condiciones de sobrecalentamiento.

3.3.8 Accesorios de unión

Para asegurar la hermeticidad de las uniones se consideró el uso de juntas espiral metálica en acero inoxidable 316 con relleno de grafito en las conexiones de 4 in, mientras que en las de ½ in se seleccionaron juntas planas de PTFE, adecuadas para condiciones de baja presión y resistencia química. La tornillería asociada a las bridas se definió en acero inoxidable ASTM A193 B8M para pernos y ASTM A194 8M para tuercas, garantizando compatibilidad de materiales y resistencia mecánica adecuada.

3.4 Costos de materiales

Para la evaluación económica del diseño se realizó un análisis de costos dividido en tres secciones complementarias. En la primera se listan los materiales y accesorios empleados en la construcción del calorímetro, con sus dimensiones, cantidades y valores unitarios. Posteriormente, se calculan las pulgadas diametrales roscadas y soldadas, lo que permite cuantificar las uniones requeridas y su impacto en el presupuesto. Finalmente, se incorpora la estimación de mano de obra, considerando el tipo de unión y el costo asociado a cada procedimiento. Este esquema proporciona una visión integral de la inversión necesaria para llevar a cabo el montaje del prototipo.

En la primera tabla se presenta el detalle de los materiales y componentes necesarios para la construcción del calorímetro de estrangulamiento. Se incluyen las dimensiones, unidades y cantidades requeridas, junto con su costo unitario y el costo total por cada ítem. Este desglose permite visualizar de manera precisa la inversión en insumos básicos para el montaje del equipo.

Tabla 5. *Costo de material por ítem.*

DESCRIPCIÓN	TAMAÑO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Válvula de Bola inox, Roscada	½ in	Unidad	2	\$2,00	\$13,11
Tubería acero al carbono SCH 40	½ in	Unidad	0.5	\$0,50	\$11,31
Resistencia 3 kW	NA	Unidad	1	\$1,00	\$25,00
Bridas deslizables HN cl 150	½ in	Unidad	2	\$2,00	\$2,15
Brida ciega HN cl 150 (Para placa orificio)	½ in	Unidad	1	\$1,00	\$4,77
Tubería acero al carbono SCH 40	4 in	Unidad	0.2	\$0,20	\$82,60

Brida deslizable HN cl 150 4 in	4 in	Unidad	1	\$1,00	\$10,70
Brida ciega HN cl 150 2 in	4 in	Unidad	1	\$1,00	\$13,00
Codo HN cl 150 ½ in	½ in	Unidad	2	\$2,00	\$0,60
UNION FORJADA CL 3000 ½ in	½ in	Unidad	2	\$2,00	\$3,80
CAP Acero al carbono SCH 40 Soldable	4 in	Unidad	1	\$1,00	\$15,00
Termómetro analógico 250°C	NA	Unidad	1	\$1,00	\$55,00
Manómetro analógico 10 bar	NA	Unidad	2	\$2,00	\$37,00
VARIOS (consumibles, teflón, permatec, aporte)	NA	Unidad	1	\$1,00	\$50,00
TOTAL					\$308.97

Nota. precios unitarios actuales en el mercado local

La tabla 6 corresponde al cálculo de las pulgadas diametrales roscadas y soldadas. Este análisis permite cuantificar las uniones necesarias en el proyecto, diferenciando entre

conexiones roscadas y soldadas. Con ello se estima el trabajo mecánico asociado al armado, además de los costos relacionados con cada tipo de unión.

Tabla 6. *Pulgadas diametrales*

DESCRIPCION	TAMAÑO	CTD JUNTAS	CANTIDAD	ROSCADO	HN SOLDADO
Válvula de Bola inox, Roscada	0,50	2,00	2,00	2,00	
codo roscado ½ in	0,50	2,00	2,00	2,00	
Brida ½ in	0,50	1,50	2,00		1,50
Brida 4 in	4,00	1,50	1,00		6,00
Union Forjada	0,50	1,00	2,00		1,00
Cap de 4 in	4,00	1,00	1,00		4,00
TOTAL				4,00	12,50

Nota. Los cálculos de realizaron en base al diseño de forma

Finalmente, la tercera tabla presenta el costo de la mano de obra, considerando tanto las uniones roscadas como las soldadas. Este cálculo integra la cantidad de pulgadas trabajadas y el valor asignado a cada tipo de procedimiento, ofreciendo una visión clara del costo asociado a la construcción y ensamble del prototipo.

