

Diseño y construcción de un banco de calorimetría para la determinación experimental del poder calorífico superior en gases combustibles, vinculado al Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Millos Julián Enrique Jinete Torres y Nicole Dayanna Castelblanco Sarmiento

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Diego Luis Franco Jácome

Doctor en Ingeniería Mecánica

Codirector

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

A Dios por darnos la oportunidad de culminar esta carrera, por extendernos las alas y poner convicción en nuestros corazones para trabajar por nuestros sueños.

A Diego Luis Franco Jácome por orientarnos y animarnos durante todo el proceso de diseño, preparación y ejecución del proyecto.

A Yesid Javier Rueda Ordoñez por ser el apoyo fundamental en la gestión de recursos para la construcción del proyecto.

A Johanna Sofía Maldonado Villamizar por ser incondicional con su apoyo en cada detalle para poder cumplir con los requerimientos de los procesos administrativos que se hicieron necesarios.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por creer en este proyecto que sabemos será de ayuda para futuros Estudiantes.

A quienes por olvido involuntario no hemos puesto en estas líneas, MUCHAS GRACIAS.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco teórico	16
2.1 Combustibles gaseosos	16
2.1.1 Propiedades de los combustibles gaseosos	17
2.2 Poder calorífico	17
2.3 Calorimetría	18
2.4 Alternativas de diseño de un calorímetro Junkers.	21
2.4.1 Subsistemas para el diseño del calorímetro de Junkers	22
3. Metodología	25
3.1 Diseño del dispositivo funcional.....	25
3.1.1 Dimensionamiento: análisis térmico.....	27
3.1.2 Criterios de diseño del intercambiador de calor	56
3.1.3 Selección de materiales y accesorios	59
3.1.4 Planos del sistema.....	66
3.2 Fabricación y montaje.....	68
3.2.1 Sistema del intercambiador de calor.....	68
3.2.2 Sistema de alimentación de agua.....	73
3.2.3 Sistema de suministro de gas.....	75

3.2.4 Sistema estructural.....	76
3.2.5 Sistema de recolección de datos.....	77
3.3 Metodología de pruebas.....	78
4. Resultados y discusiones.....	81
5. Conclusiones.....	85
6. Recomendaciones.....	86
Referencias Bibliográficas.....	88
Anexos.....	90

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de los combustibles gaseosos relevantes. Valores Adaptados de (Cengel Y. A, 2014)	18
Tabla 2. Composición del gas natural según Vanti Gas Oriente.	29
Tabla 3. Selección de materiales principales.	59
Tabla 4. Accesorios para la conexión del serpentín a la entrada y salida del agua.	60
Tabla 5. Accesorios para la conexión de las termocuplas a las Tee.	60
Tabla 6. Accesorios para la recolección del condensado.....	61
Tabla 7. Accesorios para la conexión de la salida de los gases de combustión.....	62
Tabla 8. Accesorios para garantizar la hermeticidad del equipo.	62
Tabla 9. Accesorios para el sistema hidráulico.....	63
Tabla 10. Accesorios para el sistema estructural del equipo.	64
Tabla 11. Accesorios para el sistema de medición de temperaturas.....	65
Tabla 12. Resultados del poder calorífico superior del gas natural.	82
Tabla 13. Presupuesto del proyecto.	83

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Bomba calorimétrica.	20
Figura 2. Calorímetro de Junkers.....	21
Figura 3. Subsistemas del calorímetro de Junkers. Adaptado de (Rebolledo, 2008).....	22
Figura 4. Representación de las dimensiones del intercambiador de calor.	25
Figura 5. Diagrama de flujo del desarrollo metodológico.	27
Figura 6. Diagrama de flujo del análisis térmico.....	28
Figura 7. Modelo de análisis de la cámara de combustión.	30
Figura 8. Formas de transferencia de calor en el calorímetro de Junkers.....	35
Figura 9. Velocidad de flujo a través del banco de tubos.	39
Figura 10. Representación de entrada y salida de los fluidos de trabajo del intercambiador.	46
Figura 11. Diagrama del cálculo del serpentín.	49
Figura 12. Representación del análisis térmico de una espira del serpentín.....	50
Figura 13. Representación de la espira cerrada y abierta.....	52
Figura 14. Comportamiento de la temperatura del gas a lo largo del intercambiador.....	55
Figura 15. Disposición de alternativas de intercambiadores de calor. La alternativa a) es adaptada de (Rebolledo, 2008).....	58
Figura 16. Renderizado en vista isométrica del calorímetro.....	66
Figura 17. Plano vista explosionada conjunto general calorímetro.	67
Figura 18. Proceso de fabricación del serpentín.	69
Figura 19. Cilindro interior y exterior del intercambiador de calor.....	70
Figura 20. Cilindro externo y accesorios.	71

Figura 21. Arreglo para la recolección del condensado.....	71
Figura 22. Montaje de accesorios para salida de gases combustión.....	72
Figura 23. Arreglo de las termocuplas utilizadas en el equipo.....	72
Figura 24. Conexión para la entrada y la salida del agua al intercambiador de calor.....	73
Figura 25. Arreglo de las termocuplas utilizadas en el equipo.....	73
Figura 26. Conexiones presentes en los vasos de precipitado.....	74
Figura 27. Sistema de bombeo de agua del equipo.....	74
Figura 28. Conexiones rápidas de mangueras.....	75
Figura 29. Conexión suministro de gas.....	76
Figura 30. Base estructural del calorímetro de Junkers.....	77
Figura 31. Disposición para la toma de datos.....	77
Figura 32. Diferencia de alturas entre los vasos de precipitado.....	79
Figura 33. Flujo volumétrico gas natural.....	80
Figura 34. Apertura válvula reguladora de gases producto de la combustión.....	80
Figura 35. Comportamiento temperatura del agua a la entrada y salida del calorímetro, en una prueba de laboratorio.....	81
Figura 36. Representación gráfica de las mediciones de temperaturas en el calorímetro.....	82

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Planos del intercambiador de calor.	90
Anexo B. Código en Python utilizado para el análisis térmico y el dimensionamiento del dispositivo funcional.	114
Anexo C. Estructura de las competencias educativas de materias afines al dispositivo con el fin de apoyar el aprendizaje experimental	124
Anexo D. Manual de operación	133

Resumen

Título: diseño y construcción de un banco de calorimetría para la determinación experimental del poder calorífico superior en gases combustibles, vinculado al Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Autor: Millos Julián Enrique Jinete Torres y Nicole Dayanna Castelblanco Sarmiento.

Palabras Clave: diseño, calorimetría, poder calorífico.

Descripción: El presente proyecto expone el diseño y la construcción de un banco de calorimetría con enfoque pedagógico, específicamente para la medición del poder calorífico del gas natural utilizando el calorímetro de Junkers. Principalmente, se desarrolló en función de lograr mejorar el aprendizaje experimental de los estudiantes a través de un banco que les permitiera consolidar los conocimientos adquiridos en las cátedras. Con este propósito en mente, se realizaron diversas adaptaciones en el diseño del banco, de manera que fuese accesible, fácil de manipular y al mismo tiempo tuviese un sistema controlado para medir el poder calorífico del gas natural. Además, se identificaron las competencias educativas requeridas en cada estudiante durante todo el proceso de formación como ingenieros mecánicos para lograr comprender el funcionamiento del calorímetro de Junkers. Todo esto, con el fin de brindar a los estudiantes una herramienta de alta calidad para el desarrollo de sus habilidades prácticas en el campo de la termodinámica. El análisis de resultados permitió demostrar que es posible diseñar y construir un banco con mediciones confiables y coherentes dentro de un margen de error para afianzar el aprendizaje experimental de los estudiantes con un presupuesto reducido. Inicialmente un banco con un enfoque pedagógico el cual con una instrumentación más sofisticada se puede convertir en un equipo para la caracterización de gases combustibles. Se recomienda para futuros trabajos con el banco mejorar la instrumentación para la regulación del flujo volumétrico de gas natural.

Abstract

Title: *design and construction of a calorimetry bench for the experimental determination of the gross calorific value of fuel gases, linked to the Combustion Laboratory of the School of Mechanical Engineering.*

Author(s): Millos Julián Enrique Jinete Torres and Nicole Dayanna Castelblanco Sarmiento.

Key Words: *design, calorimetry, calorific value.*

Description: *This project describes the design and construction of a calorimetry bench with a pedagogical approach, specifically for the measurement of the calorific value of natural gas using the Junkers calorimeter. Mainly, it was developed in order to improve the experimental learning of students through a bench that would allow them to consolidate the knowledge acquired in the lectures. With this purpose in mind, several adaptations were made to the design of the bench, so that it would be accessible, easy to manipulate and at the same time have a controlled system to measure the calorific value of natural gas. In addition, the educational competencies required of each student during the entire training process as mechanical engineers were identified in order to understand the operation of the Junkers calorimeter. All this, in order to provide students with a high quality tool for the development of their practical skills in the field of thermodynamics. The analysis of results showed that it is possible to design and build a bench with reliable and consistent measurements within a margin of error to strengthen the experimental learning of students with a reduced budget. Initially a bench with a pedagogical approach which with more sophisticated instrumentation can be converted into an equipment for the characterization of combustible gases. It is recommended for future work with the bench to improve the instrumentation for the regulation of the volumetric flow of natural gas.*

Introducción

El sistema educativo superior nacional debe permitir acceso a herramientas y métodos de formación que faciliten el desarrollo de las competencias necesarias en el mundo moderno. Los procesos de aprendizaje son estimulados cuando las aulas proporcionan un complemento práctico que valide los conceptos teóricos. Puesto que la información actualmente está democratizada y es asequible en internet; las instituciones educativas se plantean nuevos retos para estar a la vanguardia de esta carrera de formación actual. Es importante que durante el aprendizaje las aulas proporcionen un complemento práctico que acredite los fundamentos teóricos.

Un ejemplo de este concepto es el desarrollado por la escuela de diseño *d.School* en la Universidad de Stanford, cuyo objetivo se enfoca en teorizar menos y actuar más. Esta perspectiva permitió desarrollar el concepto de “*Design Thinking*”, una metodología de diseño para generar ideas innovadoras para la solución de problemas reales de los usuarios. (Kembel, 2005)

El modelo pedagógico tradicionalista se basa en transferir a los estudiantes el contenido mediante clases magistrales y evaluar los conocimientos por medio de exámenes. Este método se considera obsoleto en los procesos formación profesional, ya que las transformaciones tecnológicas están avanzando tan rápidamente que los retos o desafíos derivados requieren de otro tipo de competencias que permitan reaccionar rápidamente ante este nuevo contexto. (Menárguez, 2016)

Es importante dentro del modelo pedagógico de la escuela de Ingeniería Mecánica, modificar la formación tradicional enfocada en impartir conocimiento teórico mediante clases magistrales, hacia un método de enseñanza que esté orientado en desarrollar habilidades prácticas,

aprender su componente teórico y diseñar soluciones. Por lo tanto, se busca complementar la manera de aprender de los estudiantes, con el fin de que, vean el funcionamiento real de algunos sistemas térmicos y cómo se aplica lo aprendido.

Las ciencias térmicas hacen parte de una de las ramas principales de la formación como Ingenieros Mecánicos. Esta área se enfoca en la comprensión de las transformaciones energéticas, principalmente como consecuencia de la transferencia de calor y del transporte de fluidos. Esta rama de la ingeniería tiene numerosas aplicaciones industriales como: sistemas de calefacción, generación de energía, sistemas de refrigeración, producción de alimentos, etc.

En la historia de la ciencia térmica, el calorímetro tuvo un rol fundamental, una vez que este instrumento fue utilizado para comprender cómo ocurrían las transformaciones de energía en diferentes sustancias. Mediante un experimento simple se logró determinar el calor transferido entre cuerpos y a partir de esto se empezaron a determinar nuevas propiedades de las sustancias como: capacidad calorífica, entalpía, poder calorífico, entre otros. Un ejemplo de ellos fue el desarrollo del calorímetro de hielo por Antoine Lavoiser y Pierre Laplace, quienes lo utilizaron para comprobar las teorías desarrolladas por Joseph Black sobre la energía latente y calor específico de los cuerpos.

Los calorímetros son regularmente utilizados en espacios educativos como laboratorios de investigación o laboratorios didácticos. De igual manera suelen encontrarse en la industria como dispositivos para llevar a cabo la inspección de la calidad de productos y procesos de distintos elementos.

A continuación, se presentan varios enfoques del uso de estos equipos en los diferentes entornos educativos.

A nivel global, la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza en la Universidad Nacional Autónoma de México, poseen un laboratorio de ciencias básicas II para Ingenierías, en donde sus estudiantes tienen la posibilidad de realizar experimentos con un calorímetro para la determinación del equilibrio térmico en fluidos. (Zamora, 2018)

En el entorno nacional, la Universidad Autónoma de Occidente en Cali, cuenta con un laboratorio de análisis térmico, en donde trabajan con un calorímetro de barrido diferencial DSCQ2000. Este instrumento permite medir una amplia variedad de propiedades durante transiciones y eventos que ocurren en un material en función de su temperatura. Además, unen esfuerzos con otras universidades como la del Valle, Icesi, Distrital de Bogotá para desarrollar proyectos y convenios que implementan actividades en el laboratorio y permiten que los resultados sean usados en Brasil y Suecia por estudiantes de doctorado. (Ciencia y medio ambiente, 2014)

En el área de Bucaramanga, la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, tiene un calorímetro, el cual, permite tener la experiencia práctica para la determinación de las propiedades físicas del material y propiamente la cantidad de calor que se transmite o libera a un cuerpo o sustancia, y así validar los conceptos teóricos. Este equipo facilita a los estudiantes desarrollar proyectos de investigación y propuestas de tesis, además de prácticas de laboratorio.

En la Escuela de Ingeniería Mecánica, particularmente en el Laboratorio de Combustión existe el interés de desarrollar un dispositivo funcional que permita cuantificar el poder calorífico superior en diferentes combustibles. Dado que en el momento no existen calorímetros que permitan realizar estos cálculos, es por ellos que en este trabajo se propone el diseño y construcción de un banco de calorimetría para la determinación del poder calorífico superior en gases

combustibles, que permita complementar los conocimientos vistos en asignaturas como Termodinámica, Transferencia de Calor y Combustión Industrial.

Existen diferentes diseños de calorímetros para el estudio del poder calorífico en gases, entre sus elementos más importantes se encuentra: el suministro de oxígeno, termómetro, agitador, aislante, calentador, cubo y los cables de ignición. A partir de esto se propone realizar una investigación detallada y rigurosa para determinar: **¿cuáles deben ser los componentes del calorímetro con el fin de que determinen experimentalmente el poder calorífico superior en gases combustibles y mejoren el aprendizaje práctico?**

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Generar un dispositivo funcional para la medición de poder calorífico superior (PCS) del gas natural basado en la calorimetría de Junkers.

1.2 Objetivos Específicos

Dimensionar los elementos que constituyen los sistemas y subsistemas del calorímetro por medio de la teoría del diseño de elementos mecánicos y sistemas térmicos.

Comprobar el funcionamiento de los sistemas y subsistemas dimensionados a través de la construcción y puesta en marcha del calorímetro.

Validar el funcionamiento del calorímetro a través de la determinación del porcentaje de error experimental en la medida del PCS.

Estructurar las competencias educativas de materias afines al dispositivo con el fin de apoyar el aprendizaje experimental.

2. Marco teórico

2.1 Combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos son aquellos que se presentan en estado gaseoso a temperatura y presión ambiente. Estos gases combustibles se pueden clasificar según su formación u origen en: fósiles o renovables. En el caso de los combustibles de origen fósil, estos se pueden adquirir ya sea de reservas subterráneas (yacimientos gasíferos) o como subproducto de procesos de extracción y refinación del petróleo. Estos combustibles están compuestos principalmente por hidrocarburos, tales como metano (CH_4), propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}).

Por otro lado, también podemos encontrar los combustibles gaseosos de origen renovable. El biogás es una mezcla compuesta principalmente por metano que se deriva del proceso de biodigestión anaerobia de residuos orgánicos (agrícolas, pecuarios o urbanos). Esta mezcla gaseosa está compuesta principalmente de metano (CH_4) cuyos valores pueden oscilar entre 40 y 70%. (Instituto de investigación de zonas desérticas, 2012). Otro gas combustible de gran relevancia es el hidrógeno, que se puede obtener de la electrolisis del agua (hidrógeno verde) o del reformado de hidrocarburos como el gas natural (hidrógeno azul). (Irena, 2011)

Los combustibles gaseosos independientemente de su origen son utilizados en una variedad de aplicaciones, como la generación de electricidad, calefacción, refrigeración, y como combustibles para vehículos, etc. La importancia de los combustibles gaseosos radica en su alta eficiencia energética, facilidad de transporte, y también porque son considerados combustibles de transición, ya que su contribución a la reducción de emisiones y contaminación en comparación con otros combustibles fósiles como el carbón y el petróleo es menor. (Gas natural y medio ambiente, 2015)

2.1.1 Propiedades de los combustibles gaseosos

Cada tipo de gas tiene sus propias características y propiedades específicas que los hacen únicos y adecuados para diferentes usos y aplicaciones. Algunas de las propiedades características de los gases combustibles se describen a continuación:

Inflamabilidad: los gases son inflamables y pueden arder en presencia de una fuente de ignición, como una chispa o una llama.

Bajo punto de ebullición: los combustibles gaseosos tienen un bajo punto de ebullición, lo que significa que se convierten en gas a temperatura ambiente y presión atmosférica.

Baja densidad: los gases tienen una baja densidad en comparación con los líquidos y sólidos. Esto los hace más fáciles de transportar y almacenar.

Compresibilidad: los gases son altamente compresibles y pueden reducir su volumen significativamente cuando se someten a presión.

Poder calorífico: es una medida de la cantidad de energía que se puede obtener a partir de la combustión completa de una sustancia de masa unitaria.

En la Tabla 1 se presentan algunas de las propiedades de los combustibles gaseosos previamente mencionados.

2.2 Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible o sustancia, es la cantidad de energía liberada (por unidad de masa) en la reacción de combustión completa, considerando condiciones normales de presión y temperatura (25°C y 1atm) en los reactivos y productos. Esta energía se puede clasificar en poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico inferior (PCI), dependiendo si se considera la condensación del vapor de agua en los productos de la combustión.