Tabla 7. *Costo mano de Obra*

PULGADAS DIAMETRALES ROSCADAS	PULGADAS DIAMETRALES SOLDADA	PRECIO PULGADAS DIAMETRALES ROSCADAS	PRECIO PULGADAS DIAMETRALES SOLDADA	TOTAL
4,00	12,50	\$6,50	\$22,00	\$301,00

Nota. Los costos son los manejados en el mercado actual

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- El calorímetro diseñado se fundamenta en el principio de estrangulamiento donde una muestra de vapor tomada de la caldera Thompson 3 minipac que opera a presión máxima de 10 bar y el vapor sale a 210°, se deriva a una tubería secundaria de ½ in, para luego ser calentado el vapor por una resistencia de calentador tubular de hasta 3 kW, pudiendo variar en función de la presión medida por el manómetro a la entrada de la tubería de muestreo. Esta luego pasa por una placa orificio de 2.73 mm e ingresa directamente a una cámara de expansión, donde aumenta la temperatura debido al sobrecalentamiento y cae repentinamente la presión del vapor. Esto da como resultado un calorímetro de estrangulamiento modificado, que es capaz de modificar la calidad de vapor mediante una resistencia eléctrica regulable en potencia de la fuente a la que se conecta.
- Se realizaron diferentes cálculos para el dimensionamiento de todo el sistema del calorímetro, comenzando en primera parte con la tubería de entrada siendo de ½ in al igual que la válvula de cierre rápido. Luego se consideraron principios como flujo crítico y área de garganta para obtener un diámetro de garganta de 2.73 mm o aproximadamente 1/8 in. Posteriormente con una velocidad media objetivo en la cámara de expansión, se obtuvieron las dimensiones de forma cilíndrica con 10 cm de diámetro y 50 cm de largo. La tabla 5 ilustra los materiales obtenidos y el precio de cada componente.
- Mediante el software Inventor se realizó un diseño CAD del calorímetro modificado final, como se refleja en los ANEXOS B, reflejando los componentes requeridos para la fabricación de este dispositivo.

4.2 Recomendaciones

- Una posible ampliación de este trabajo puede ser el desarrollo de simulaciones numéricas avanzadas que permitan analizar el comportamiento del vapor dentro del calorímetro bajo diferentes condiciones de operación. Herramientas como ANSYS Fluent podrían emplearse para modelar la transferencia de calor, el régimen de flujo y la distribución de fases dentro de la cámara de expansión.
- Tras realizar una simulación bajo las condiciones específicas de la caldera, se puede fabricar este calorímetro para validar y comparar los resultados de la calidad de vapor obtenidos, comprobando la reducción de humedad en el vapor gracias a la resistencia eléctrica. Es importante realizar correctamente los cálculos, validando con las tablas termodinámicas.
- Es importante reconocer, sin embargo, que el calorímetro diseñado presenta limitaciones inherentes a su concepción. Este está diseñado para medir temperaturas de máximo 250° C. Además, este está diseñado específicamente para una caldera de 10 bar, por lo que no puede ser utilizado en otras calderas. Sería interesante indagar la manera de diseñar y desarrollar un calorímetro de estrangulamiento adaptable para condiciones de otras calderas, en un amplio rango de presiones y temperaturas, de forma que tendría un enfoque más comercial e industrial.

Bibliografía

- Calventus, A., Carreas, J., Casals, J., Colomer, J., Costa, M., Jaén, J., Monsterrat, J., Oliva, A., Quera, J., & Roca, J. (2006). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Edicions UPC.
- Cequeira, J. A., & Fontana, L. A. (2019). *Termodinámica: apunte didáctico* (1ª ed.). Posadas: Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ciencias Forestales.
- Virto Albert, L. (2017). *Dinámica de gases* (1ª ed.). Barcelona: Iniciativa Digital Politècnica, Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- Martín Sánchez, S. (2015). UF0566: Eficiencia energética en las instalaciones de climatización en los edificios (Ed. 5.0). Málaga: Editorial Elearning S.L.
- ASTM International. (2017). *Standard specification for mineral fiber pipe insulation* (ASTM C547–17). <https://www.astm.org>
- Moura, A. R. de S., Gazel, H. F., & Nogueira, M. F. M. (2012). Design of modified throttling calorimeter for low steam quality measurements. *Proceedings of the 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2012)*, November 18–22, Rio de Janeiro, Brasil. ABCM.
- Balmer, R. T. (2011). *Modern engineering thermodynamics*. Burlington: Academic Press (Elsevier Inc.).
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2003). *Introduction to fluid mechanics* (6ª ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (Trad. de la 1ª ed. de *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*). México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Singh, O., Bhavikatti, S. S., & Chandra, S. (2006). *Introduction to mechanical engineering: Thermodynamics, mechanics and strength of materials* (4th ed.). New Age International.
- Fallas Chinchilla, J. C. (2007). *Diseño del sistema de calentamiento para simulación del flujo de plasma en tubo cilíndrico* [Proyecto de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

- Incropera, F. P. (2005). Physical origins and rate equations. En *Fundamentals of heat and mass transfer*. University of California, Los Angeles: Mary Morgan-McGee.
- Ichitsubo, H., & Otani, Y. (2012). Development of variable flow rate isokinetic sampling system for 0.5–15- μm aerodynamic diameter particles. *Aerosol Science and Technology*, 46(12), 1286–1294. <https://doi.org/10.1080/02786826.2012.709336>
- Ferremas. (s.f.). *Válvula cierre rápido 3 piezas acero inox*. Ferremas Honduras. <https://ferremas.hn>
- Florian, J. (1996). *Practical thermoforming: Principles and applications* (2nd ed., rev. and expanded). Boca Raton: CRC Press.
- Gianni. (s.f.). *Manómetro Ø 63 mm de 0 a 15 Bar*. <https://www.gianni.com.uy/product/manometro-o-63-mm-de-0-a-15-bar/>
- Lab Cevallos. (s.f.). *Termómetro reloj dial -10 a 250 °C / -20 a 460 °F vástago 30 cm / 50 mm diámetro*. <https://labcevallos.com/termometro-reloj-dial-10-a-250-c-20-a-460-f-vastago-30-cm-50-mm-diam/14316>
- ASME. (2022). *MFC-3M - Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi* (Edición 2004). American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM International. (2018). *ASTM D1066-18e1: Standard Practice for Sampling Steam*. ASTM International.
- International Organization for Standardization. (1994). *ISO 10780:1994 - Stationary source emissions — Measurement of velocity and volume flowrate of gas streams in ducts*. ISO.
- Brennen, C. E. (2011). *An Introduction to Cavitation Fundamentals*. Invited lecture presented at the WIMRC Forum 2011, University of Warwick, UK. [\(PDF\) An Introduction to Cavitation Fundamentals](#)
- Applied Flow Technology. (2010, June 23). *Modeling Compressible Flow through an Orifice*. AFT. [AFT-Modeling-Choked-Flow-Through-Orifice.pdf](#)
- Emerson Process Management. (2013). *Impact of failed steam traps on process plants* (White paper). Rosemount Inc. [White Paper: Impact of failed steam traps on process plants](#)

ANEXO A: MANUAL DE CALDERA THOMPSON 3 MINIPAC

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MANUAL DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE PLANTA DE GENERACIÓN DE PODER

INTRODUCCIÓN: Este folleto de instrucción servirá como guía de los estudiantes para las pruebas del laboratorio de planta de poder.

Para las instrucciones detalladas sobre la operación de cada artículo del equipo., se deberá consultar el manual de operación.

Objetivos

La experiencia en la planta de vapor proporcionará al estudiante un entendimiento de la operación básica de las plantas de generación de poder, un conocimiento de dónde y cómo se miden los parámetros más importantes, y un conocimiento detallado de como calcular el rendimiento de una típica planta de poder a vapor.

Nota:

Es importante notar, sin embargo, que la mayor parte de las plantas industriales de poder usan calderos de tubos de agua con supercalentadores integrados, y turbinas a reacción.

El laboratorio de planta de poder fue diseñado especialmente para propósitos de enseñanza y así ciertas diferencias de diseño son inevitables.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL LABORATORIO DE PLANTA DE PODER.

La planta consiste de los siguientes componentes conectados como se muestra en la figura (1)

- (1) Unidad de tratamiento de agua.
- (2) Tanques de agua de alimentación.
- (3) Caldero.
- (4) Supercalentador.
- (5) Turbina y Generador.
- (6) Condensador.
- (7) Torre de enfriamiento.

(1)

La unidad de tratamiento de agua consiste de una cama de resina desionizante a través de la cual pasa el agua que llega al laboratorio para ser ablandada. Cuando la resina se satura puede ser regenerada usando una solución salina desde el tanque de sal. La unidad también contiene una botella alimentadora de líquido a través de la cual químicos pueden ser añadidos para mantener el agua del caldero en su condición correcta.

(3)

El caldero es de tubos de fuego, controlado automáticamente, capaz de: proveer 450 KG/h de vapor saturado a una presión de 10 bar. El encendido del quemador se controla por la presión del caldero. A una presión de alrededor de 9 bar el caldero enciende automáticamente, y el quemador se apaga cuando la presión llega a 10 bar.

Similarmente cuando el nivel de agua del caldero baja a un nivel predeterminado, la bomba de agua de alimentación arranca automáticamente y funciona hasta que el nivel de agua haya vuelto al nivel normal.

(4)

El supercalentador trabaja a diesel y consiste de un intercambiador de calor de tubo enfriado situado en el horno. Vapor saturado desde el caldero entra al supercalentador y es calentado a una temperatura de salida predeterminado por los gases calientes de la combustión de diesel en el horno. El apagado del quemador es controlado por la temperatura de salida del vapor un interruptor limitador de presión está también montado, el agua apagará el quemador si la presión de entrada del vapor cae bajo un valor predeterminado.

(5)

La turbina de vapor es una turbina de impulso de una sola etapa equipada con tres toberas condensables y dos No condensables. El vapor se expande a través de las toberas a la presión del condensador. El vapor a alta velocidad pasa a través de la fila de paletas móviles, en la cual parte de la energía cinética del vapor es convertido en trabajo mecánico de salida. La turbina acciona al generador a través de una caja de engranajes de reducción de velocidad de 8,1.