Cuando el vapor de agua en los productos se considera en la fase gaseosa (no hay condensación) se hace referencia al PCI. Por otro lado, si se consideran la condensación y el agua se considera en la fase condensada, se hace referencia al PCS.

Las unidades más usuales para medir el poder calorífico, son: kcal/kg; kcal/m³; BTU/lb; BTU/pe³.

El PCS es una propiedad que se puede determinar experimentalmente mediante instrumentos llamados calorímetros, que pueden diferir en su diseño dependiendo la condición física del combustible (sólido, líquido o gaseoso).

Tabla 1. Propiedades de los combustibles gaseosos relevantes. Valores Adaptados de (Cengel Y. A, 2014)

Combustible gaseoso	Fórmula química	Densidad estándar [Kg/m ³]	Peso molecular [Kg/mol]	Temperatura de ebullición [K]	PCS [MJ/Kg]	PCI [MJ/Kg]
Metano	CH ₄	0,717	0,01604	111,5	55,5	50
Propano	C ₃ H ₈	1,88	0,0441	231	46,4	46,3
Butano	C ₄ H ₁₀	2,48	0,05812	273,3	45,8	45,6
Gas Natural	CH ₄ + C ₂ H ₆ + C ₃ H ₈ + C ₄ H ₁₀ + N ₂ + CO ₂	0,75 - 0,85	0,016 - 0,020	111,6 - 160,2	49 - 55	40 - 48
GLP	C ₃ H ₈ + C ₄ H ₁₀ + C ₂ H ₆	1,85 - 2,05	0,044 - 0,058	231,1 - 273,3	46 - 49	46 - 48
Biogas	CH ₄ + CO ₂ + otros gases	0,6 - 1,2	0,016 - 0,020	111,6 - 160,2	20 - 25	16 - 20
Hidrogeno	H ₂	0,0899	0,0202	20,3	141,8	120,1

Nota: Los valores presentados en la Tabla 1 de los combustibles como el gas natural, GLP y biogás, varían dependiendo de su composición exacta.

2.3 Calorimetría

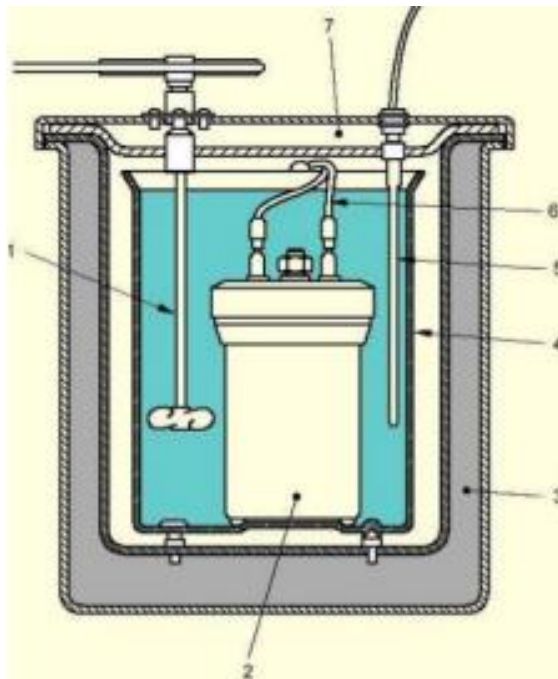
La calorimetría es una rama de la ciencia que estudia el intercambio de calor en diferentes procesos o fenómenos, mediante un instrumento denominado calorímetro, que tiene la capacidad de cuantificar energía del sistema. (Gonzales J, 2021)

Es por este motivo que los calorímetros han contribuido a comprender los fundamentos de la ciencia térmica, así como la determinación de propiedades características de las sustancias puras como: poder calorífico, calores específicos, energías de cambio de fase (latentes), etc.

Dado que los calorímetros pueden ser usados para diferentes fines, existe una gran variedad de tecnologías que han sido desarrolladas y que se podrían clasificar de acuerdo al tipo de sustancia a evaluar (sólido, líquido o gas) y según el tipo de parámetro por determinar (poder calorífico, calor específico, transformaciones de fase, etc). En el mercado para cada uno de ellos existe una amplia gama de posibilidades que pueden variar según su calidad, precio o durabilidad.

El calorímetro más utilizado para determinar el poder calorífico de un combustibles sólidos o líquidos es la bomba calorimetría. En este instrumento la reacción tiene lugar en un recipiente de acero resistente (bomba), el cual se sumerge en un recipiente lleno de agua, como se puede observar en la Figura 1. La bomba calorimétrica consta de: un agitador eléctrico (1), el mini reactor (bomba) (2), la camisa aislante que contiene agua para evitar pérdidas de calor (3), el balde adiabático (4), que contiene al mini reactor y una masa de agua, un termómetro diferencial (5), un cable de ignición (6) y la tapa (7).

Una vez que la muestra de combustible se ha colocado en el interior de la bomba, un pulso de corriente genera el encendido del combustible liberando su energía química. Esta energía liberada es posteriormente transferida al agua circundante, cuya masa es grande (gran inercia), y por lo tanto genera pequeños cambios de temperatura. Dado que los cambios de masa en el agua son comúnmente del orden de 3 a 5 grados, se asume que el estado final e inicial del sistema termodinámico permanecen constantes.

Figura 1. Bomba calorimétrica.

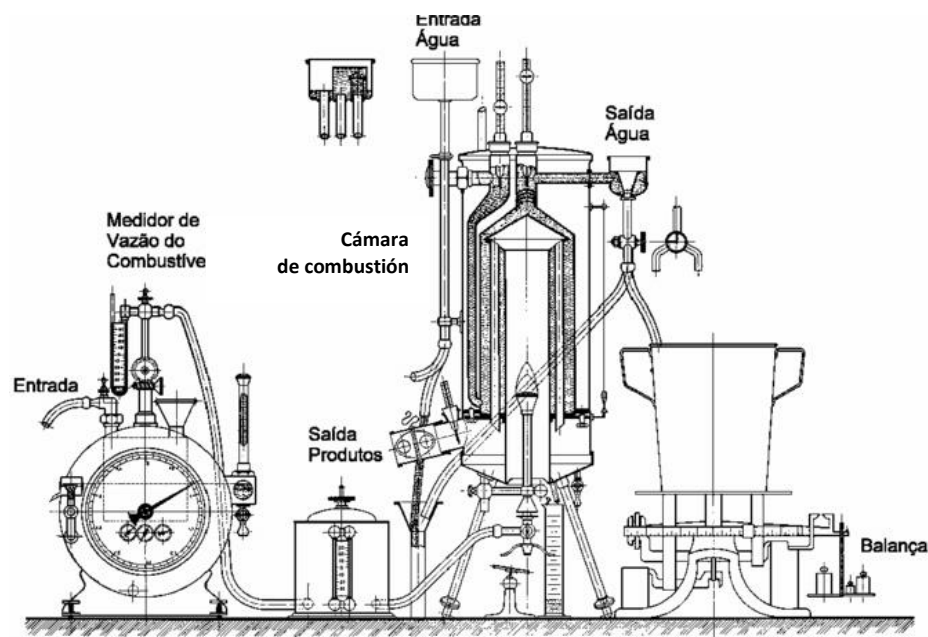
Nota: Representación gráfica de la bomba calorimétrica. Adaptado de (Universidad Tecnológica Nacional, 2016)

Cuando se trata de determinar el poder calorífico superior de combustibles gaseosos, el calorímetro de flujo constante de Junkers es uno de los equipos de calorimetría más reconocidos, cuya operación se considera como un volumen de control en régimen permanente. Este puede ser utilizado para caracterizar el potencial térmico de una gran variedad de combustibles de uso cotidiano en la industria, como lo son el butano, propano, metano, gas natural, entre otros.

El calorímetro en cuestión está compuesto por una cámara de combustión cilíndrica de doble pared, tal y como se muestra en la Figura 2. En la parte inferior de la cámara, se instala un quemador a gas. El cilindro interior de la estructura permite que los gases producidos por la combustión fluyan a través de su sección interna, para después pasar al espacio anular formado por la doble pared. En este espacio, los gases transfieren su energía térmica a un flujo de agua que circula por tubos dispuestos vertical u horizontalmente.

Este sistema requiere, además, de ciertos elementos adicionales, tales como: un medidor y regulador de flujo volumétrico para el combustible, un recipiente para recoger el condensado del agua proveniente de las paredes, un sistema de agua de flujo continuo, y un sistema para medir la temperatura del agua en la entrada y salida de la cámara de combustión y la temperatura a la salida de los gases de combustión. Para ello, se disponen de termocuplas y un termómetro digital.

Figura 2. Calorímetro de Junkers.



Nota: La figura muestra los componentes y funcionamiento del calorímetro de Junkers. Adaptado de (Pinhero P. C, 1999)

2.4 Alternativas de diseño de un calorímetro Junkers.

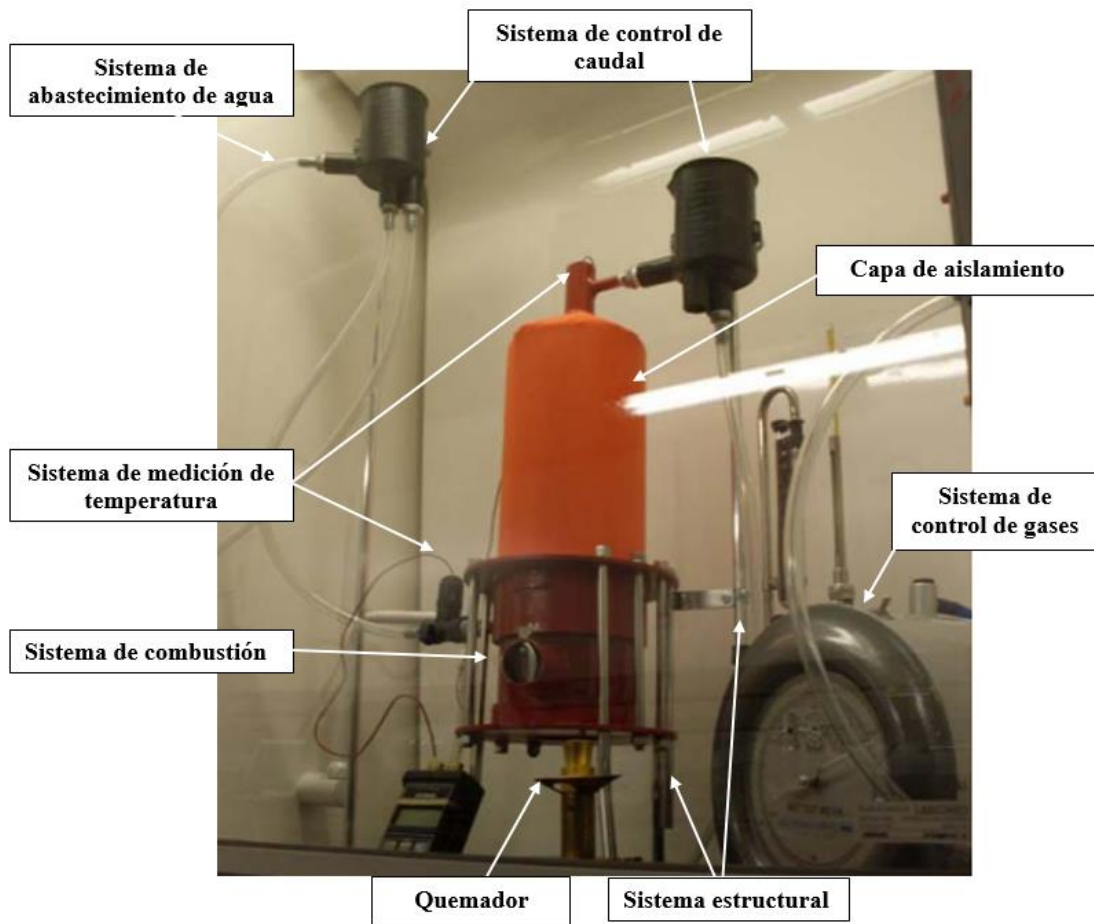
El desarrollo de un banco experimental para la medición del PCS en gases combustibles basado en la calorimetría de Junkers, requiere de la definición de los requerimientos funcionales y no funcionales del dispositivo. Dependiendo de la definición de estos parámetros, es posible que existan diversas alternativas de diseños que se adapten. En este contexto, cada alternativa de diseño tendrá sus propias características físicas, así como sus limitaciones. Para definir cuál es la

alternativa más adecuada, se procede a definir todo el dispositivo como un conjunto de subsistemas que se pueden analizar y diseñar de maneras independientes.

2.4.1 Subsistemas para el diseño del calorímetro de Junkers

En esta sección se definirán los subsistemas que se deben tener en cuenta en el proceso de diseño del dispositivo funcional. En la Figura 3 se etiquetan cada uno de estos subsistemas para ofrecer una visión clara de los mismos.

Figura 3. Subsistemas del calorímetro de Junkers. Adaptado de (Rebolledo, 2008)



Quemador: este subsistema se encarga de quemar el combustible gaseoso en un quemador de forma controlada. El combustible es suministrado por una válvula reguladora de flujo, y la mezcla aire-combustible es ajustada mediante un regulador.

Sistema de combustión: después de la combustión, los gases de escape se enfrían en un intercambiador de calor para garantizar que toda la energía liberada por la combustión se transfiera al agua del calorímetro. El agua circula por un serpentín de acero inoxidable a través del cual los gases de escape pasan.

Sistema de medición de temperatura: el agua en el serpentín se calienta debido a la energía liberada por la combustión. La temperatura del agua se mide antes y después de pasar por el serpentín utilizando termocuplas.

Sistema de control de caudal: el caudal de agua que fluye a través del serpentín se controla mediante el principio de los vasos comunicantes.

Sistema de control de gases: se debe disponer de un flujometro de gases, el cual permitirá graduar el flujo másico que entra al quemador y al mismo tiempo conocer la cantidad del mismo que está circulando por el equipo.

Sistema de abastecimiento de agua: este debe estar disponible durante toda la prueba, es por eso que el equipo debe estar cerca de una fuente de agua constante o ubicar un sistema cerca del equipo.

Capa de aislamiento: para minimizar las pérdidas de calor al medio ambiente, el calorímetro se coloca dentro de una caja de aislamiento que minimiza la transferencia de calor.

Sistema de control y adquisición de datos: Los diferentes subsistemas del calorímetro se controlan y monitorean utilizando una unidad de control. Los datos de temperatura y caudal se adquieren y registran en un sistema de adquisición de datos para su posterior análisis.

Sistema estructural: es aquel que garantiza la estabilidad del equipo en general, se comprende de la base para el calorímetro en sí y los apoyos para el sistema de control de caudal.

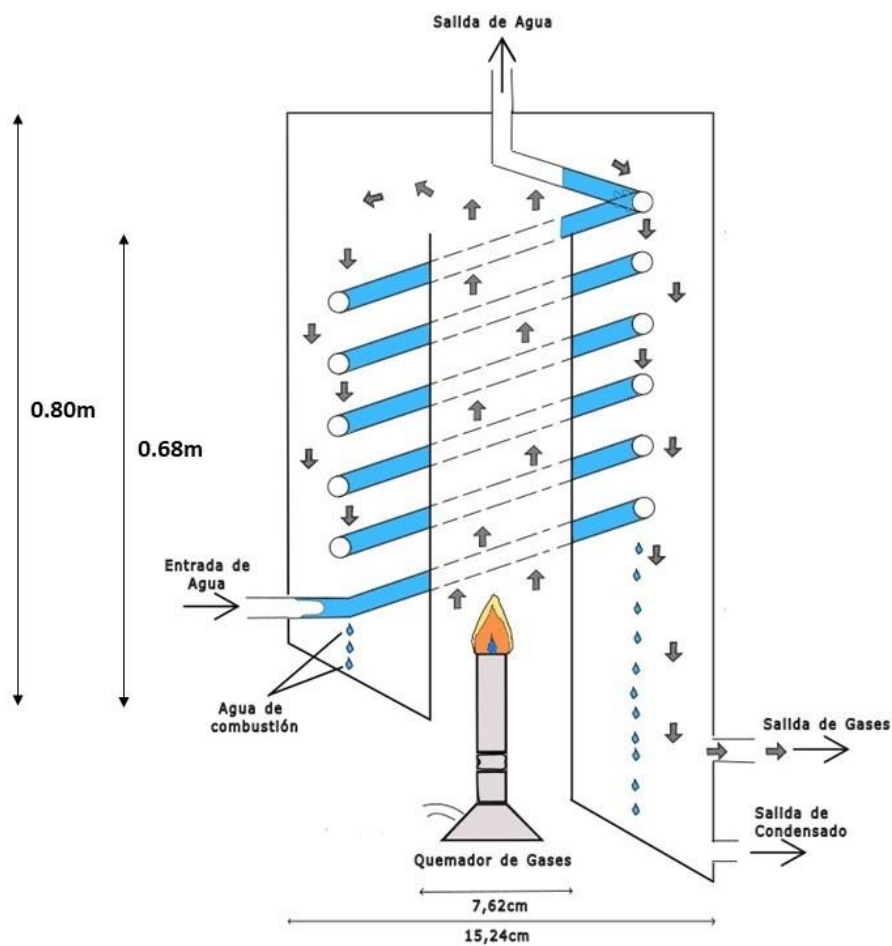
Es importante conocer las propiedades de los combustibles gaseosos y las características del calorímetro de flujo de Junkers para realizar un diseño eficiente y preciso del mismo. Permitiendo seleccionar y dimensionar cada uno de los componentes de los subsistemas, materiales y accesorios que cumpla con los requerimientos para la aplicación específica.

3. Metodología

3.1 Diseño del dispositivo funcional.

La figura que se presenta a continuación es el diseño del intercambiador de calor, producto del dimensionamiento mediante el análisis térmico, el cual, se explicara seguidamente.

Figura 4. Representación de las dimensiones del intercambiador de calor.



En el diagrama de flujo presentado en la Figura 5, se encuentra procedimiento metodológico implementado en este proyecto.