ANEXO B: PATENTE DE CALORÍMETRO

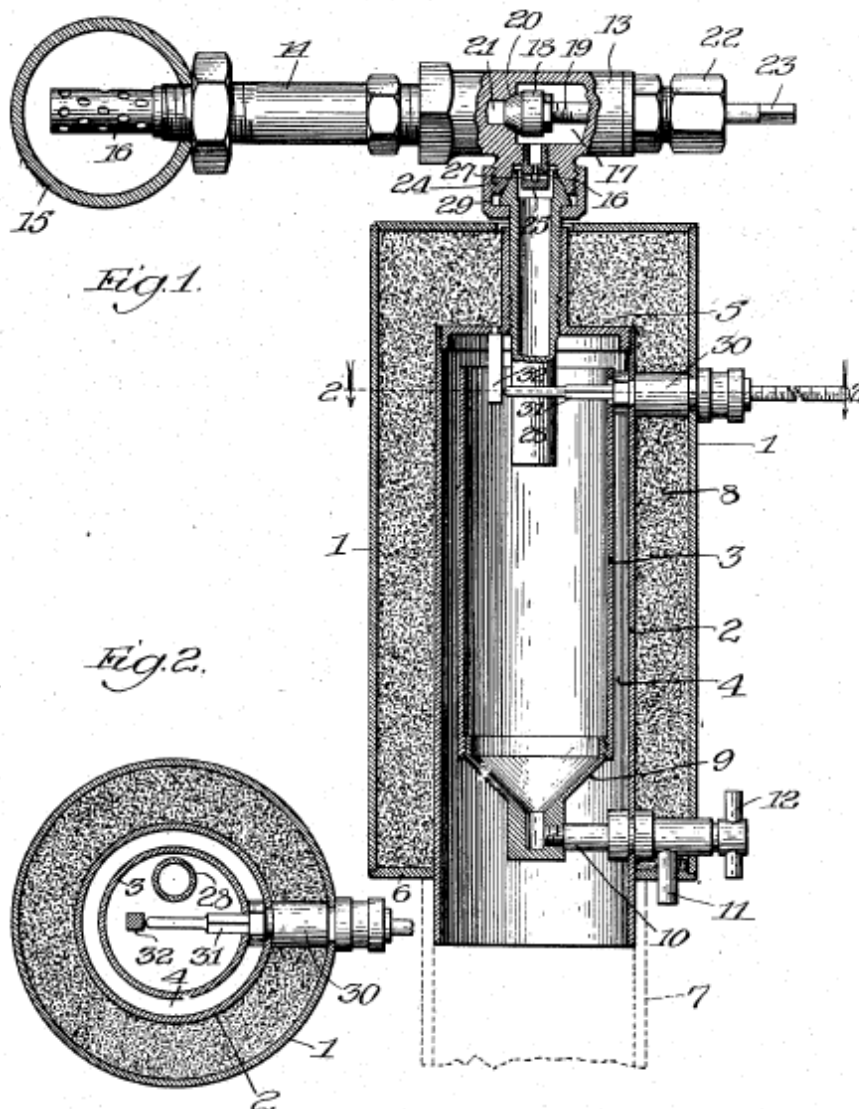
Jan. 7, 1930.

L. M. ELLISON

1,742,203

STEAM CALORIMETER

Filed Feb. 11, 1928



Inventor:
Lewis M. Ellison,
By Agnes Swan
Att'y.

UNITED STATES PATENT OFFICE

LEWIS MARTIN ELLISON, OF CHICAGO, ILLINOIS

STEAM CALORIMETER

Application filed February 11, 1928. Serial No. 253,621.

This invention relates to improvements in steam calorimeters and consists in the matters hereinafter described and claimed.

In the accompanying drawings—

5 Fig. 1 is a vertical sectional view, with parts in elevation, of a steam calorimeter constructed in accordance with my invention; and

10 Fig. 2 is a horizontal sectional view taken on line 2—2 of Fig. 1.

The instrument has an outside metal case 1 and two inside metal casings 2, 3. The latter are preferably cylindrical in shape with the inner one 3 of a smaller diameter than the 15 outer one 2, and arranged one within the other in concentric relation to provide an annular space 4 between them. The casing 3 forms the steam receiving chamber of the instrument, while the casing 2 provides a surrounding jacket for the chamber 3. The 20 jacket 2 is made longer than the chamber 3 and extends above and below the latter. A screw-threaded or other cap 5 closes the upper end of the jacket 2, while its lower end 25 extends through the bottom wall 6 of the outside case 1 and is open to the atmosphere through an exhaust tube 7 which fits over the projecting end of the jacket 2 and, in carrying the escaping steam away from the same, 30 insulates its steam outlet end against the possibility of chilling.

The upper end of the steam chamber 3 is open and, terminating short of the cap 5, 35 allows steam to flow from the chamber 3 into the jacket 2 over the upper edge of said chamber and by the space 4 surrounds said chamber with a jacket of steam of the same temperature as the steam within the chamber. The jacket of steam surrounding the steam 40 chamber 3 is kept at the same temperature as the steam in the chamber by insulation of the jacket 2 against chilling. This is effectively accomplished by packing the outside case 1 about the jacket 2 with a filling 8 of suitable 45 heat insulating material, such as lamp black. All radiation losses are minimized by the compact design, and further heat retention is insured by having the outside case 1 of brass highly polished and nickel-plated. This arrangement of steam jacket, insulated jacket,

and bright exterior surface provides in one instrument the three best known methods of reducing calorimeter radiation losses. The provision of the steam jacket about the steam chamber is an important feature of my invention as the heat conduction from the steam 55 chamber is eliminated, resulting in the calorimeter giving the closest approach to theoretical temperatures ever made possible in steam calorimetry.