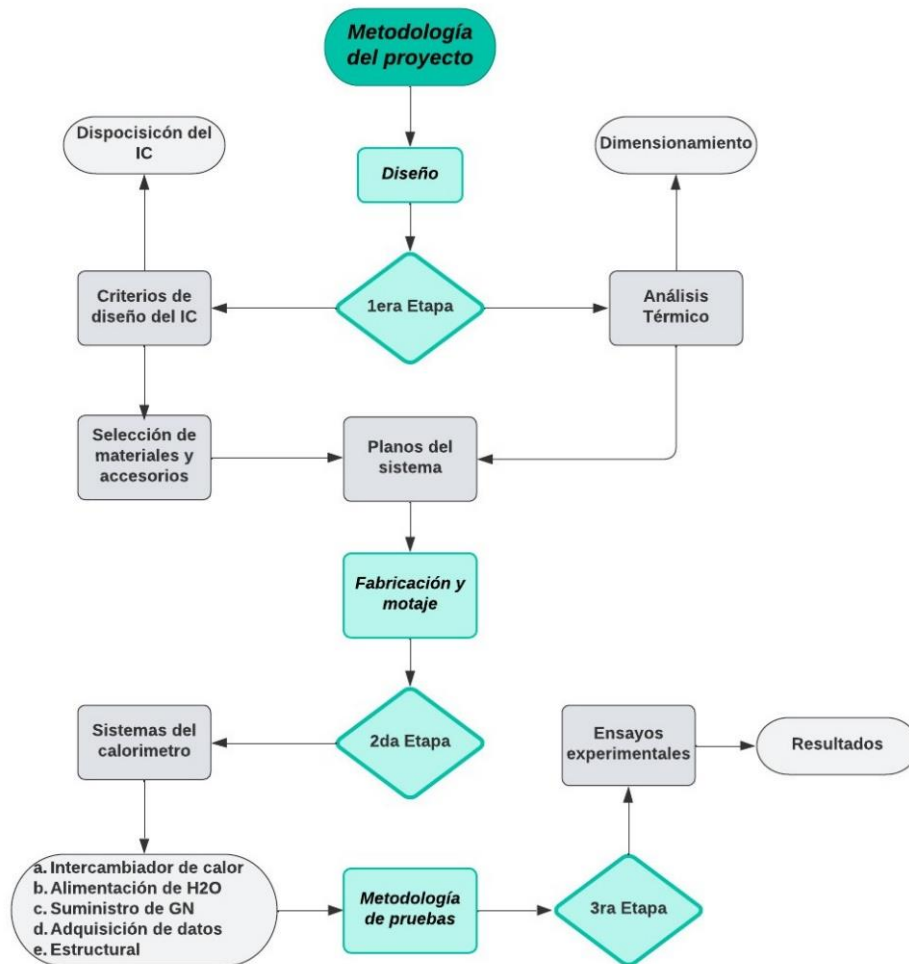
La primera etapa consistió en un proceso de diseño, el cual se dividió en 3 secciones. Inicialmente se desarrollan en paralelo dos actividades: definición de los criterios de diseño y el análisis térmico del intercambiador, lo que permitió obtener la disposición del intercambiador y su dimensionamiento, respectivamente.

Una vez dimensionada el área de intercambio de calor y definida la disposición geométrica del intercambiador, se realizó la selección de materiales y accesorios adicionales que contribuyen el sistema. Con estos elementos ya definidos, se realizan los planos del dispositivo funcional.

Finalizado el proceso de diseño, se procedió con la segunda etapa de fabricación, montaje y puesta en marcha del sistema.

Finalmente, cuando el banco ya se encontraba instalado en el laboratorio y funcional, se continuó con la tercera etapa del proceso, que se enfocó en definir la metodología de pruebas y realización de experimentos. En esta etapa se estableció el protocolo de operación durante las pruebas, en donde se definieron las variables independientes del proceso: flujo másico de agua, flujo másico de gas natural, etc. El proceso de verificación se concluyó con los ensayos experimentales en el calorímetro (dispositivo funcional).

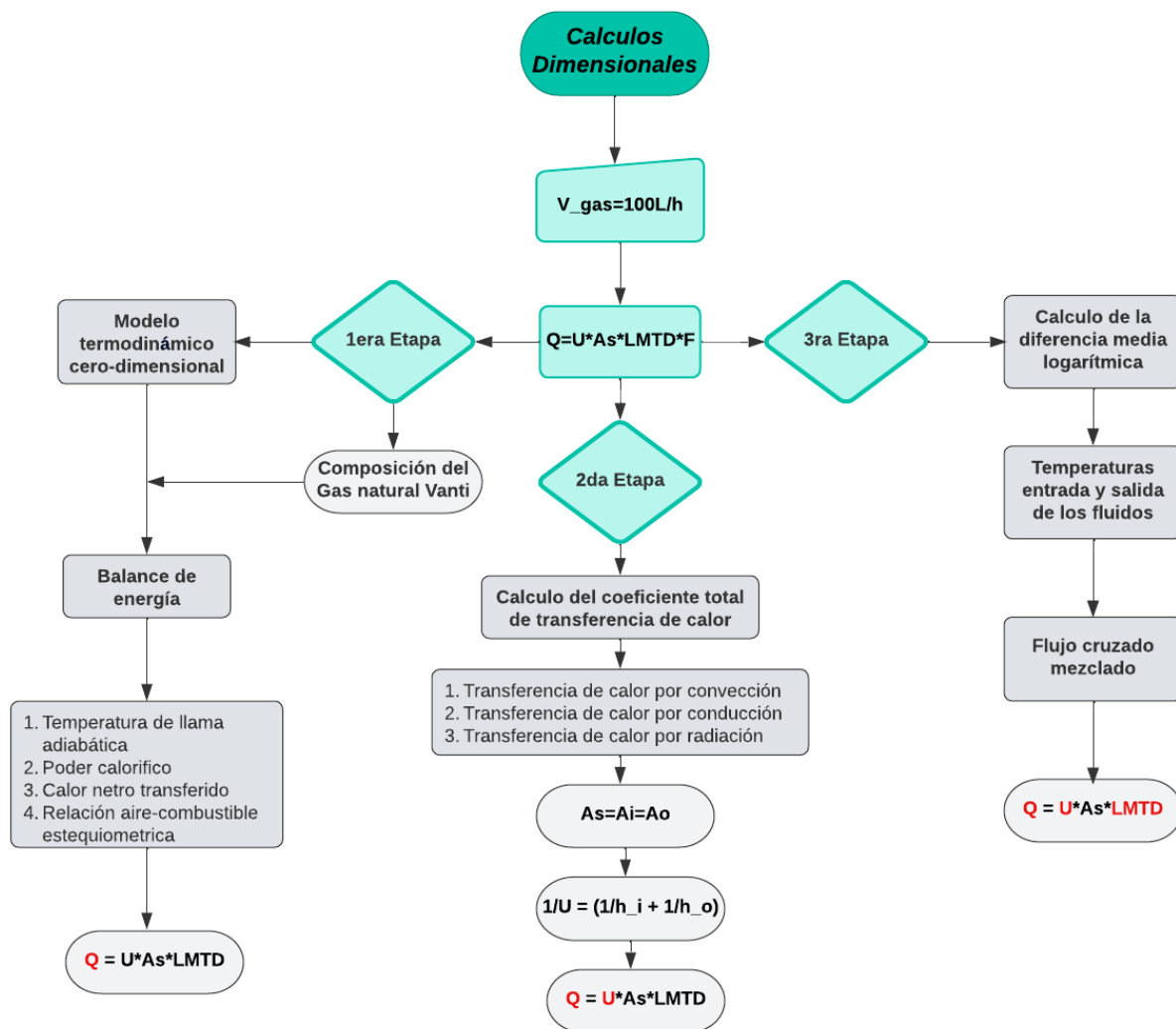
Figura 5. Diagrama de flujo del desarrollo metodológico.



3.1.1 Dimensionamiento: análisis térmico

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 6, se encuentra procedimiento de los cálculos dimensionales que se realizaron para el diseño del calorímetro.

Figura 6. Diagrama de flujo del análisis térmico.



El proceso de dimensionamiento del calorímetro consta de tres etapas, que permiten el desarrollo del diseño de un intercambiador de calor. De manera general, el combustible quemado que entra al sistema (o volumen de control), transfiere su energía térmica a un flujo de agua. En el diseño de intercambiadores de calor mediante el método de la LMTD-F es necesario definir las características de los fluidos en sus terminales de entrada y salida. Es decir, es necesario conocer algunas de sus propiedades como temperaturas, composición, flujo másico, densidad, viscosidad, etc. En el caso particular del calorímetro desarrollado en este trabajo, es necesario definir las

propiedades de los productos de la combustión (fluido caliente) a los cuales se les desea determinar su poder calorífico, y del flujo de agua (fluido frío) que absorbe esta energía.

Las propiedades de los gases de combustión calientes que entran al calorímetro se determinan mediante la aplicación de un modelo termodinámico cero-dimensional. En este modelo se implementará un balance de energía y de masa (estequiometría) en condiciones estacionarias, a partir del cual podemos determinar valores teóricos de la temperatura de llama adiabática, la relación aire-combustible y del poder calorífico superior del gas natural a evaluar.

La composición del gas natural domiciliario utilizado se tomó de la empresa comercializadora Vanti S.A Gas Oriente, ver Tabla 2.

En la Figura 7 se presenta un diagrama esquemático del volumen de control tomado para realizar el análisis termodinámico cero-dimensional en régimen estacionario.

Tabla 2. Composición del gas natural según Vanti Gas Oriente.

Gas	Fórmula	Porcentaje
Metano	CH ₄	81.86
Etano	C ₂ H ₆	11.61
Propano	C ₃ H ₈	1.92
l-Butano	C ₄ H ₁₀	0.23
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0.22
Nitrógeno	N ₂	0.90
Dióxido de carbono	CO ₂	3.18

Figura 7. Modelo de análisis de la cámara de combustión.

A continuación, se presenta la primera etapa que se muestra en la Figura 6, en donde inicialmente se considera la siguiente ecuación:

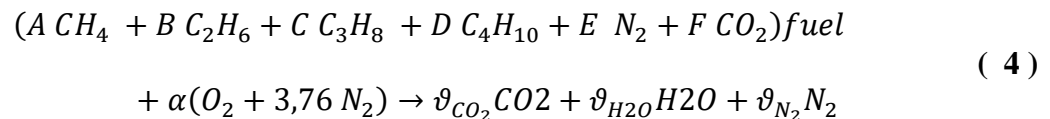
$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (1)$$

De (1) se establece que la energía que entra al sistema es igual a la energía que sale del mismo. Se hace el análisis tomando en consideración que dentro de la cámara de combustión no hay trabajo y solo se tienen en cuenta las entalpías de los gases, debido a que no hay energía cinética ni potencial.

$$\sum \dot{m}h_{in} = \dot{Q}_{out} + \sum \dot{m}h_{out} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{neto} = \sum \dot{m}h_{prod} - \sum \dot{m}h_{react} \quad (3)$$

Para este caso, se realiza la estequiometría del combustible y se calcula el calor neto en base molar a partir del balance estequiométrico ideal.



En la estequiometría se establecen los balances individuales para el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno respectivamente, con el fin de hallar los coeficientes estequiométricos de los productos.

$$C: A + 2 \cdot B + 3 \cdot C + 4 \cdot D + F = \nu_{CO_2} \quad (5)$$

$$H: 4 \cdot A + 6 \cdot B + 8 \cdot C + 10 \cdot D = 2 \cdot \nu_{H_2O} \quad (6)$$

$$O: 2 \cdot F + 2 \cdot \alpha = 2 \cdot \nu_{CO_2} + \nu_{H_2O} \quad (7)$$

$$N: 2 \cdot E + \alpha \cdot 3,76 \cdot 2 = 2 \cdot \nu_{N_2} \quad (8)$$

Luego de haber encontrado los coeficientes molares de los reactivos, se calcula el calor neto en base molar.

$$\bar{q}_{neto} = (\sum \nu_i \cdot \bar{h}_i)_{productos} - (\sum \nu_i \cdot \bar{h}_i)_{reactivos} \quad (9)$$

donde:

\bar{q}_{neto} : calor neto transferido por unidad de mol de combustible [kJ/kmol].

ν_i : coeficiente molar del componente i por unidad de kmol de combustible quemado [kmol / kmol_{fuel}].

$$\bar{h} = \bar{h}_F + \bar{h}_{(T)} - \bar{h}^\circ \quad (10)$$

\bar{h}_F : entalpía molar de formación a condiciones estándar [kJ/kmol].

$\bar{h}_{(T)}$: entalpía molar a una temperatura T [kJ/kmol].

\bar{h}° : entalpía molar a las condiciones estándar [kJ/kmol].

Para este caso, al plantear (9), queda únicamente en función de las entalpías molares de formación, debido a que el gas en la entrada y la salida tiene condiciones estándar, quiere decir que la entalpía molar específica y la entalpía molar específica a condiciones estándar están a la misma temperatura para cada gas que compone el gas natural y por ello se cancelan.

Esta condición es importante tenerla en cuenta ya que de esta manera se puede hacer la medición del poder calorífico en el gas.

Luego de calcular el calor neto en base molar, se procede a calcular el calor neto másico, que es el mismo valor del poder calorífico superior (PCS).

$$|q_{neto}| = \left| \frac{\bar{q}_{neto}}{M_{Fuel}} \right| = PCS \quad (11)$$

donde:

q_{neto} : calor neto por unidad de masa de combustible [kJ/kg].

M_{Fuel} : masa molar del combustible [kg/kmol].

PCS : poder calorífico superior [kJ/kg].

La masa molar del combustible se calcula teniendo en cuenta la composición del gas natural. Para ello, se realiza una sumatoria de las fracciones molares de todos los gases que lo componen, multiplicando cada uno por su masa molar correspondiente.

$$M_{fuel} = \sum x_i \cdot M_i \quad (12)$$

donde:

x_i : fracción molar de cada gas sobre la mezcla [kmol del componente i / kmol de mezcla].

M_i : masa molar de cada gas [kg/kmol].

A partir de esto es posible calcular la relación aire-combustible estequiométrica.

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{st} = \frac{4.76 \cdot \alpha \cdot M_{air}}{M_{Fuel}} \quad (13)$$

donde:

$\left(\frac{A}{F} \right)_{st}$: relación aire-combustible estequiométrico [kg de aire seco / kg de combustible].

M_{air} : masa molar del aire [kg/kmol].

α : relación de equivalencia.

Con base en el cálculo del calor neto molar y conociendo las entalpías molares de formación, se plantea la ecuación para calcular la temperatura de llama adiabática del gas natural, calculada en función del balance estequiométrico ideal.

$$T_{ad} \approx \frac{\sum v_i \cdot \bar{h}_{F_{reactivos}} - \sum v_i \cdot \bar{h}_{F_{productos}}}{\sum v_i \cdot \bar{C}_{\rho_{productos}}} + T_{amb} \quad (14)$$

donde:

T_{ad} : temperatura de llama adiabática [K].

T_{amb} : temperatura ambiente en Bucaramanga [K].

\bar{C}_{ρ} : calor específico molar [kJ/kmol-K].

Siguiendo con la etapa 2 presentada en la Figura 6, se procede a plantear la ecuación de transferencia de calor correspondiente al dimensionamiento de un intercambiador de calor.

Este cálculo se divide en tres partes, cada una encaminada a determinar el área de intercambio de calor requerida, con el fin de obtener una solución.

$$\dot{Q} = U \cdot A_s \cdot LMTD \quad (15)$$

donde:

\dot{Q} : flujo de calor neto [W].

U : coeficiente global de transferencia de calor [W/m²K].

A_s : área superficial de transferencia de calor [m²].

$LMTD$: diferencia media logarítmica de temperatura [°C o K].

La primera parte del cálculo es el procedimiento para hallar el calor neto. Se toma (11) y a partir del calor neto másico se calcula el calor neto. Teniendo en cuenta que el calor neto es:

$$\dot{Q} = q_{neto} \cdot \dot{m}_{fuel} \quad (16)$$

donde:

\dot{m}_{fuel} : flujo másico de combustible [kg/h].

El cálculo del flujo másico de combustible se define mediante (16), considerando un flujo volumétrico de gas natural de 100 litros por hora. Este valor fue definido como un parámetro de diseño tomando en consideración el calorímetro de flujo desarrollado por (Rebolledo, 2008).

$$\dot{m}_{fuel} = \rho_{GN} \cdot \dot{v} \quad (17)$$

donde:

ρ_{GN} : densidad del gas natural condiciones estándar de Bucaramanga [kg/m³].

\dot{v} : flujo volumétrico de gas natural [m³/s].

Dado que el gas natural es una mezcla de gases, su densidad (inverso del volumen específico) se calcula como una propiedad intensiva de mezcla. Este cálculo se realiza a partir de la sumatoria de las propiedades individuales de cada gas multiplicado por su participación gravimétrica en la mezcla.

$$\rho_{GN} = \frac{1}{\sum f m_i \cdot v_i} \quad (18)$$

donde:

v_i : volumen específico de cada gas [m³/kg].

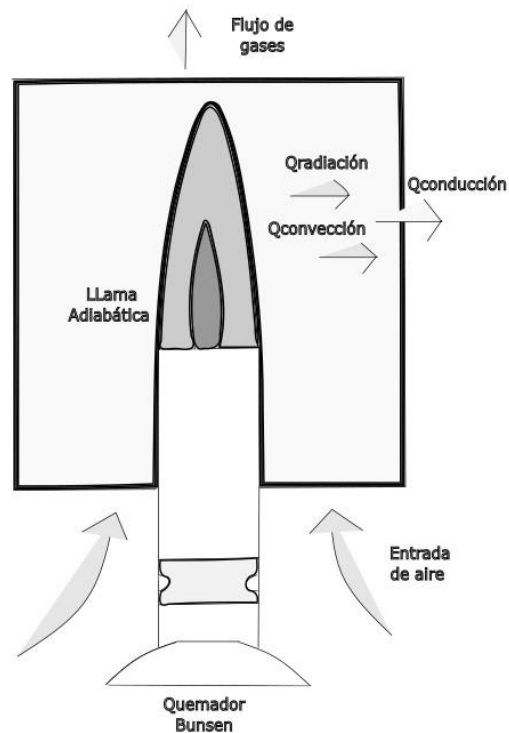
$f m_i$: fracción másica del componente i en la mezcla [kg del componente i / kg de mezcla].

Con base en lo previamente explicado, es posible hacer el cálculo del calor neto.

Una vez definido el calor neto transferido en el proceso, se continua con el cálculo del coeficiente total de transferencia de calor U , para el cual es importante tener en cuenta todas las formas de transferencia de calor presentes dentro del intercambiador.

Para el caso presente, donde los fluidos que intercambian energía son: gases de combustión y agua, existen los 3 mecanismos de transferencia: radiación, conducción y convección, como se presentan en la Figura 8. En vista que el intercambiador de calor se puede considerar de pared delgada, no se tienen en cuenta los efectos de transferencia por conducción en el análisis del intercambiador.

Figura 8. Formas de transferencia de calor en el calorímetro de Junkers.



De esta manera se plantea la ecuación general del coeficiente total de transferencia de calor

$$\frac{1}{U \cdot A_s} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{1}{h_{comb_o} \cdot A_o} \quad (19)$$

donde:

U : coeficiente total de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

A_s : área de la superficie [m^2].

A_i : área de la superficie interior [m^2].

A_o : área de la superficie exterior [m^2].

h_i : coeficiente de transferencia de calor interior (Convección) [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

h_{comb_o} : coeficiente de transferencia de calor combinado exterior (Convección y radiación) [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

Es importante aclarar que los subíndices o e i hacen referencia al paso del fluido que va por dentro (in) y el fluido que va por fuera (out), para este caso, agua y gas natural respectivamente. Debido a la alta temperatura que alcanza el gas natural dentro de la cámara de combustión, es muy importantes el efecto de la radiación, es por esto que se establece el coeficiente de transferencia de calor combinado.

$$h_{comb} = h_{conv} + h_{rad} \quad (20)$$

donde:

h_{conv} : coeficiente de transferencia de calor por convección [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

h_{rad} : coeficiente de transferencia de calor por radiación [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

Teniendo en cuenta la condición del intercambiador de pared delgada, el diámetro interior y el diámetro exterior se pueden asumir como muy próximos y, como consecuencia el área interior y el área exterior son prácticamente iguales. De esta manera (19) queda reducida de la siguiente forma:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{comb}} \quad (21)$$

donde el coeficiente de transferencia de calor total es dominado por el coeficiente de transferencia de calor más pequeño, en este caso el coeficiente combinado. Esta situación se presenta con frecuencia cuando uno de los fluidos es un gas y el otro es un líquido.

El cálculo del coeficiente combinado comienza con el desarrollo del coeficiente convectivo, para lo cual se establece una ruta que incluye el cálculo de la velocidad de los gases en la cámara de combustión, la determinación del número de Reynolds de los gases, el cálculo del número de Prandtl y finalmente el número de Nusselt.

Una vez que se han obtenido todos los números adimensionales necesarios, se procede a calcular el coeficiente convectivo exterior.

La velocidad de los gases se obtiene a partir de la siguiente ecuación de termodinámica:

$$\dot{m}_g = \rho_{gas} \cdot v_{prom} \cdot A_c \quad (22)$$

donde:

ρ_{gas} : densidad del gas natural dentro de la cámara de combustión [kg/m³].

v_{prom} : velocidad promedio del gas [m/h].

A_c : área de sección transversal del intercambiador [m²].

\dot{m}_g : flujo másico del gas dentro de la cámara de combustión [kg/h].

En este caso, el área de sección transversal es de sección anular, esto debido a la configuración del intercambiador de calor, donde el diámetro interior es 3 pulgadas y el diámetro exterior 6 pulgadas.

Es importante tener en cuenta que la densidad del gas natural dentro de la cámara de combustión es incierta, debido a que la misma está en función de la temperatura y dentro de la cámara únicamente se puede conocer con precisión las temperaturas a la entrada (temperatura de llama adiabática) y a la salida, la cual es aproximadamente la misma temperatura del agua a la salida, entre 27 y 30 grados Celsius.

De esta manera para el cálculo de la densidad del gas dentro de la cámara se procede haciendo un promedio de las densidades del gas halladas en función de la temperatura de entrada y salida. Cabe recalcar que se hace de esta manera para simplificar el cálculo, ya que la variación de la temperatura de los gases a lo largo de la cámara es incierta.

Para el cálculo del flujo másico dentro de la cámara de combustión se debe tener en cuenta la cantidad de aire que entra dentro de la misma, producto de la oxidación del combustible. Partiendo de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{react} = \dot{m}_{prod} \quad (23)$$

donde:

\dot{m}_{react} : flujo másico de los reactivos [kg/h].

\dot{m}_{prod} : flujo másico de los productos [kg/h].

Teniendo en cuenta la cantidad de aire para la combustión.

$$\dot{m}_{react} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{fuel} \quad (24)$$

donde:

\dot{m}_{aire} : flujo másico de aire [kg/h].

\dot{m}_{fuel} : flujo másico de combustible [kg/h].

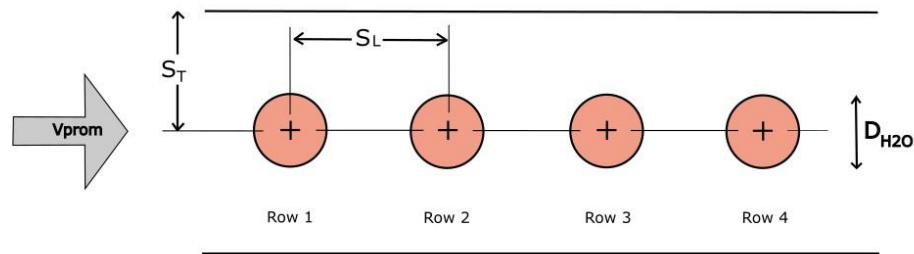
Para el cálculo del flujo másico de aire se tiene en cuenta el flujo másico de combustible calculado en (17) y la relación de aire-combustible estequiométrica calculada en (13).

$$\dot{m}_{aire} = \dot{m}_{fuel} \cdot \left(\frac{A}{F} \right)_{St} \quad (25)$$

Con las ecuaciones anteriormente planteadas se calcula la velocidad promedio de los gases dentro de la cámara de combustión según (22).

Teniendo la velocidad promedio de los gases dentro de la cámara de combustión, es posible proceder con el cálculo de la velocidad máxima de los gases tomando en consideración la disposición de flujo de estos por la sección anular, la cual es un flujo a través de un banco de tubos alineados.

Figura 9. Velocidad de flujo a través del banco de tubos.



$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{S_T - \left(\frac{D_{H2O}}{2} \right)} \cdot v_{prom} \quad (26)$$

donde:

$V_{m\acute{a}x}$: velocidad máxima del fluido [m/s].

D_{H2O} : diámetro de tubería por donde fluye el agua [m].

A partir del cálculo de la velocidad máxima de los gases se calcula el número de Reynolds en función de esta velocidad

$$R_{e,m\acute{a}x} = \frac{\rho_{gas} \cdot V_{m\acute{a}x} \cdot D_H}{\mu_{gas}} \quad (27)$$

donde:

$R_{e,m\acute{a}x}$: número de Reynolds en función de la velocidad máxima.

D_H : diámetro hidráulico [m].

μ_{gas} : viscosidad dinámica del gas natural dentro de la cámara de combustión [kg/m·s].

En (27) se debe tener en cuenta lo siguiente, la viscosidad dinámica del gas natural dentro de la cámara de combustión se calcula con el mismo procedimiento de la densidad del gas dentro de la cámara.

Todas las propiedades del gas natural en función de la temperatura dentro de la cámara de combustión, como lo son: densidad, viscosidad dinámica, número de Prandtl y conductividad térmica se calculan siguiendo el procedimiento descrito para el cálculo de la densidad del gas dentro de la cámara de combustión en (22).

Además, las propiedades previamente nombradas en función de la temperatura, para el gas natural, que es una mezcla de gases, se calculan haciendo la sumatoria de las fracciones molares de cada gas multiplicado con la respectiva propiedad que se desea hallar para cada gas.

A partir del cálculo del número de Reynolds y el número de Prandtl, con lo previamente explicado, se plantea la ecuación para calcular el número de Nusselt teniendo en cuenta el flujo a través de un banco de tubos, según Zukauskas.

$$N_u = C_1 \cdot R_{e,m\acute{a}x}^m \cdot P_r^{0.36} \cdot (P_r/P_{rs})^{1/4} \quad (28)$$

donde:

N_u : número de Nusselt.

P_r : número de Prandtl.

P_{r_s} : número de Prandtl en función de la temperatura de superficie.

Las constantes C_1 y m son tomadas de la tabla 7.5, Constantes de la ecuación para un banco de tubos en flujo cruzado, siguiendo el libro (Incropera. F.P & DeWitt. D. P, 2011, pág. 469).

Teniendo los números adimensionales y la conductividad térmica del gas dentro de la cámara es posible calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor del gas natural.

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot K_{gas}}{L_C} \quad (29)$$

donde:

K_{gas} : conductividad térmica del gas natural dentro de la cámara de combustión [W/m·K].

L_C : longitud característica [m].

La longitud característica es igual al diámetro hidráulico.

Se procede con el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación para el gas natural, el cual se calcula siguiendo el procedimiento descrito en (Cengel Y. A, Ghajar A. J, 2011), en el apartado de Intercambio de radiación con gases emisores y absorbentes, dentro del capítulo de Transferencia de calor por radiación.

La ecuación general del coeficiente de transferencia de calor por radiación es la siguiente:

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (30)$$

donde:

ε : emisividad de los gases.

σ : constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$].

T_s : temperatura de la superficie [K].

T_∞ : temperatura de los alrededores [K].

Para el desarrollo de la ecuación general se procede asumiendo las temperaturas de superficie y de los alrededores, las cuales se asumen 1000 Kelvin y 1500 Kelvin respectivamente, teniendo en cuenta la temperatura de llama adiabática del gas y las posibles pérdidas de energía en forma de calor del gas. Se desarrolla el cálculo de la emisividad de los gases con el método gráfico expuesto en el apartado de intercambio de radiación con gases emisores y absorbentes.

$$\varepsilon = C_C \cdot \varepsilon_{C,1 atm} + C_W \cdot \varepsilon_{W,1 atm} - \Delta\varepsilon \quad (31)$$

donde:

C_C : factor de corrección de emisividad del CO_2 .

ε_C : emisividad del CO_2 a una presión total de 1 atm.

C_W : factor de corrección de emisividad del H_2O .

ε_W : emisividad del H_2O a una presión total de 1 atm.

$\Delta\varepsilon$: factor de corrección de la emisividad.

Para lograr calcular las variables anteriormente mencionadas se debe seguir el procedimiento sugerido por el método gráfico. Es importante tener en cuenta que para el caso presente la longitud media del haz se asume como Forma arbitraria de volumen V y área superficial A_s irradiando hacia la superficie.

Luego de calcular la emisividad de los gases participantes se aplica (29) y (30) para calcular el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Teniendo el coeficiente de transferencia de calor por radiación es posible aplicar (20) y de esta manera calcular el coeficiente de transferencia de calor combinado para el gas natural.

Se procede con el cálculo del coeficiente de transferencia convectivo interno, que en este caso el fluido en cuestión es el agua. Para el cálculo del coeficiente de transferencia convectivo del agua se sigue el mismo procedimiento hecho en el cálculo del coeficiente de transferencia convectivo para el gas.

Para comenzar, se calcula el flujo másico de agua, lo cual permite obtener el número de Reynolds y continuar con el cálculo de los números adimensionales necesarios para llevar a cabo el procedimiento correspondiente. El flujo másico de agua se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot \Delta T \quad (32)$$

donde:

\dot{Q} : calor neto [kJ/h].

\dot{m}_{H_2O} : flujo másico del agua [kg/h].

$C_{p_{H_2O}}$: calor específico del agua [kJ/kg·K].

ΔT : delta de temperatura del agua (Temperatura de salida del intercambiador menos temperatura de entrada) [K].

Es importante aclarar que el calor neto en la es el mismo calor neto previamente calculado en (16). El calor específico y todas las propiedades del agua en función de la temperatura (densidad, viscosidad dinámica, calor específico, conductividad térmica y número de Prandtl) para el procedimiento se calculan teniendo en cuenta una temperatura promedio entre la temperatura de

entrada del agua al intercambiador y la temperatura de salida, las cuales son 25 y 30 grados Celsius respectivamente.

A diferencia del gas, las propiedades del agua no varían tanto con los cambios de temperatura, de igual forma la variación de la temperatura del agua a lo largo del intercambiador para este caso es muy baja.

Luego de calcular el flujo másico del agua se plantea la ecuación para calcular el número de Reynolds:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_{H_2O}}{\pi \cdot D_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O}} \quad (33)$$

donde:

D_{H_2O} : diámetro de tubo por donde fluye el agua [m].

μ_{H_2O} : viscosidad dinámica del agua [Kg/m·s].

El número de Nusselt se calcula a partir de la correlación de Gnielinski mostrada en el capítulo de transferencia de calor para flujo interno en serpentines helicoidales del libro (VDI Heat Atlas, 2010, pág. 711).

$$N_u = \gamma \cdot N_{ul}(Re_{crit}) + (1 - \gamma) \cdot N_{ut}(Re = 2.2 \times 10^4) \quad (34)$$

donde:

N_{ul} : número de Nusselt en flujo laminar.

N_{ut} : número de Nusselt en flujo turbulento.

$$\gamma = \frac{2.2 \times 10^4 - Re}{2.2 \times 10^4 - Re_{crit}} \quad (35)$$

donde:

Re_{crit} : número de Reynolds crítico.

Para el cálculo del número de Nusselt según Gnielinski se plantean las ecuaciones para el número de Nusselt tomando en consideración flujo laminar y flujo turbulento.

$$N_{ut} = 3.66 + 0.08(1 + 0.8 \left(\frac{D_{H2O}}{D_e} \right)^{0.9}) Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.14} \quad (36)$$

donde:

$$m = 0.5 + 0.2903 \left(\frac{D_{H2O}}{D_e} \right)^{0.194} \quad (37)$$

Pr_w : número de Prandtl evaluado a la temperatura de superficie.

$$N_{ut} = \frac{\left(\frac{\xi}{8} \right) Re \cdot Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.14} \quad (38)$$

donde ξ es el factor de fricción para el flujo turbulento en serpentines helicoidales dado por Mishra y Gupta.

$$\xi = \left(\frac{0.3164}{Re^{0.25}} + 0.03 \left(\frac{D_{H2O}}{D_e} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{n_w}{n} \right)^{0.27} \quad (39)$$

donde:

D_e : diámetro medio de la espira [m].

$$D_e = \frac{(D_i + D_o)}{2} \quad (40)$$

D_i : diámetro del tubo interior del intercambiador [m].

D_o : diámetro del tubo exterior del intercambiador [m].

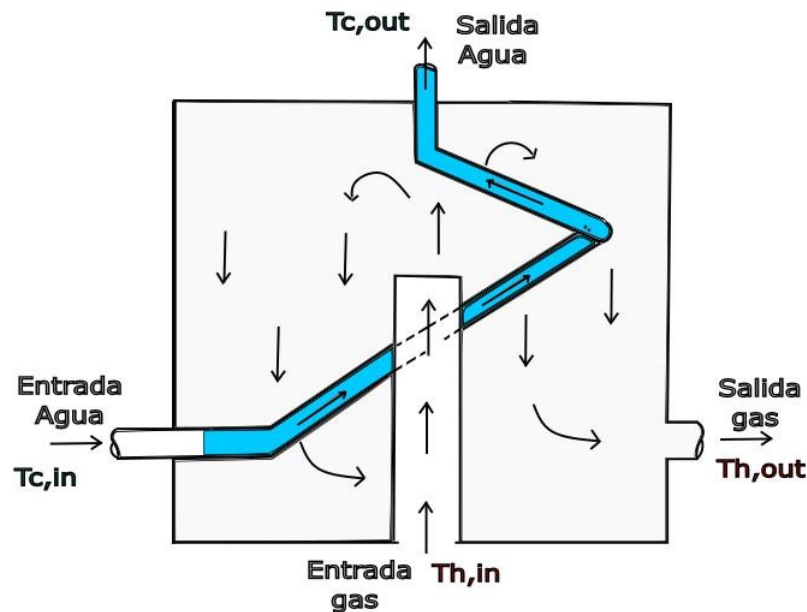
$\frac{n_w}{n}$ es el factor de corrección agregado en la ecuación por Gnielinski, en el cual n_w es la viscosidad del fluido evaluada en la temperatura de pared y n evaluada a la temperatura media.

De igual manera se aplica (29) y de esta forma se calcula el coeficiente de transferencia de calor convectivo para el agua. Para este caso la longitud característica es el diámetro de tubería, el cual es media pulgada.

Teniendo calculado el coeficiente de transferencia de calor combinado y el coeficiente convectivo interno se aplica (21) y se calcula el coeficiente de transferencia de calor total. De esta manera se completa la segunda parte del proceso de cálculo del área de transferencia de calor.

Procediendo con la tercera etapa mostrada en la Figura 6, se inicia con el cálculo del área de transferencia de calor, se plantea el cálculo de la diferencia media logarítmica de temperaturas para un intercambiador de flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclados.

Figura 10. Representación de entrada y salida de los fluidos de trabajo del intercambiador.



Para el cálculo de la diferencia media logarítmica en la disposición de flujo cruzado se toma la misma ecuación de la disposición en contraflujo y se agrega un factor de corrección, el cual depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos.

$$LMTD = F \cdot LMTD_{CF} \quad (41)$$

donde:

F : factor de corrección.

$LMTD_{CF}$: diferencia media logarítmica a contraflujo.

Se procede a calcular la diferencia media logarítmica a contraflujo con la siguiente ecuación:

$$LMTD_{CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (42)$$

donde:

$$\Delta T_1: T_{h,in} - T_{c,out} \quad (43)$$

$$\Delta T_2: T_{h,out} - T_{c,in} \quad (44)$$

$T_{h,in}$: temperatura del fluido caliente a la entrada [K].