60 The lower end of the steam chamber 3 is closed by a conical bottom 9, preferably screwed in place and connected with a drain fitting 10 which extends horizontally outward from said bottom 9 through the jacket 2 65 and outside case 1, respectively. The outlet spout 11 of the fitting 10 extends outward through the bottom wall 6 of the outside case 1 and is opened and closed by a needle or other valve (not shown) located in the fitting and 70 having an operating handle 12 exterior of the case 1 for accessibility, as shown. Being at the lower end of the chamber 3, the drain is located in the steam outlet of the jacket 2 and will not conduct heat from the steam chamber 75 3. The fitting 10 being carried by the jacket 2 and outside case 1 and being secured to the bottom 9, supports the steam chamber 3 in place in said jacket.

80 At the top of the instrument and constituting a part thereof is a horizontally disposed valve fitting 13 provided with a similarly disposed nipple 14 which is threaded at its outer end for screwing into a hole tapped in the 85 side of a steam pipe 15 carrying the steam to be tested. The nipple 14 in its outer end is tapped for holding any one of a number of interchangeable perforated sampling tips 16 which extend into the steam pipe 15 from the 90 nipple and are made in different lengths for steam pipes of different diameters. The fitting 13 has a valve chamber 17 in which is located a suitable tapered valve 18 carried at the inner end of a threaded stem 19 and movable thereby on and off a beveled seat 20 at 95 the inner end of a passage 21 also provided in the fitting and leading to the nipple 14. The stem 19 extends outside of the fitting 13 through a gland nut 22 and is there arbores, 100 as at 23, to be operated with a removable

socket wrench or other tool (not shown), thus eliminating the use of a handle wheel to radiate heat and facilitate the covering of the entire stem with tissue paper when the instrument is in use.

At the valve chamber 17, the fitting 13 has a depending lug 24 into which is screwed or otherwise removably fitted any one of a number of interchangeable throttling plugs 25, which plugs have orifices 26 of different diameters as required for different steam pressures. The orifice 26 of a plug when in place opens at its upper end into the valve chamber 17 and receives steam therefrom when the valve 18 is moved off its seat. The lower end of the orifice opens into a pair of cross-passages 27, 27 by means of which the steam is divided into four atomized streams, which meet and mix below the plug in the upper end of a tube 28. The latter is coupled to the lug 24 by a union 29, there being coacting beveled surfaces between them, as shown. The union, being on the outside side of the plug 25, is under only atmospheric pressure and is not subjected to leakage. The tube 28 is open at its lower end and extends down into the steam chamber 3 at one side thereof, as shown in Fig. 2. This causes the steam to take a U-path in its flow through the chamber 3, first down one side of the chamber 3 from the tube 28 and then up the other side of the chamber to reach the jacket 2 over the upper end of the chamber 3.

A thermometer holder 30 is clamped between the jacket 2 and the outside case 1 adjacent the upper end of the steam chamber and supports a suitable thermometer 31 which has its inner or bulb end extending from the holder into the steam chamber 3 so as to be directly in the steam bath in said chamber. The outer or scale end of the thermometer 31 is outside of the case 1 so that it may be conveniently read. The holder 30 forms a packing cup for the thermometer 31 and, in terminating in the jacket 2, prevents the conduction of heat from the steam chamber 3 by both the holder and the thermometer. The thermometer 31 is gas filled, reading up to any desired number of degrees, say 400° F., and is graduated for two inch immersion.

The device shown and described operates as follows. After the instrument is attached to the pipe 15, carrying the high temperature and high pressure steam to be tested, the valves 10 and 18 are opened and steam flows through the instrument to heat up the jacket 2 and steam chamber 3 to remove the chill therefrom before testing the steam to determine the percentage of the moisture or quality of the steam. After the chamber 3 and jacket 2 are thoroughly heated to the temperature of the steam, the drain valve 10 is closed after all condensate produced in the chamber 3 by reason of its original chill is removed, so that no moisture will be present in said

chamber to effect the accuracy of the test to follow. The valve 18 being left open, the steam to be tested continues to flow through the instrument. On passing through the orifice 26 of the throttling plug 25, the pressure of the steam drops to substantially atmospheric pressure in the chamber 3 due to the fact that said chamber is open to the atmosphere through the jacket 2 and the exhaust tube 7. The high temperature steam in dropping its pressure gives off its superheat and that is registered by the thermometer 31. The difference between the temperature of the steam in the pipe 15 and 212° F. (the temperature at which steam forms at atmospheric pressure) gives the theoretical temperature of the superheat. The difference between this temperature and the actual temperature of the superheat, as shown by the thermometer 31, will indicate the temperature which has been utilized in evaporating the excess moisture carried by the steam in pipe 15. From this difference may be figured by proper formula the percentage of moisture or the quality of the steam. For example, suppose the gage pressure of the steam in pipe 15 is 100 pounds and the temperature of the superheat in the steam chamber 3 is 70° F., formula for determining the moisture in steam in throttling calorimeters shows that the percentage of moisture in the steam is about .6 of 1%. This accuracy is made possible due to the insulation of the chamber 3 by a jacket of steam of about the same temperature as the steam within the chamber.

A momentary abnormal moisture content in excess of the throttling process (at the plug 25) is separated in the steam chamber 3, but by the U-flow of the steam through this chamber this moisture is re-evaporated by the superheated steam after the period of excess, giving a true average superheat temperature at the thermometer 31. The instrument thus forms a combined throttling, separating, and re-evaporating calorimeter in a single chamber, utilizing the U-path of superheated steam which is the most efficient method of calorimeter moisture evaporation.

The details of structure and arrangement of parts shown and described may be variously modified and changed without departing from the spirit and scope of my invention.

I claim as my invention:

1. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at one end and having an outlet for steam at its opposite end, means for discharging steam into said chamber toward the closed end thereof, means for registering the temperature of the steam in said chamber, and means for causing the steam as it is discharged from said chamber to flow along the outside of said chamber from its outlet to its closed end so as to

jacket the chamber throughout its entire length with steam having substantially the same temperature as the steam in said chamber.

2. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at one end and having an outlet for steam at its opposite end, a jacket about said chamber and providing a steam receiving space about the same, said jacket being in communication with the outlet end of said chamber and having an outlet for steam adjacent the closed end of said chamber, means for admitting steam into said chamber, and means for registering the temperature of the steam in said chamber.

3. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at one end and having an outlet for steam at its opposite end, a jacket about said chamber and providing a steam receiving space about the same, said jacket being in communication with the outlet end of said chamber and having a steam outlet adjacent the closed end of said chamber, means for admitting steam into said chamber, means for registering the temperature of the steam in said chamber, and heat insulating means about said jacket.

4. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at one end and having an outlet for steam at its opposite end, a jacket about said chamber and providing a steam receiving space about the same, said jacket being in communication with the outlet end of said chamber and having a steam outlet adjacent the closed end of said chamber, means for admitting steam into said chamber, means for registering the temperature of the steam in said chamber, a casing about said jacket, and a filling of heat insulating material packed in said casing about said jacket.

5. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at one end and open at its opposite end, a jacket about said chamber and providing a steam receiving space about the same, said jacket extending along and beyond the opposite ends of said chamber and having an outlet for steam beyond the closed end of said chamber, a closure for the end of the jacket adjacent the open end of said chamber, a steam admitting tube extending into said chamber through said closure, and means for registering the temperature of the steam in said chamber.

6. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at one end and open at its opposite end, a jacket about said chamber and providing a steam receiving space about the same, said jacket extending along and beyond the opposite ends of said chamber and having an outlet for steam beyond the closed end of said chamber, a closure for the end of the jacket adjacent the open end of said chamber, a casing about the closure and the greater portion of the jacket,

a filling of heat insulating material packed in said casing about the jacket and its closure, a steam admitting tube extending into the chamber through the casing and said closure, and means for registering the temperature of the steam in said chamber.

7. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at one end and having an outlet for steam at its opposite end, a jacket about said chamber and providing a steam receiving space about the same, said jacket being in communication with the outlet end of said chamber and having an outlet for steam adjacent to the closed end of said chamber, a steam admitting tube extending into said chamber at one end thereof, and means for registering the temperature of the steam in said chamber.

8. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber closed at its lower end and having an outlet for steam at its opposite end, a jacket about said chamber and providing a steam receiving space about the same, said jacket being in communication with the outlet end of said chamber and extending beyond the closed end thereof where the jacket has an outlet for steam, means for admitting steam into said chamber, means for registering the temperature of the steam in said chamber, and a drain fitting for said chamber at its closed end, said fitting being fixed to said jacket and serving as a support for the chamber in said jacket.

9. In a steam calorimeter, an elongated steam chamber, means for admitting to said chamber the steam the moisture content of which is to be determined and for causing the steam to flow in a U-path through said chamber, means providing an exhaust for the steam from said chamber, means for throttling the steam as it is admitted into said chamber, means whereby said chamber may be surrounded by a jacket of steam of practically the same temperature as the steam in said chamber to prevent the transfer of heat from said chamber, and means for registering the temperature of the steam in said chamber.

10. In a steam calorimeter, a vertically disposed cup-shaped steam chamber, a jacket about said chamber and communicating therewith over the upper edge of said chamber, means for admitting steam into said chamber through its upper end, said jacket having its lower end forming a steam outlet and extending below said chamber, a drain fitting at the lower end of said chamber and extending across the space between the chamber and jacket, and a thermometer extending into said chamber adjacent its upper end for registering the temperature of the steam in said chamber.

11. In a steam calorimeter, an elongated upright steam chamber, a jacket surrounding said chamber and communicating there-

with over the upper edge of said chamber, said jacket having its lower end forming a steam outlet below said chamber, a valve fixture above said jacket and having a steam conveying tube extending downward into said chamber at one side thereof, a sampling pipe connected with said valve fitting, and manually operable valve in said fitting between said pipe and said tube for controlling the flow of steam to the latter.

12. In a steam calorimeter, an elongated upright steam chamber, a jacket surrounding said chamber and communicating therewith over the upper edge of said chamber, said jacket having its lower end forming a steam outlet below said chamber, a valve fixture above said jacket and having a steam conveying tube extending downward into said chamber, a sampling pipe connected with said valve fixture, a valve in said fixture between said pipe and said tube, and a manually operable stem mounted in said fixture and connected with said valve for opening and closing the same, said stem having a wrench engaging portion at its outer end.