$T_{h,out}$: temperatura del fluido caliente a la salida [K].

$T_{c,in}$: temperatura del fluido frío a la entrada [K].

$T_{c,out}$: temperatura del fluido frío a la salida [K].

Es crucial que la temperatura del agua y del gas en la salida sean similares para calcular con precisión el poder calorífico, esto es muy importante, ya que así se evidencia que el gas no está intercambiando energía en forma de calor con el agua al finalizar el recorrido por el intercambiador. De esta manera, se puede medir el poder calorífico del gas suponiendo que toda su energía se transfirió al agua, sin considerar las posibles pérdidas.

Según lo anteriormente explicado, la temperatura del agua a la entrada y a la salida se asumen de 25 y 30 grados Celsius respectivamente, y para el gas la temperatura a la entrada es la

temperatura de llama adiabática y a la salida ligeramente mayor a 30 grados Celsius. Para este caso el fluido caliente es el gas natural y el fluido frío es el agua.

Para el cálculo del factor de corrección se debe tener en cuenta que el flujo es no mezclado, se calcula según la gráfica del capítulo de intercambiadores de calor, el apartado de método de la diferencia media logarítmica, en donde se explican los intercambiadores de pasos múltiples y de flujo cruzado. Este factor es tomado de la gráfica según los factores P y R, los cuales dependen de las temperaturas de los fluidos.

$$P = \frac{T_{h,out} - T_{h,in}}{T_{c,in} - T_{h,in}} \quad (45)$$

$$R = \frac{T_{c,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{h,in}} \quad (46)$$

Después de calcular el factor de corrección en la gráfica y tener el cálculo de la diferencia media logarítmica a contraflujo es posible aplicar (41) y de esta manera calcular la diferencia media logarítmica del intercambiador en configuración de flujo cruzado.

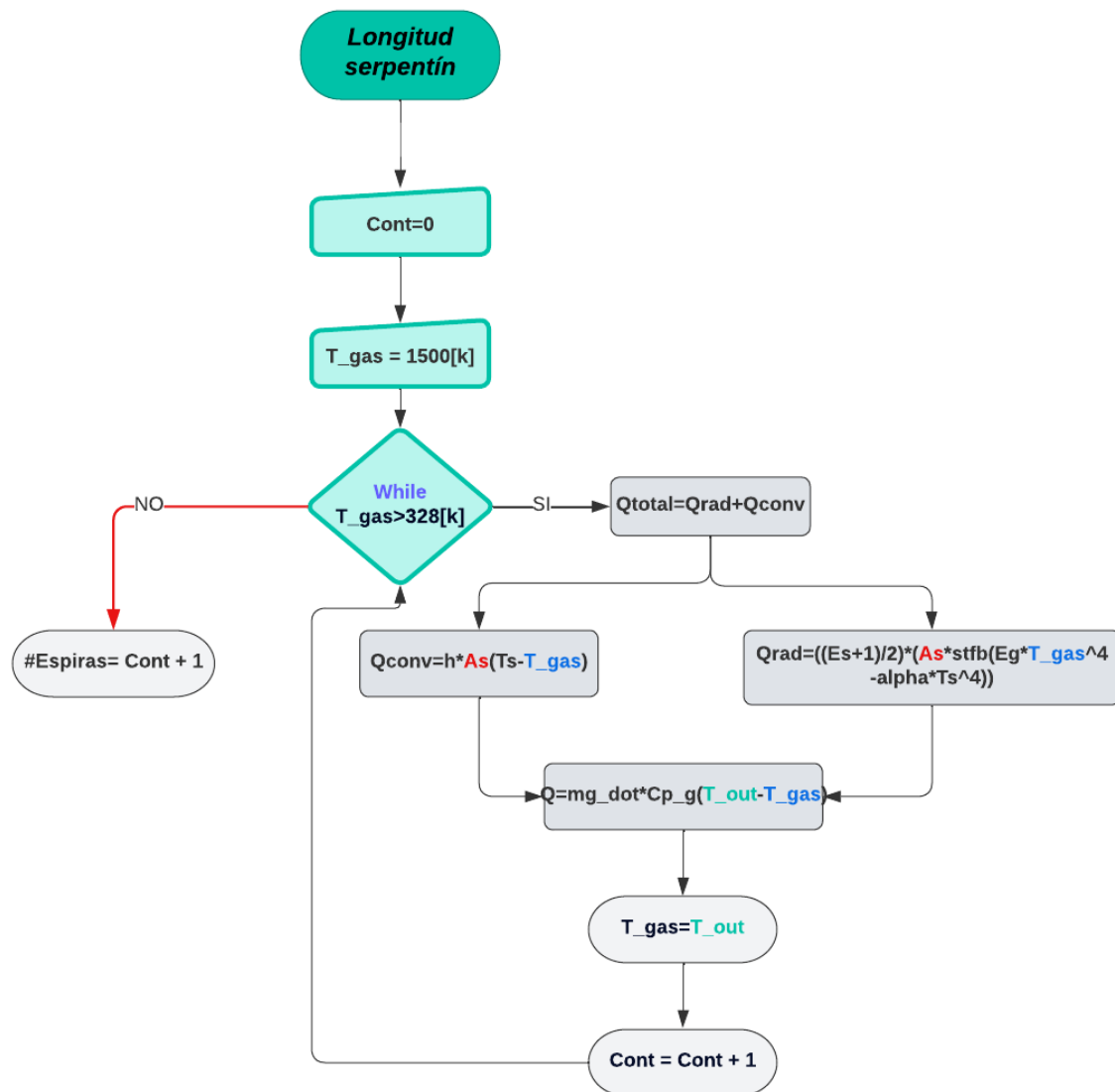
Para finalizar, se procede a despejar el área de transferencia de calor de (15).

A partir de los cálculos se obtiene un área de intercambio de calor de 0,1171m², diámetro interior y exterior de 3 y 6 pulgadas respectivamente.

Luego de completar el cálculo realizado hasta el momento es posible dimensionar el intercambiador de calor.

La última etapa consiste en estimar la longitud aproximada del tubo en espiral por donde circula el agua dentro del intercambiador, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Diagrama del cálculo del serpentín.

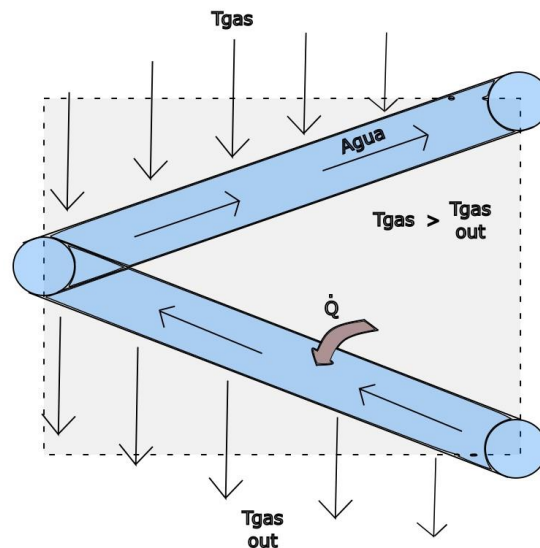


Para esta parte se plantea un método iterativo, el cual está en función del calor neto previamente calculado y la temperatura del gas a lo largo de la cámara. En este punto se realiza el cálculo que permite conocer la evolución de la temperatura de los gases mediante van transcurriendo por el intercambiador y entregan su energía al agua hasta disminuir a la temperatura de salida del agua, aproximadamente 30° Celsius.

Se plantea un diferencial de área donde se van a evaluar las condiciones de temperatura y de calor dentro del intercambiador, este diferencial se toma como el área superficial de una sola espira y teniendo en cuenta el calor transmitido por los gases (Calor por radiación y convección), se analiza la temperatura de los gases al transcurrir por el diferencial de área.

De esta manera, se inicia con la temperatura de los gases dentro de la cámara a 1500 Kelvin para comenzar el proceso con la primera espira, se calcula la temperatura de los gases a la salida, es decir, al haber transcurrido por la primera espira, y esta nueva temperatura calculada se usa como la nueva temperatura de los gases, y de esta manera se repite el proceso hasta disminuir la temperatura de los gases a 30° Celsius aproximadamente.

Figura 12. Representación del análisis térmico de una espira del serpentín.



En primer lugar, se plantea la ecuación del calor neto que se transmite al agua, sin tener en cuenta las pérdidas:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{Rad} + \dot{Q}_{Conv} \quad (47)$$

donde:

\dot{Q}_{Total} : calor neto total [W].

\dot{Q}_{Rad} : calor por radiación [W].

\dot{Q}_{Conv} : calor por convección [W].

Luego de tener la ecuación general para el calor neto total, se plantean las ecuaciones particulares para el calor por radiación y el calor por convección.

$$Q_{rad} = \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot A_{se} \cdot \sigma (\varepsilon_g \cdot T_g^4 - \alpha_g \cdot T_s^4) \quad (48)$$

donde:

ε_s : emisividad de la superficie.

A_{se} : área de la superficie de una espira [m²].

σ : constante de Stefan-Boltzmann [W/m²·K⁴].

ε_g : emisividad de los gases.

T_g : temperatura de los gases [K].

α_g : absorptividad de los gases.

T_s : temperatura de la superficie [K].

Se plantea esta ecuación de radiación teniendo en cuenta la recomendación hecha por (Hottel H. C, Sarofim A. F, 1967), la cual dice que las emisividades de las superficies de las paredes de los hornos y cámaras de combustión típicamente son mayores a 0,7, por consiguiente, la relación planteada en resulta muy conveniente para el cálculo preliminar de la transferencia de calor por radiación.

El área superficial que se toma en este caso, como anteriormente se había mencionado, es el área de una espira, la cual se puede analizar como una espira abierta, un tramo de tubería recto, ver Figura 13.

$$A_{se} = 2\pi \cdot r \cdot L \quad (49)$$

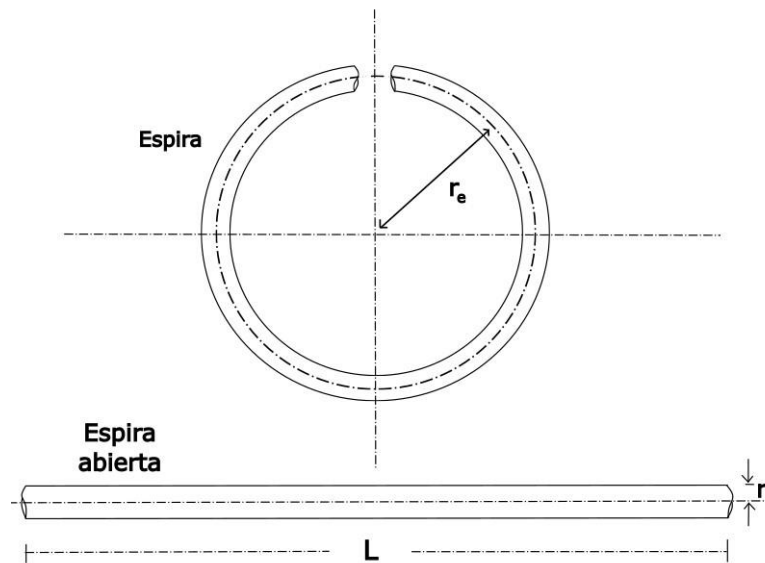
donde:

A_{se} : área superficial de la espira [m^2].

r : radio de la tubería [m].

L : longitud de la espira [m].

Figura 13. Representación de la espira cerrada y abierta.



Es importante tener en cuenta que en este caso la longitud de la espira abierta sería equivalente al perímetro de esta, y el radio de la espira es tomado en una posición media entre el diámetro exterior y el diámetro interior del intercambiador de calor, exactamente 5,715cm.

$$L = 2 \cdot \pi \cdot r_e \quad (50)$$

donde:

L : longitud de la espira [m].

r_e : radio de la espira [m].

Para el cálculo de la emisividad y la absorptividad de los gases, se tiene en cuenta que estas propiedades varían a lo largo del intercambiador debido a que están en función de la temperatura de los gases. Se calculan siguiendo el método gráfico descrito en el capítulo de Transferencia de calor por radiación del libro (Cengel Y. A, Ghajar A. J, 2011) expuesto en el apartado de intercambio de radiación con gases emisores y absorbentes.

Inicialmente se calculan asumiendo la temperatura de entrada de los gases, mediante se van haciendo las iteraciones se deben ir recalculando con la nueva temperatura de los gases obtenida.

Se plantea la siguiente ecuación particular del calor por convección:

$$\dot{Q}_{Conv} = h_{conv} \cdot A_s (T_s - T_g) \quad (51)$$

Para (51), es importante recordar el que coeficiente de transferencia de calor convectivo tiene todo un procedimiento para su cálculo, debido a que este depende de los números adimensionales (Reynolds, Nusselt, Prandlt), que, al mismo tiempo, estos dependen de otras propiedades del gas, como la temperatura.

Para la practicidad de los cálculos el coeficiente de transferencia de calor convectivo se asume constante y únicamente se varía la temperatura de los gases T_g . El valor que se toma para el coeficiente convectivo es el calculado previamente en (29) con el procedimiento explicado.

Luego de haber calculado el calor por convección y radiación se aplica (47) y se calcula el calor total.

Una vez calculado el calor total, se aplica la ecuación del calor dada por la termodinámica:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{m}_g \cdot C_{pg} (T_{gasout} - T_g) \quad (52)$$

donde:

\dot{m}_g : flujo másico de los gases [kg/h].

C_{pg} : calor específico de los gases [kJ/kg·K].

$T_{gas_{out}}$: temperatura del gas luego de pasar por la espira [K].

El flujo másico de los gases en esta ecuación es el previamente calculado en (24). Para el cálculo del calor específico se establece una sumatoria donde se multiplican cada uno de los gases que componen el gas natural por su respectiva fracción molar.

$$C_{pg} = \sum x_i \cdot C_{p_i} \quad (53)$$

donde:

C_{p_i} : calor específico para cada gas [kJ/kg·K].

El calor específico se calcula en función de la temperatura de los gases en la respectiva iteración. A partir de (52) se despeja la temperatura del gas luego de pasar por la espira y de esta manera se calcula.

Una vez calculada esta temperatura, se toma como la nueva temperatura de los gases a la entrada de la espira y se realiza todo el procedimiento una vez más. Este procedimiento se realiza hasta disminuir la temperatura de los gases a la salida hasta aproximadamente 30° Celsius.

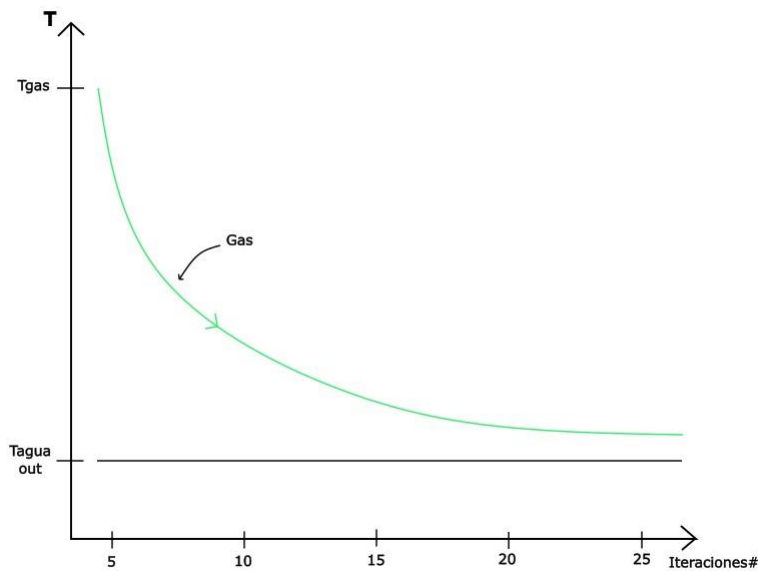
Debido a que el área superficial de transferencia de calor que se tomó para realizar el procedimiento fue el de una espira, cada iteración cuenta como una espira, de modo que después de realizar el cálculo, se concluye en un total de mínimo de 20 y máximo de 25 espiras.

Cabe recalcar que el mínimo de espiras para cumplir con la condición de la temperatura de los gases a la salida debe ser de 20 y se establece un máximo de 25 debido a que, luego de ese número de espiras, si se sigue iterando, la variación de la temperatura de los gases al entrar y salir

por la espira es menor a 10° Celsius, y la temperatura tiende a estabilizarse en un punto con variaciones cada vez menores.

Lo cual no significa un gran cambio para agregar más espiras, teniendo en cuenta que más espiras significa más material, el cual hace el intercambiador más costoso, no es viable.

Figura 14. Comportamiento de la temperatura del gas a lo largo del intercambiador.



Teniendo en cuenta la conclusión previa, se toma el valor de 22 espiras. A partir del número de espiras es posible calcular la longitud del tubo por donde fluye el agua multiplicando el número de espiras por la longitud de esta.

$$L_{pipe} = \#Espiras \cdot L \quad (54)$$

donde:

L_{pipe} : longitud de la tubería por donde fluye el agua [m].

$\#Espiras$: cantidad de espiras.

La cual da una longitud de 8 metros. De esta manera se concluye con los cálculos del dimensionamiento del intercambiador de calor.

3.1.2 Criterios de diseño del intercambiador de calor

En la Figura 15 se presentan dos opciones de intercambiadores de calor: a) el intercambiador de calor de coraza y tubos verticales, y b) el intercambiador de calor de coraza y tubo en espiral helicoidal. Estas alternativas ofrecen la posibilidad de seleccionar la que mejor se adapte al calorímetro de Junkers en desarrollo. Para seleccionar la mejor opción, se consideraron los siguientes criterios de diseño:

Mantenimiento: El diseño del intercambiador de calor debe facilitar el acceso para la inspección, limpieza y reemplazo de piezas, en caso de que sea necesario. Se han evaluado ambas alternativas bajo este criterio, y se ha concluido que la mejor opción es la alternativa b). Esto se debe a que esta alternativa permite separar cada una de las piezas sin dañar otras partes del intercambiador, lo cual sí es necesario en la alternativa a).