In testimony whereof I affix my signature.

LEWIS MARTIN ELLISON.

30

35

40

45

50

55

60

65

ANEXO C: ESPECIFICACIONES INSTRUMENTACIÓN



Manómetro Ø 63 mm de 0 a 15 Bar

U\$S17

Manómetro de Acero Inoxidable con Glicerina.

Todas nuestras imágenes son meramente ilustrativas.

▼ Formas de Pago

▼ Retiros en local

▼ Envíos

9 disponibles



Boeco

TERMOMETRO RELOJ DIAL -10 A 250 °C / -20 A 460 F VASTAGO 30 CM / 50 MM DIAM

\$ 25.88

El precio incluye IVA

Es un termómetro con base de gancho y panel que proporciona resistencia a la corrosión, inducción mecánica, se puede medir directa y con precisión la olla, freír, control de temperatura de barbacoa, perfecto para cocinas profesionales y domésticas.

Compartir



Visitanos en



ANEXO D: GUÍA DE PRÁCTICA DE CALIDAD DE VAPOR

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS

PRÁCTICA: CALIDAD DE VAPOR

OBJETIVO GENERAL

Calcular la calidad de vapor mediante el uso de un calorímetro de estrangulamiento modificado.

MARCO TEÓRICO

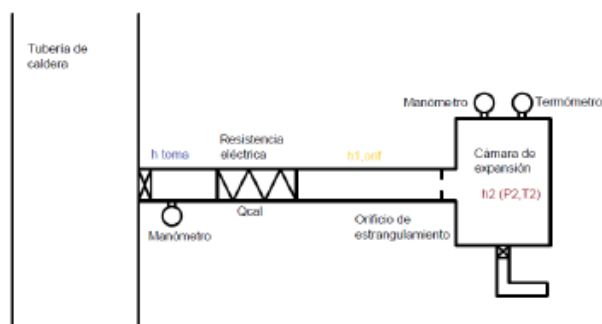
La calidad de vapor es un parámetro termodinámico que describe la fracción de vapor seco presente en una mezcla de vapor-agua. Se define como la relación entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla (líquido + vapor). Un valor de calidad $x=0$ corresponde a líquido saturado, mientras que $x=1$ representa vapor seco saturado. Este parámetro es de gran importancia en aplicaciones industriales, ya que influye directamente en la eficiencia de los procesos de transferencia de calor y en la vida útil de equipos como turbinas, calderas y sistemas de generación de energía.

El calorímetro de estrangulamiento es un dispositivo utilizado para determinar la calidad del vapor mediante el principio de estrangulamiento isoentálpico. En este proceso, el vapor a alta presión proveniente de la caldera pasa a través de una válvula de estrangulamiento o una placa orificio, reduciendo bruscamente su presión hasta alcanzar la presión atmosférica en una cámara de expansión. Durante esta expansión, la entalpía del fluido se conserva ($h_1=h_2$).

Los calentadores tubulares eléctricos son dispositivos ampliamente utilizados en la generación de vapor por su alta eficiencia y seguridad. Están formados por una resistencia eléctrica encapsulada en un tubo metálico que asegura la transferencia de calor directa al agua contenida en la caldera. Gracias a su diseño compacto y robusto, permiten soportar altas temperaturas y presiones, garantizando un calentamiento uniforme del fluido.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO:

Figura 1. Dibujo esquemático de calorímetro de estrangulamiento modificado.



El aparato ilustrado consiste esencialmente en incorporado un calentador eléctrico ubicado aguas arriba del orificio, cuya función es asegurar que el vapor descargado en la cámara de expansión llegue en condición de sobrecalentamiento, requisito indispensable para aplicar el método de estrangulamiento. La presencia del calentador implica un aumento de energía en la muestra, de manera que la entalpía justo antes del orificio $h_{1,orif}$ se expresa como:

$$h_{1,orif} = h_{toma} + \frac{\dot{Q}_{cal}}{\dot{m}} \quad 1$$

Donde h_{toma} representa la entalpía de la muestra extraída de la línea principal en el punto de muestreo, $\dot{Q}_{cal}$ corresponde al calor suministrado por la resistencia eléctrica, y $\dot{m}$ es el flujo másico que atraviesa el sistema. Como consecuencia del estrangulamiento, se cumple que la entalpía en la cámara de expansión es igual a la entalpía de entrada al orificio:

$$h_2 = h_{1,orif} \quad 2$$

Esto permite expresar la entalpía de la toma en función de la entalpía medida en la cámara y la energía añadida por el calentador:

$$h_{toma} = h_2 - \frac{\dot{Q}_{cal}}{\dot{m}} \quad 3$$

El valor de h_2 se obtiene a partir de la medición experimental de la temperatura en la cámara, considerando que la presión en ese punto es aproximadamente atmosférica ($P_2 \approx 1 \text{ bar}$). Con estas dos variables se consulta en las tablas de propiedades del vapor para determinar la entalpía correspondiente al estado de sobrecalentamiento.