Montaje: es importante que el intercambiador de calor permita el desmonte fácil de cada sección y pieza sin afectar a otras partes del equipo. Por esta razón, la alternativa b) es la mejor opción, ya que cada conexión se realiza mediante accesorios roscados. Esto permite que cada sección principal del intercambiador de calor se pueda separar sin dificultad. Por otro lado, la opción a) no permite este tipo de desmonte ya que está fabricada como un solo conjunto.

Presupuesto: el intercambiador de calor debe ser rentable en términos de materiales, fabricación y operación. Ambas alternativas mantienen el principio de operación, el cual se fundamenta en la sección 2. Sin embargo, la opción a) está fabricada en tubos de bronce, mientras que la opción b) se fabrica en tubos de acero inoxidable, lo que hace que la alternativa a) sea la más costosa.

El proceso de fabricación de la opción a), presenta una distribución de tubos verticales soldados a la tapa superior del intercambiador de calor. Este proceso eleva aún más los costos en

comparación con la opción b), en la que solo se dispone de un tubo en espiral helicoidal soldado en sus extremos con los accesorios necesarios para el montaje final.

Por lo tanto, en este criterio se ha seleccionado la alternativa b) como la mejor opción, ya que es más rentable en términos de materiales como de fabricación.

Selección de materiales: los materiales utilizados en la construcción del intercambiador de calor deben ser compatibles con los fluidos que se van a intercambiar, y deben resistir a condiciones de temperatura, presión y corrosión. Como ya se mencionó en el criterio anterior, la opción a) se fabrica en bronce y la opción b) se fabrica en acero inoxidable. El bronce es más resistente a la deformación, tiene una mayor conductividad térmica y eléctrica y es más costoso, mientras que el acero inoxidable es más resistente a la corrosión, más duro y tiene un menor costo. Es por esto, que la alternativa seleccionada es la b).

Distribución de flujo: es fundamental que la distribución del flujo de los fluidos a través del intercambiador de calor sea uniforme para maximizar la transferencia de calor y minimizar la acumulación de depósitos.

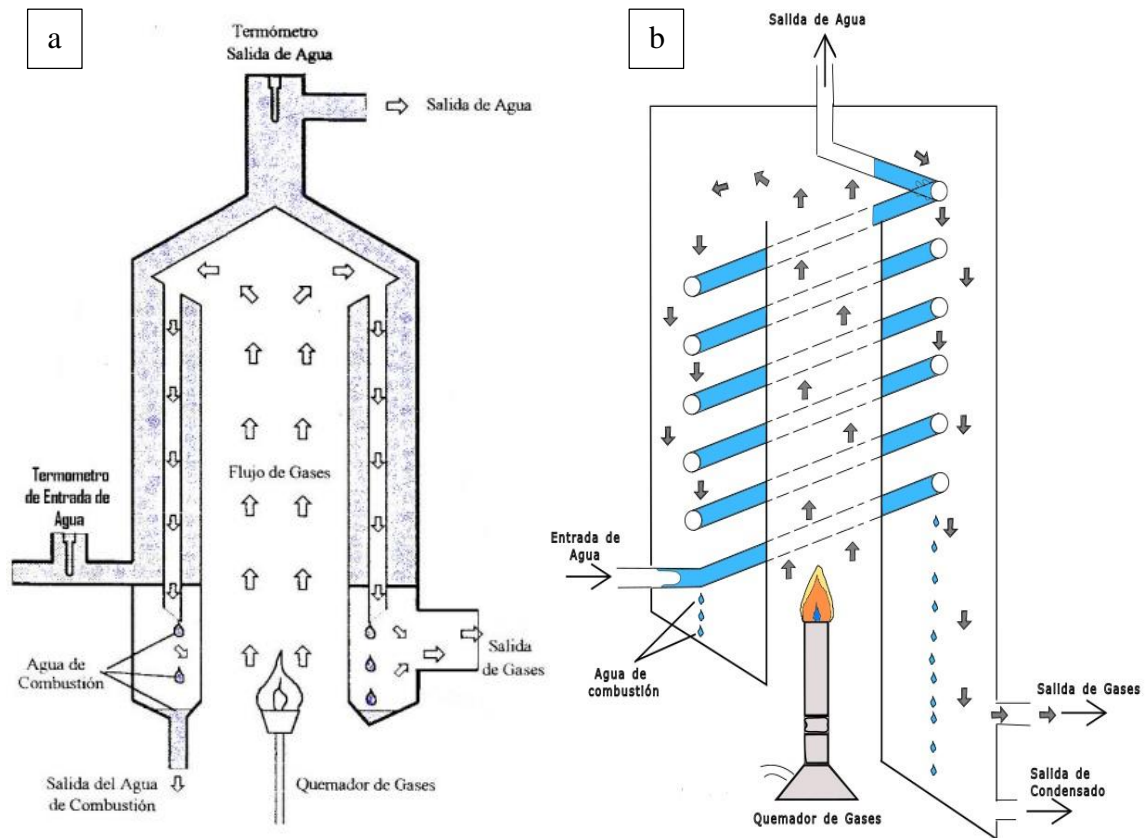
En el caso de la alternativa a), se presenta una distribución de flujo a contraflujo, en la cual el fluido caliente fluye a través del tubo interior principal y los tubos secundarios, mientras que el fluido frío (agua) fluye por la sección anular entre el tubo exterior e interior principal. Por otro lado, la opción b) tiene una distribución de flujo cruzado no mezclado, donde el fluido caliente fluye a través de la sección anular entre los tubos exterior e interior, y el fluido frío (agua) fluye por el serpentín.

Eficiencia térmica: se debe maximizar la eficiencia térmica del intercambiador de calor para lograr la máxima transferencia de calor posible. Esto implica minimizar las pérdidas de calor por conducción, radiación y convección.

Teniendo en cuenta la distribución de flujo de cada una de las alternativas, se considera que la mejor alternativa es la opción a), ya que esta produce menos pérdidas con el entorno, pues los gases de combustión van a entregar su mayor energía al agua antes que a la superficie del intercambiador, mientras que la opción b) genera más pérdidas ya que aunque los gases estén en contacto continuo con el serpentín, antes de llegar a este ya han perdido energía con la superficie del intercambiador de calor.

Con el análisis de los criterios anteriores se decidió desarrollar la alternativa b), ya que es la más económica, tiene un montaje más sencillo, su material garantiza que no se presente corrosión y permite un fácil mantenimiento.

Figura 15. Disposición de alternativas de intercambiadores de calor. La alternativa a) es adaptada de (Rebolledo, 2008).



3.1.3 Selección de materiales y accesorios

La selección de materiales y accesorios es un proceso crítico en la fabricación y diseño de cualquier producto o estructura. La elección de los materiales y accesorios adecuados puede afectar significativamente la funcionalidad, durabilidad, seguridad y costo del producto.

En las siguientes tablas se presenta cada uno de los ítems a seleccionar, las cantidades y algunas características relevantes, al mismo tiempo se le asigna una etiqueta para poder referenciar cada uno de estos.

Tabla 3. Selección de materiales principales.

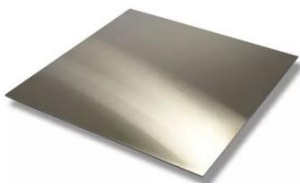




Etiqueta	Material	Características	Representación gráfica
A	Lámina de acero inoxidable	Dimensión: 1 [m ²] Calibre 16 Resistente a la corrosión Fácil de mantener Bajo presupuesto	
B	Tubo acero inoxidable	8 [m] de longitud Calibre 18 Diámetro nominal: 1/2 [in] Resistente a la corrosión Bajo presupuesto	
C	Mechero bunsen	Para gas natural Diámetro rosca conexión: 5/8 NPT Regulador de combustible Regulador de aire	
D	Flujometro de gases	Para argón Medición: 0 a 25 LPM Regulador de combustible	
E	Bomba magnética	Marca: KEG KING Serie: MKII Referencia: 006806-110	

Tabla 4. Accesorios para la conexión del serpentín a la entrada y salida del agua.









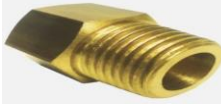



Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
H	4	Codos	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/4 NPT	
HH	1	Niple	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/4 NPT Longitud: 2 [in]	
HHH	1	Arandela	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/4 NPT	
I	2	Niple	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/4 NPT Longitud: 3 [in]	
II	3	Bushing	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/4 NPT	
III	2	Tee	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/2 NPT	

Tabla 5. Accesorios para la conexión de las termocupas a las Tee.

Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
J	2	B68	Material: Bronce Diámetro: 5/16 a 1/4 NPT	
JJ	1	B68	Material: Bronce Diámetro: 5/16 a 1/2 NPT	

JJJ	2	Buje	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/4 a 1/2 NPT	
K	1	Buje	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/2 a 1/2 NPT	
KK	2	Bushing	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/2 NPT	
KKK	1	Bushing	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/2 a 1 1/2 NPT	
KJ	2	Niple	Material: Acero inoxidable Diámetro: 3/8 NPT Longitud: 3 [in]	
KJJ	2	Macho prestolock	Diámetro: 3/8 NPT Material: Bronce cromado	

Tabla 6. Accesorios para la recolección del condensado.

Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
L	1	Niple	Material: Bronce cromado Diámetro: 1/8 NPT	
LL	1	Unión	Material: Bronce cromado Diámetro: 1/8 NPT	
LLL	1	Niple reducido	Material: Bronce cromado Diámetro: 1/8 a 1/4 NPT	
M	1	Codo calle	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/4 NPT	
			Material: Acero inoxidable Diámetro: 1/4 NPT	

MM	1	Válvula de bola	
-----------	---	-----------------	---

Tabla 7. Accesorios para la conexión de la salida de los gases de combustión.




Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
N	1	Niple	Material: Acero inoxidable Diámetro: 1 1/2 [in]	
NN	1	Tee	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1 1/2 [in]	
NNN	1	Válvula de bola	Material: Bronce cromado Diámetro: 1 1/2 [in]	

Tabla 8. Accesorios para garantizar la hermeticidad del equipo.





Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
O	1	Abrazadera	Material: Acero inoxidable Diámetro: 6 [in] Tipo: Clamp Referencia: Sanit F	
OO	1	Férula corta	Material: Acero inoxidable Diámetro: 6 [in] Tipo: Clamp Referencia: Sanit	
P	1	Tapón	Material: Acero inoxidable Diámetro: 6 [in] Tipo: Clamp Referencia: Sanit G	
PP	1	Empaque	Material: Siliconado Diámetro: 6 [in] Tipo: Clamp Referencia: Sanit	

Tabla 9. Accesorios para el sistema hidráulico.

Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
F	3	Vaso de precipitado	Material: Polietileno Volumen: 1 litro	
FF	6 metros	Manguera	Material: Nylon negro Temperatura de trabajo: 95 [°C] Fácil montaje Diámetro: 10 [mm]	
Q	1	Macho prestolock	Diámetro: 12 [mm] Material: Bronce cromado	
QQ	2	Macho prestolock	Diámetro: 10 [mm] a 12 [mm] Material: PBT	
R	2	Abrazadera	Material: Acero inoxidable Tipo: #10	
RR	2	Abrazadera	Material: Acero inoxidable Tipo: #17	
RRR	6	Pasa muro	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 3/8 [in]	
S	6	Macho prestolock	Material: Bronce cromado Diámetro: 3/8 [in]	
SS	1	Silicona roja	Apta para alta temperatura 1 tubo	










SSS	1	Racor B64	Material: PBT Diámetro: 10 [mm]	
T	1	Válvula de bola	Material: Bronce cromado Diámetro: 1/2 [in]	

Tabla 10. Accesorios para el sistema estructural del equipo.

Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
TT	1	Tubo	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in] Longitud: 1,7 [m]	
TTT	4	Codos	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in]	
U	3	Niple	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in] Longitud: 9 [in]	
UU	2	Niple	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in] Longitud: 5 [in]	
UUU	2	Niple	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in] Longitud: 6 [in]	
V	2	Niple	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in] Longitud: 3 [in]	
VV	2	Niple	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in] Longitud: 2 [in]	








VV	4	Tee	Material: Hierro galvanizado Diámetro: 1/2 [in]	
W	4	Tapones	Material: Polipropileno Diámetro: 1/2 [in]	

Tabla 11. Accesorios para el sistema de medición de temperaturas.

Etiqueta	Cantidad	Accesorio	Características	Representación gráfica
WW	4	Termocupla	Material: acero inoxidable Tipo: K Longitud cable: 2 [m] Temperatura: 0 a 800 [°C]	
WY	1	Arduino	Tipo: UNO	
WX	4	Módulo	Tipo: Max6675	
WN	20	Cable	Jumper M/H	
WM	4	Cable	Jumper M/M	

3.1.4 Planos del sistema

En esta sección se presentan los planos del sistema de intercambiador de calor, los cuales fueron realizados en el software de SolidWorks, herramienta CAD que permite el diseño de las piezas y ensamble de las mismas.

Figura 16. Renderizado en vista isométrica del calorímetro.



Figura 17. Plano vista explosionada conjunto general calorímetro.



En el Anexo A se presentan cada uno de los planos de las vistas isométricas, explosionadas de cada uno de los conjuntos presentados en la Figura 17, con el fin de entender cada uno de los ensamblajes del calorímetro. Así como los planos de las piezas individuales que fueron diseñadas y manufacturadas para poder construir el diseño anteriormente determinado.

3.2 Fabricación y montaje

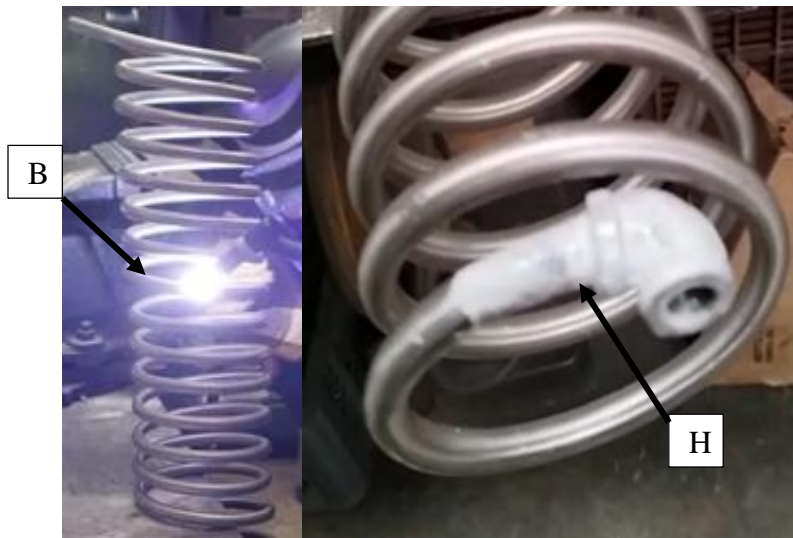
En esta sección, se incluyen imágenes detalladas del proceso de fabricación y montaje de cada uno de los subsistemas del equipo. Estas imágenes permiten visualizar el montaje de los materiales y accesorios presentados desde la Tabla 3 hasta la Tabla 11.

3.2.1 Sistema del intercambiador de calor.

El proceso de manufactura del intercambiador de calor inició con el tubo en espiral. Este tubo se construyó a partir de dos segmentos de tubo recto de 3 [m] y un segmento de tubo recto de 2 [m]. Cada sección se iba doblando de tal forma que el radio de cada espira fuese de 5,715 [cm] aproximadamente.

Luego de tener las 22 espiras formadas, se realizó el proceso de soldadura de cada una de las secciones y también de los codos a los extremos del serpentín como se observa en la Figura 18. Estos permiten el ensamblaje del equipo junto con un niple y arandela para garantizar que no se presenten fugas. Para mayor claridad, revisar las etiquetas H, HH y HHH presentados en la Tabla 4.

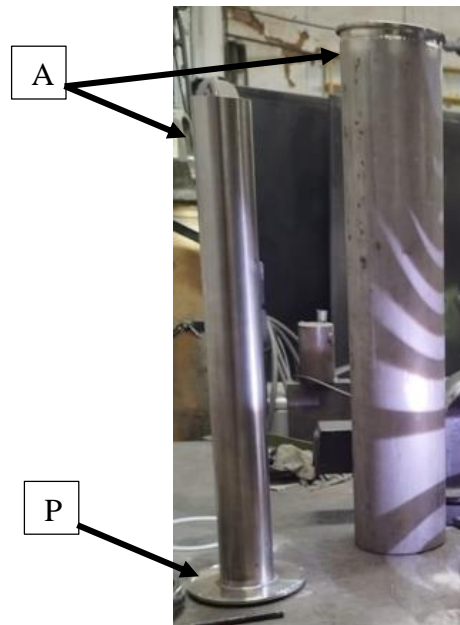
Figura 18. Proceso de fabricación del serpentín.



La coraza del intercambiador de calor y el tubo interior se fabricó a partir de láminas de acero inoxidable. Para ello, se dispuso de una cortadora laser para realizar el proceso de corte y desarrollar las piezas presentadas en las Figura A6, Figura A7 y Figura A12 del Anexo A.

Posterior a esto, la lámina cortada fue doblada para tener la sección cilíndrica interior y exterior del intercambiador de calor. Luego se realizó una soldadura en cada uno de los extremos de manera independiente para garantizar unión y rigidez. El resultado de este proceso se aprecia en la Figura 19.

Figura 19. Cilindro interior y exterior del intercambiador de calor.



En la Figura 19 también se puede observar el tapón presentado en la Tabla 8, el cual fue manufacturado como se muestra en la Figura A13 del Anexo A. Este ítem genera la sección anular del intercambiador de calor por donde los gases de combustión fluyen.

Por último, el cilindro exterior fue perforado con un diámetro de $1 \frac{1}{2}$ [in] para ubicar el accesorio como se muestra en la Figura 20. Las etiquetas se presentan en la Tabla 7 y Tabla 8.

Figura 20. Cilindro externo y accesorios.

El condensado se recoge mediante el acople de los accesorios presentados en la Tabla 6, estos se dispusieron como se observa en la Figura 21.

Luego de esto se acoplaron los accesorios de la Tabla 7 como se muestra en la Figura 22. Adicional a esto, la termocupla internamente se le realizó el arreglo presentado en la Figura 23, con los accesorios de la Tabla 5 y Tabla 11.