Una vez conocido h_{toma} , se calcula la calidad del vapor comparando con las propiedades de saturación a la presión de la línea principal P_1 :

$$x = \frac{h_{toma} - h_f(P_1)}{h_{fg}(P_1)} \quad 4$$

Donde $h_f(P_1)$ es la entalpía del líquido saturado y $h_{fg}(P_1)$ el calor latente de vaporización en la presión P_1 .

TOMA DE DATOS

Datos experimentales acorde a la potencia del resistor

Potencia del resistor (kW)	Presión 1 (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (	Calidad de vapor
0				
0.5				
1				
1.5				

2				
2.5				
3				

PROCESAMIENTO DE DATOS

Para procesar los datos se debe obtener las entalpías en función de las mediciones realizadas, revisando en las tablas termodinámicas.

Se debe de calcular la calidad de vapor para cada planteado de potencia de resistencia eléctrica.

RESULTADOS

- Presentar gráfica de potencia de resistor vs calidad de vapor.
- Calcular la calidad de vapor.
- Describir la diferencia entre el vapor de la calidad de vapor en cada escenario

DISCUSIÓN

Tener en cuenta que efectos físicos pueden afectar la medición, justificar las variaciones entre los resultados y porqué consideran que varía poco o mucho según los resultados obtenidos.

ANEXO E: TABLAS TERMODINÁMICAS

914

TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas (conclusión)

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Las tablas A-4 a A-8 fueron generadas utilizando el programa para resolver ecuaciones de ingeniería (EES) desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. La rutina utilizada en los cálculos es la altamente precisa Steam_IAPWS, que incorpora la Formulación 1995 para las Propiedades Termodinámicas de la Sustancia Agua Ordinaria para Uso Científico y General, editada por The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). Esta formulación reemplaza a la formulación de 1984 de Haar, Gallagher y Kell (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), la cual está también disponible en EES como la rutina STEAM. La nueva formulación se basa en las correlaciones de Saul y Wagner (J. Phys. Chem. Ref. Data, 16, 893, 1987) con modificaciones para ajustarla a la Escala Internacional de Temperaturas de 1990. Las modificaciones están descritas por Wagner y Pruss (J. Phys. Chem. Ref. Data, 22, 783, 1993). Las propiedades del hielo están basadas en Hyland y Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H_2O from 173.15 K a 473.15 K", *ASHRAE Trans.*, Part 2A, Paper 2793, 1983.

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)

Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)*}$					$P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61°C)}$			
Sat. [†]	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
$P = 0.20 \text{ MPa (120.21°C)}$					$P = 0.30 \text{ MPa (133.52°C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61°C)}$			
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
$P = 0.50 \text{ MPa (151.83°C)}$					$P = 0.60 \text{ MPa (158.83°C)}$				$P = 0.80 \text{ MPa (170.41°C)}$			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

*La temperatura entre paréntesis es la temperatura de saturación a la presión especificada.

† Propiedades del vapor saturado a la presión especificada.

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K		
$P = 1.00 \text{ MPa (179.88 °C)}$					$P = 1.20 \text{ MPa (187.96 °C)}$					$P = 1.40 \text{ MPa (195.04 °C)}$				
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675		
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975		
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488		
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553		
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379		
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046		
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047		
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730		
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183		
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458		
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587		
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595		
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497		
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308		
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036		
$P = 1.60 \text{ MPa (201.37 °C)}$					$P = 1.80 \text{ MPa (207.11 °C)}$					$P = 2.00 \text{ MPa (212.38 °C)}$				
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390		
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160		
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475		
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684		
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583		
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292		
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337		
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043		
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509		
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791		
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925		
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936		
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842		
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654		
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384		
$P = 2.50 \text{ MPa (223.95 °C)}$					$P = 3.00 \text{ MPa (233.85 °C)}$					$P = 3.50 \text{ MPa (242.56 °C)}$				
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244		
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629										
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764		
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484		
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601		
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428		
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074		
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593		
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357		
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855		
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156		
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304		
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324		
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236		
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053		
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786		

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K		
$P = 4.0 \text{ MPa (250.35 °C)}$					$P = 4.5 \text{ MPa (257.44 °C)}$					$P = 5.0 \text{ MPa (263.94 °C)}$				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737		
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571		
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111		
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516		
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483		
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210		
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781		
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605		
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136		
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458		
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619		
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648		
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566		
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388		
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124		
$P = 6.0 \text{ MPa (275.59 °C)}$					$P = 7.0 \text{ MPa (285.83 °C)}$					$P = 8.0 \text{ MPa (295.01 °C)}$				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450		
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937		
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321		
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658		
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579		
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266		
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800		
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221		
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822		
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185		
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372		
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419		
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350		
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181		
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925		
$P = 9.0 \text{ MPa (303.35 °C)}$					$P = 10.0 \text{ MPa (311.00 °C)}$					$P = 12.5 \text{ MPa (327.81 °C)}$				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638		
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596						
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130		
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433		
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749		
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651		
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317		
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828		
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227		
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540		
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967		
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195		
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269		
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220		
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065		
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819		

ANEXO F: PLANO DE CALORÍMETRO