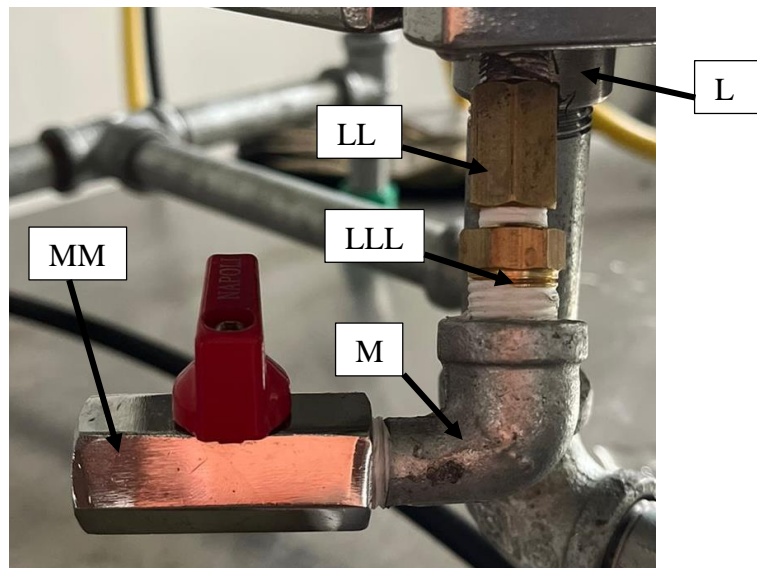
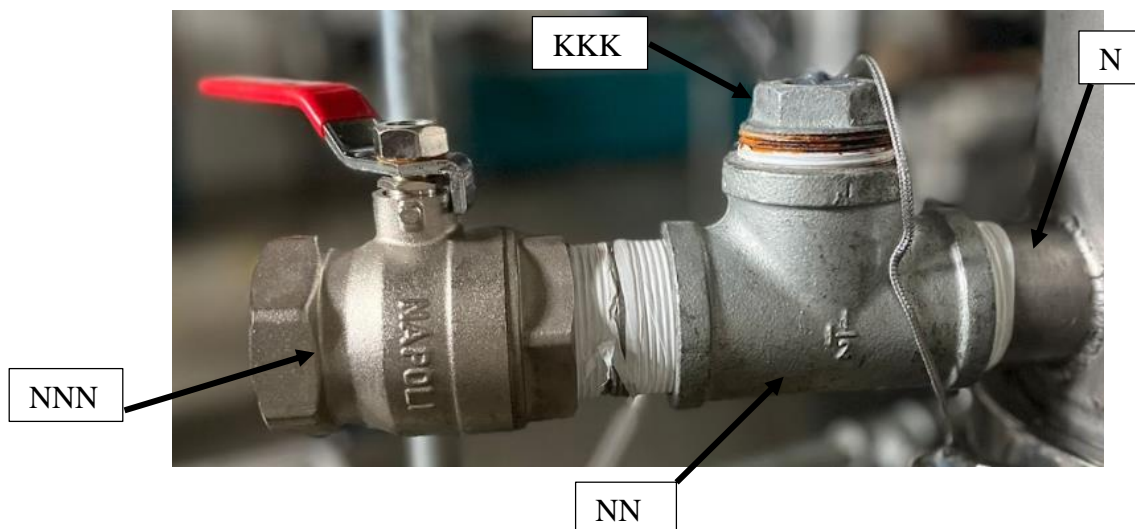
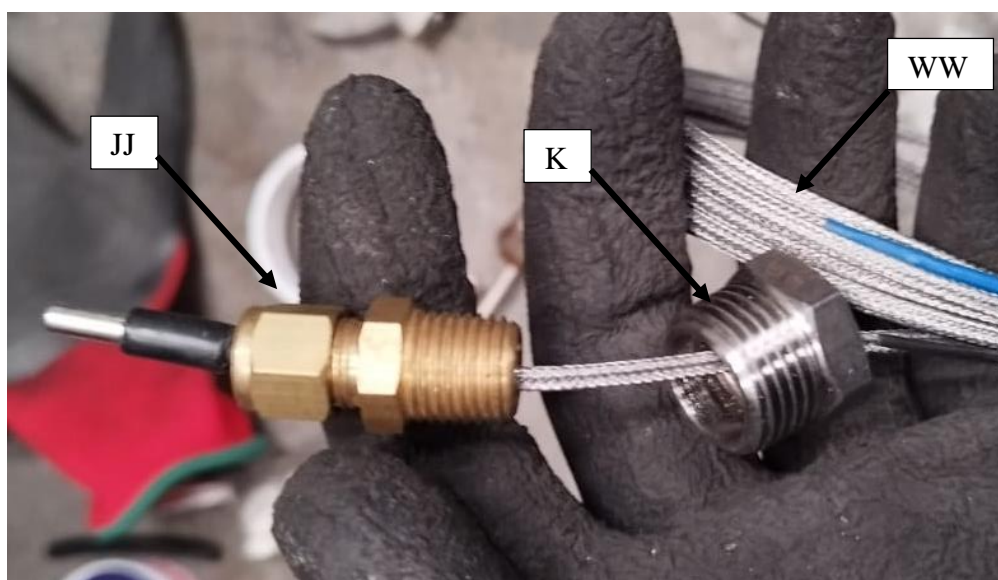
Figura 21. Arreglo para la recolección del condensado.

Figura 22. Montaje de accesorios para salida de gases combustión.**Figura 23. Arreglo de las termocupas utilizadas en el equipo.**

Para las conexiones a la entrada y la salida del agua del intercambiador de calor, se utilizaron los accesorios presentados en la Tabla 4 y Tabla 5. El arreglo final se presenta en la Figura 24. La termocupla de esta sección, internamente se le realizó la disposición presentada en la Figura 25, con los accesorios de la Tabla 5 y Tabla 11.

Figura 24. Conexión para la entrada y la salida del agua al intercambiador de calor.

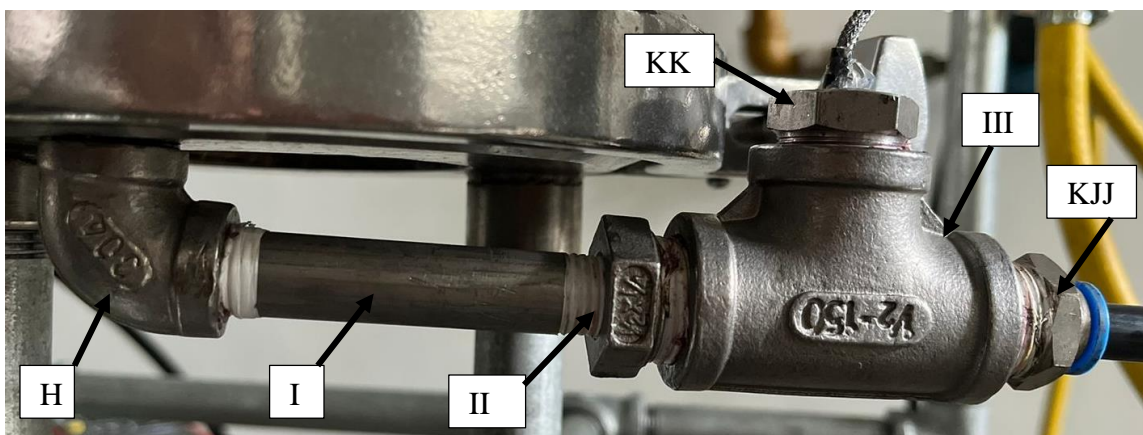
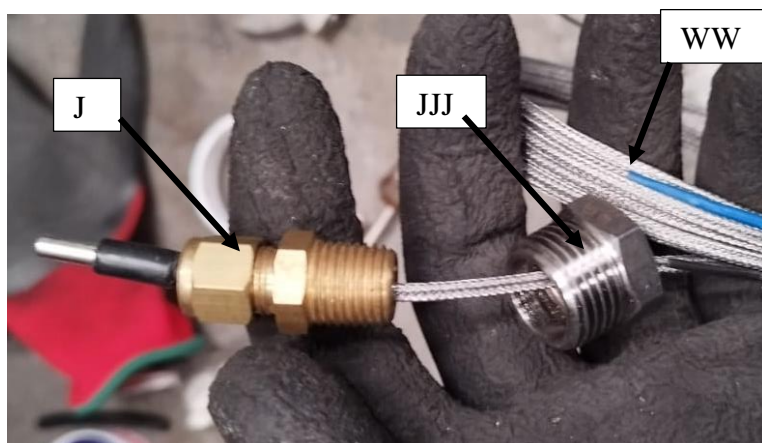


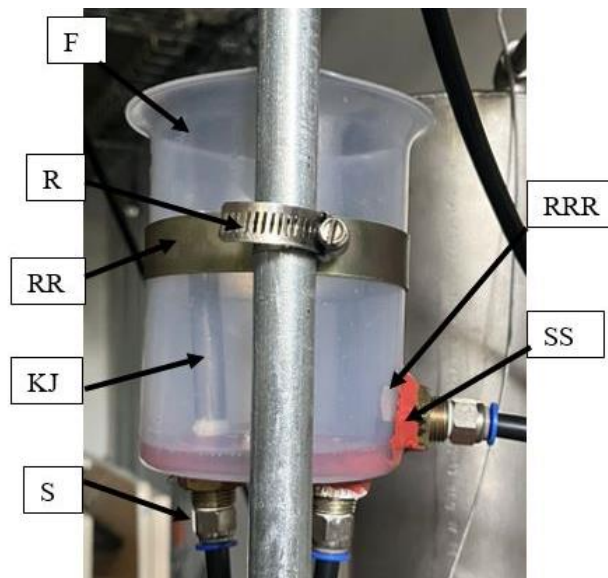
Figura 25. Arreglo de las termocuplas utilizadas en el equipo.



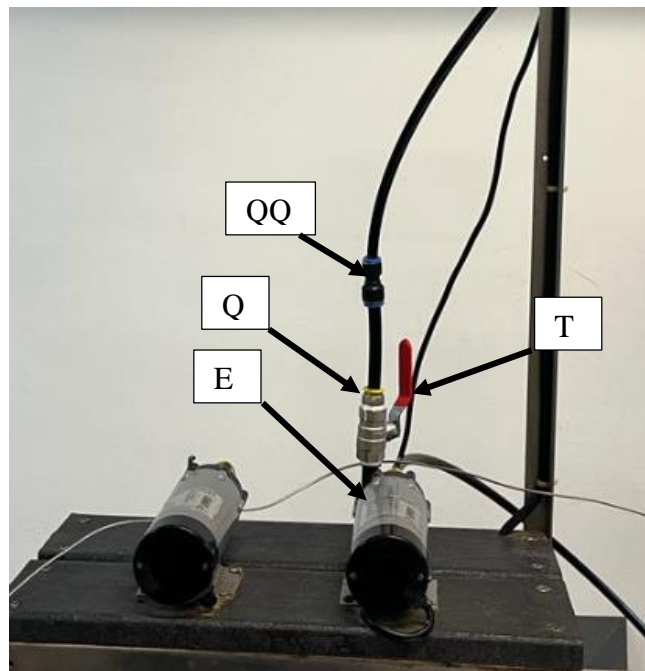
Para garantizar la hermeticidad del equipo y que los elementos principales estén fijos y unidos, se decidió utilizar los accesorios presentados en la Tabla 8.

3.2.2 Sistema de alimentación de agua.

A los vasos de precipitado se le realizaron tres perforaciones con un metal caliente, lo que permitió emplear el montaje dispuesto en la Figura 26 con algunos de los accesorios presentados en la Tabla 9 y Tabla 5.

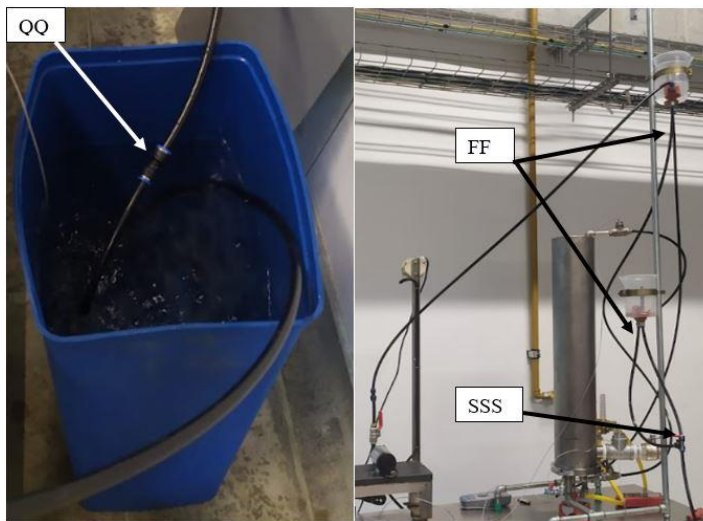
Figura 26. Conexiones presentes en los vasos de precipitado.

Para la parte hidráulica del equipo, se utilizó los ítems presentados en la Tabla 3 y Tabla 9 y su disposición final, se presenta en la Figura 27.

Figura 27. Sistema de bombeo de agua del equipo.

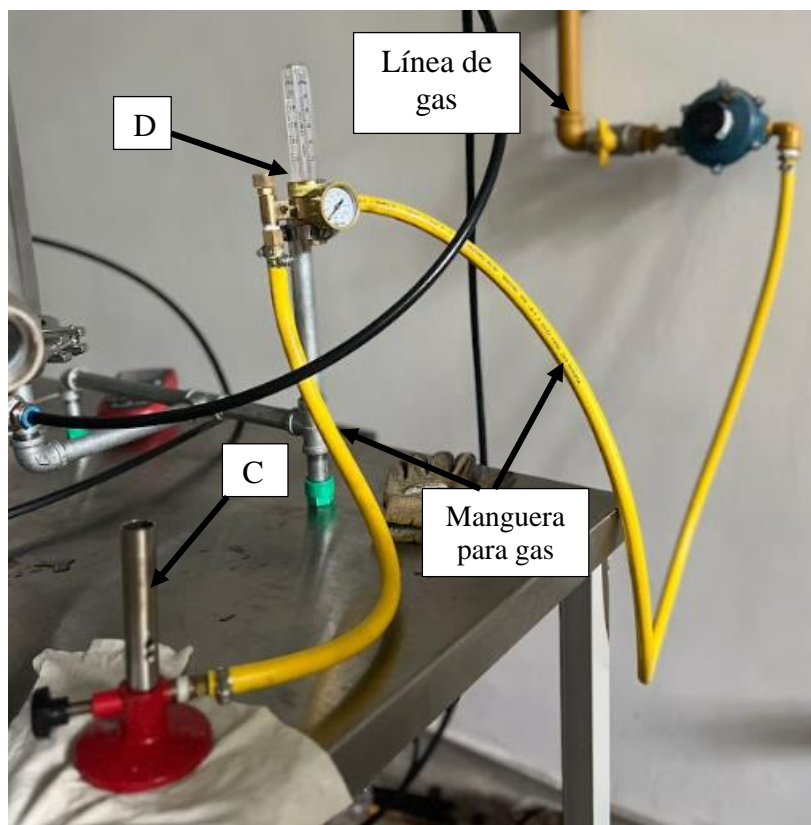
En la Figura 28 se presentan algunos de los accesorios de la Tabla 9, los cuales permiten la conexión para el flujo de agua constante entre todo el equipo.

Figura 28. Conexiones rápidas de mangueras.



3.2.3 Sistema de suministro de gas.

Los accesorios que se mencionan en la Tabla 3 se fueron unidos mediante manguera para gas de 5/8 [in] de diámetro, desde la línea principal de gas que se encuentra en el laboratorio de sistemas térmicos hasta el flujometro de gases, luego, se conectó al mechero tipo Bunsen, los ajustes se realizan mediante abrazaderas y teflón para garantizar que no se presenten fugas, la disposición final se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Conexión suministro de gas.

3.2.4 Sistema estructural.

Se ha diseñado una estructura mediante los ítems de la Tabla 10, ya que es importante que se tenga una base firme para este equipo, garantizando así seguridad al momento de estar en operación. La disposición final se aprecia en la Figura 30.

3.3 Metodología de pruebas.

La metodología de las pruebas se siguió obedeciendo los principios de funcionamiento del calorímetro de Junkers para medir el poder calorífico superior PCS. Para este procedimiento se definió un protocolo de operación del banco de pruebas, teniendo en cuenta las instrucciones de seguridad para la operación del equipo.

Para realizar los experimentos fue necesario en primer lugar establecer las condiciones de flujo volumétrico de los fluidos de trabajo con las cuales se deseaba operar el calorímetro. En el caso del agua, inicialmente se hicieron algunas pruebas con diferentes alturas de los vasos de precipitado para probar diferentes flujos volumétricos de agua. Con estas pruebas, se logró identificar un delta de alturas entre los dos vasos de 0.64 metros con el cuál se obtuvieron mejores resultados, ver Figura 32.

Para la medición del caudal que fluía por el calorímetro se ubicó la manguera por la cual fluía el agua de salida del calorímetro hacía el tanque de salida en un recipiente diferente durante un minuto, la cantidad de agua recolectada en este recipiente se pesó en una balanza digital y de esta manera se determinó el volumen de agua.

El flujo de gas natural se determinó según las variaciones en la temperatura, tomando principalmente los parámetros de la temperatura de los gases producto de la combustión y la temperatura del agua a la salida del calorímetro. A partir de esto, se estableció un flujo volumétrico de gas natural de 1 litro por minuto, ver Figura 33.

Adicionalmente, se posicionó a media apertura la válvula reguladora de flujo de salida de los gases producto de la combustión, esto con el fin de disminuir el flujo de salida de los gases y mantenerlos más tiempo dentro de la cámara de combustión para mejorar el intercambio de calor, ver Figura 34.

Estas condiciones fueron establecidas para lograr resultados óptimos en la evaluación con el equipo, con el cual, se hicieron 5 pruebas diferentes con las mismas condiciones de flujos y apertura de válvula para verificar los datos obtenidos. El experimento se detenía cuando la temperatura del agua a la salida del calorímetro se estabilizaba en un lapso de 5 minutos, cada una de las pruebas con una duración aproximada de 40 minutos.

Para lograr seguir la metodología de pruebas es necesario ver el Anexo D, donde se especifican cada uno de los pasos para lograr medir el poder calorífico superior.

Figura 32. Diferencia de alturas entre los vasos de precipitado.

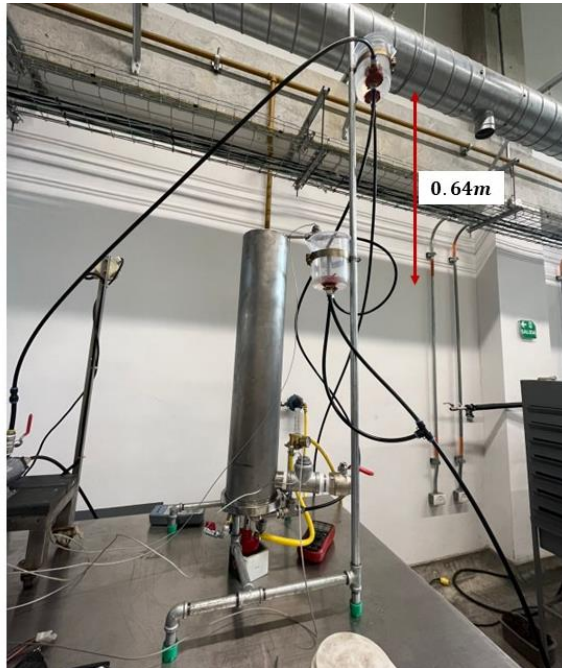


Figura 33. Flujo volumétrico gas natural.

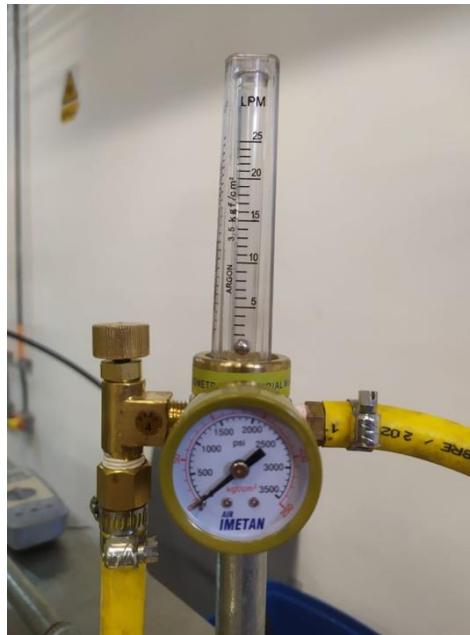


Figura 34. Apertura válvula reguladora de gases producto de la combustión.



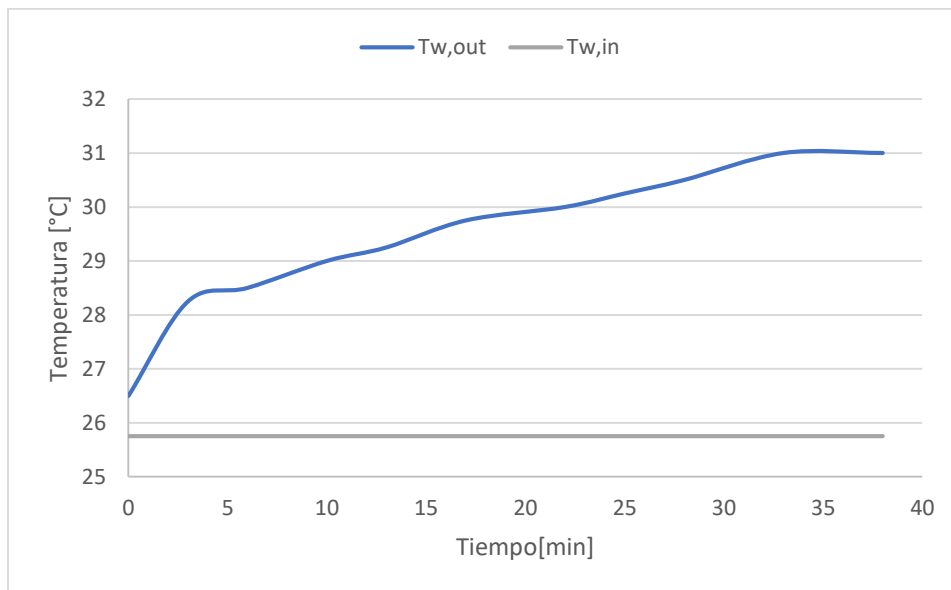
4. Resultados y discusiones

Los resultados presentados a continuación están en función de las condiciones establecidas en la metodología de trabajo previamente explicada en el capítulo 3.

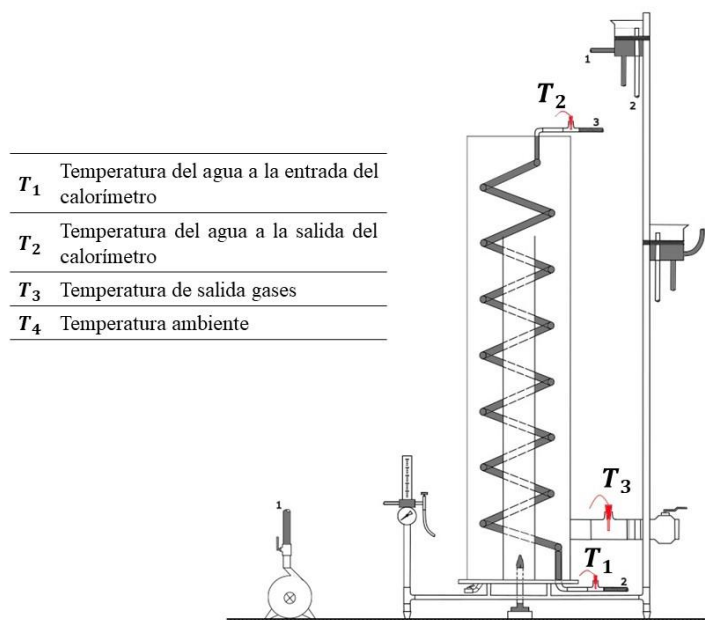
Como fue mencionado en la metodología de pruebas, los ensayos experimentales se detenían cuando la temperatura del agua a la salida del calorímetro se estabilizaba en un periodo de 5 minutos o más.

La Figura 35 muestra el comportamiento de la temperatura del agua a la salida del calorímetro ($T_{w,out}$) y la temperatura a la entrada ($T_{w,in}$), en un periodo de prueba de 40 minutos. En la figura es posible apreciar como la temperatura del agua a la salida se estabiliza, en ese punto se mide el poder calorífico experimental.

Figura 35. Comportamiento temperatura del agua a la entrada y salida del calorímetro, en una prueba de laboratorio.



En la Figura 36 se puede identificar la ubicación de las termocoplas en el calorímetro con las cuáles se monitoreó la temperatura de los fluidos de trabajo.

Figura 36. Representación gráfica de las mediciones de temperaturas en el calorímetro.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, para lograr validar el funcionamiento del calorímetro de Junkers diseñado y construido. Los experimentos fueron realizados en la ciudad de Bucaramanga.

Hay que tener en cuenta que el principal objetivo del calorímetro es determinar el poder calorífico del gas, en este caso del gas natural de Vanti Gas Oriente S.A. Además, mostrar que el valor experimental obtenido se encuentra cerca del poder calorífico teórico calculado según la composición del gas.

Tabla 12. Resultados del poder calorífico superior del gas natural.

Prueba No.	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	Caudal Agua [l/m]	Flujo volumétrico GN [l/m]	PCS experimental [kJ/kg]	PCS Vanti [kJ/kg]	Error %
1	23,50	28,75	29,75	25,00	1,548	1,00	52134,36	49820,70	4,64%
2	25,75	31,00	31,00	25,00	1,540	1,00	51823,85	49820,70	4,02%
3	26,25	31,00	31,75	25,00	1,527	1,00	46488,36	49820,70	6,69%
4	25,75	31,00	35,00	25,00	1,530	1,00	51487,33	49820,70	3,35%
5	25,50	30,75	29,75	25,00	1,535	1,00	51660,13	49820,70	3,69%

En la tabla mostrada a continuación se presenta el presupuesto que se invirtió para el desarrollo de este equipo de calorimetría.

Tabla 13. Presupuesto del proyecto.

Cantidad	Producto	Característica	Costo unitario +IVA	Costo total	Proveedor	Dirección	Pagado por
2	Vaso precipitado	1 litro	\$ 10.000	\$ 20.000	Distrimédicos	Cra 22#33-05 Bgm	ESTUDIANTE
1	Mechero bunsen	Rosca de 5/8 NPT para gas natural	\$ 95.000	\$ 95.000	Distrimédicos	Cra 22#33-05 Bgm	ESCUELA
1	Arduio uno	Ref:A000066	\$129.115	\$ 129.115	I+D Electrónica	CII 48D#65A-35 Medellín	ESCUELA
2	Termocupla tipo K	Ref: KIT-TERMO-K	\$ 28.773	\$ 28.773	I+D Electrónica	CII 48D#65A-35 Medellín	ESCUELA
4	Termocupla tipo K-2M	Ref:TERMO-K-6	\$ 24.752	\$ 24.752	I+D Electrónica	CII 48D#65A-35 Medellín	ESCUELA
2	Cable Dupont M/H 30 [cm]	Ref: EASY-CAB-AUNT-MH-30	\$ 741	\$ 7.600	I+D Electrónica	CII 48D#65A-35 Medellín	ESCUELA
2	Cable Dupont M/M 30 [cm]		\$ 2.000	\$ 4.000			ESTUDIANTE
1	Módulo Termolon	Ref: Max6675 2,62 mm espesor / 209,22 mm diametro interior	\$ 35.000	\$ 35.000			ESTUDIANTE
1	Abrazadera inox	Sanit (F) 6" tipo Clamp	\$ 119.328	\$ 119.328	Tecnicauchos y Plásticos	Cra 19#22-12	ESTUDIANTE
1	Ferula corta	Sanit 6" tipo Clamp	\$ 92.857	\$ 92.857	Industrias IMR SAS	CII 24-14-48Bgm	ESCUELA
1	Tapon inox	Sanit (G) 6" tipo Clamp	\$137.815	\$ 137.815	Industrias IMR SAS	CII 24-14-48Bgm	ESCUELA
1	Empaque siliconado	Sanit 6"	\$ 21.849	\$ 21.849	Industrias IMR SAS	CII 24-14-48Bgm	ESCUELA
6 metros	Tubo redondo	1/2" C18 INOX 304	\$ 47.059	\$ 47.059	Industrias IMR SAS	CII 24-14-48Bgm	ESCUELA
9	Tubo redondo	1/2" C18 INOX 304	\$ 94.500	\$ 94.500	Ferreteria Pacho	CIIe 28#12-17	ESCUELA
1	Lamina 1x1m2	C16 INOX 304	\$460.000	\$ 460.000	Ferreteria Pacho	CIIe 28#12-18	ESCUELA
1	Corte	Inox 6"	\$ 24.538	\$ 24.538	Industrias IMR SAS	CII 24-14-48Bgm	ESCUELA
1	Corte	Inox 3"	\$ 12.857	\$ 12.857	Industrias IMR SAS	CII 24-14-48Bgm	ESCUELA
2	Sueldar	Inox 6"	\$ 85.714	\$ 171.428	Industrias IMR SAS	CII 24-14-48Bgm	ESCUELA

1	Sueldar	Inox 3"	\$ 50.420	\$ 50.420	Industrias IMR SAS	CII 24-14- 48Bgm	ESCUELA
1	Ruana	Inox (J) 6"	\$166.050	\$ 166.050	Industrias IMR SAS	CII 24-14- 48Bgm	ESCUELA
1	Varios		\$450.000	\$ 450.000	Industrias IMR SAS	CII 24-14- 48Bgm	ESCUELA
1	Varios		\$700.000	\$ 700.000			ESTUDIANTE
1	Fibra de vidrio	Frescasa Eco 2-1/2"	\$112.000	\$ 112.000	Homecenter	Cra 21#45-02 Bgm	PROFESOR
2	Costo/hora Ingeniero	Trabajo de 2 meses	\$ 12.363	\$ 9.494.784			
1	Costo/hora profesores	17 horas por el proyecto	\$ 40.000	\$ 680.000			ESCUELA
			TOTAL	\$ 13.192.726			

5. Conclusiones

Este proyecto de grado permitió desarrollar un dispositivo funcional para la determinación del poder calorífico superior PCS de gases combustibles, basados en el concepto de un calorímetro Junkers. Este dispositivo de diseño teniendo como criterios prioritarios: su bajo costo, fácil mantenimiento, fácil manufactura y buen desempeño fueron prioritarios.

Mediante este dispositivo funcional fue posible realizar la medición experimental del Poder Calorífico Superior del gas natural disponible en el Laboratorio de Sistemas Térmicos. A pesar de que no se conocía la composición química exacta del gas natural, se utilizó como composición de referencia la sugerida por la empresa comercializadora VANTI S.A.ESP. Siendo así, los errores determinados fueron inferiores al 10%.

Los resultados favorables del banco de pruebas permiten colocar a disposición de la Escuela de Ingeniería Mecánica, y en particular, de los Laboratorios de Sistemas Térmicos y de Combustión, para su uso pedagógico de las disciplinas relacionadas con el área térmica.

De igual manera, es importante agregar que, a partir de la estructuración de competencias educativas, manual de operación, guía de laboratorio y practicidad en operación con el banco, fue posible aportar al enfoque pedagógico esperado del proyecto.

El desarrollo de este proyecto permitió demostrar la aplicabilidad de los conocimientos de diseño de sistemas térmicos. Puesto que se construyó el banco de pruebas para calorimetría de flujo con resultados óptimos. Además, se enfocó en el aprendizaje práctico de los estudiantes de ingeniería mecánica, pues proporcionará a los estudiantes una experiencia práctica y significativa para aplicar y reforzar sus conocimientos teóricos.

6. Recomendaciones

En el diseño actual del dispositivo funcional se pueden identificar algunas modificaciones que pueden mejorar los resultados experimentales, así como facilitar su operación. Los errores presentados en el cálculo se pueden asociar a un inadecuado sistema de control de flujo de suministro de gas. El medidor de gas utilizado durante las prácticas es un medidor que no es el adecuado para un dispositivo de alta precisión, de manera que se sugiere su cambio por un rotámetro especializado para gas natural o medidor de flujo de tambor húmedo. Estos últimos no fueron utilizados debido a su alto costo.

Para verificar la precisión real del dispositivo funcional en el cálculo experimental del poder calorífico, se sugiere utilizar gases combustibles patrones (como propano, metano, etc.) de alta pureza.

Durante la realización de las pruebas el sistema hidráulico se manejó en una configuración abierta. Es decir, no se recirculaba el agua que se utilizaba en el calorímetro, y por lo tanto esto se traduce en un mayor consumo de agua. Para ello se sugiere, utilizar una torre de enfriamiento que permite mantener el sistema en un lazo cerrado que economice su consumo.

La estructura del dispositivo funcional también se puede mejorar para que el sistema sea más compacto y que la pruebas se puedan realizar de una forma más cómoda.

Ejecutar un sistema de recolección y procesamiento para el manejo de los gases de combustión que el equipo emite al entorno.

Finalmente, se sugiere realizar un modelo matemático que describa detalladamente el fenómeno de transferencia de calor y que incluya todos los mecanismos que participan en la operación del calorímetro. Esto se puede realizar mediante un análisis de discretización del sistema que incluya: la radiación simultánea entre paredes radiantes y entre los gases participantes con una

superficie; la convección de los gases de combustión con todas las superficies internas del calorímetro; la convección del agua en el interior del tubo helicoidal; y finalmente las pérdidas por conducción a través de las paredes del calorímetro.

Referencias Bibliográficas

- Cengel Y. A, B. M. (2014). *Termodinámica*. New York, USA: McGrawHill.
- Cengel Y. A, Ghajar A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: McGrawHill.
- Ciencia y medio ambiente. (2 de Abril de 2014). *Universidad Autónoma de Occidente*. Obtenido de <https://www.uao.edu.co/agencia-de-noticias/ciencia-y-medio-ambiente/el-calor-revela-los-secretos-de-los-materiales/>
- Gas natural y medio ambiente. (2015). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de <https://energia.gob.es/gas/Gas/Paginas/gasnatural.aspx>
- Gonzales J, C. L. (27 de Octubre de 2021). *Calorimetría adiabática y sus aplicaciones*. El Marqués, Queretaro, Mexico.
- Hottel H. C, Sarofim A. F. (1967). *Radiative transfer*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Incropera. F.P & DeWitt. D. P. (2011). *Fundamentos de transferencia de calor*. Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc.
- Instituto de investigación de zonas desérticas. (Abril de 2012). *Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000400004
- Irena. (2011). *Irena*. Obtenido de <https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Policies-for-green-hydrogen>
- Kembel, G. (2005). *Se aprende haciendo y no escuchando a un profesor*. (A. T. Menárguez, Entrevistador)

Menárguez, A. T. (2016). *WCMCF*. Obtenido de <https://webdelmaestrocmf.com/portal/se-aprende-no-escuchando-profesor/>

Pinhero P. C. (Diciembre de 1999). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/323017992_Curso_de_Combustao_de_Combustiveis_Gasosos_-_1999

Rebolledo, P. A. (2008). *Repositorio UniAndes*. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20628/u335943.pdf?sequence=1#:~:text=El%20calor%C3%ADmetro%20de%20flujo%20Junkers,de%20un%20gas%20%5B1%5D>.

Universidad Tecnológica Nacional. (2016). *Determinación del calor de combustión mediante la bomba calorimétrica*. Obtenido de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/fisicoquimica/files/TP%20BOMBA%20CALORIMETRICA_2016%20v2.pdf.

Verein Deutscher Ingenieure. (2010). En *VDI Heat Atlas* (pág. 711). Springer.

Zamora, A. (5 de Febrero de 2018). *Laboratorio de Ciencia Básica II Ingeniería Química FES Zaragoza*. . Obtenido de <https://laboiqzamora.wordpress.com/blog/page/2/>

Anexos

Anexo A. Planos del intercambiador de calor.

Figura A1. Plano isométrico conjunto general.



Figura A2. Plano isométrico conjunto intercambiador de calor.

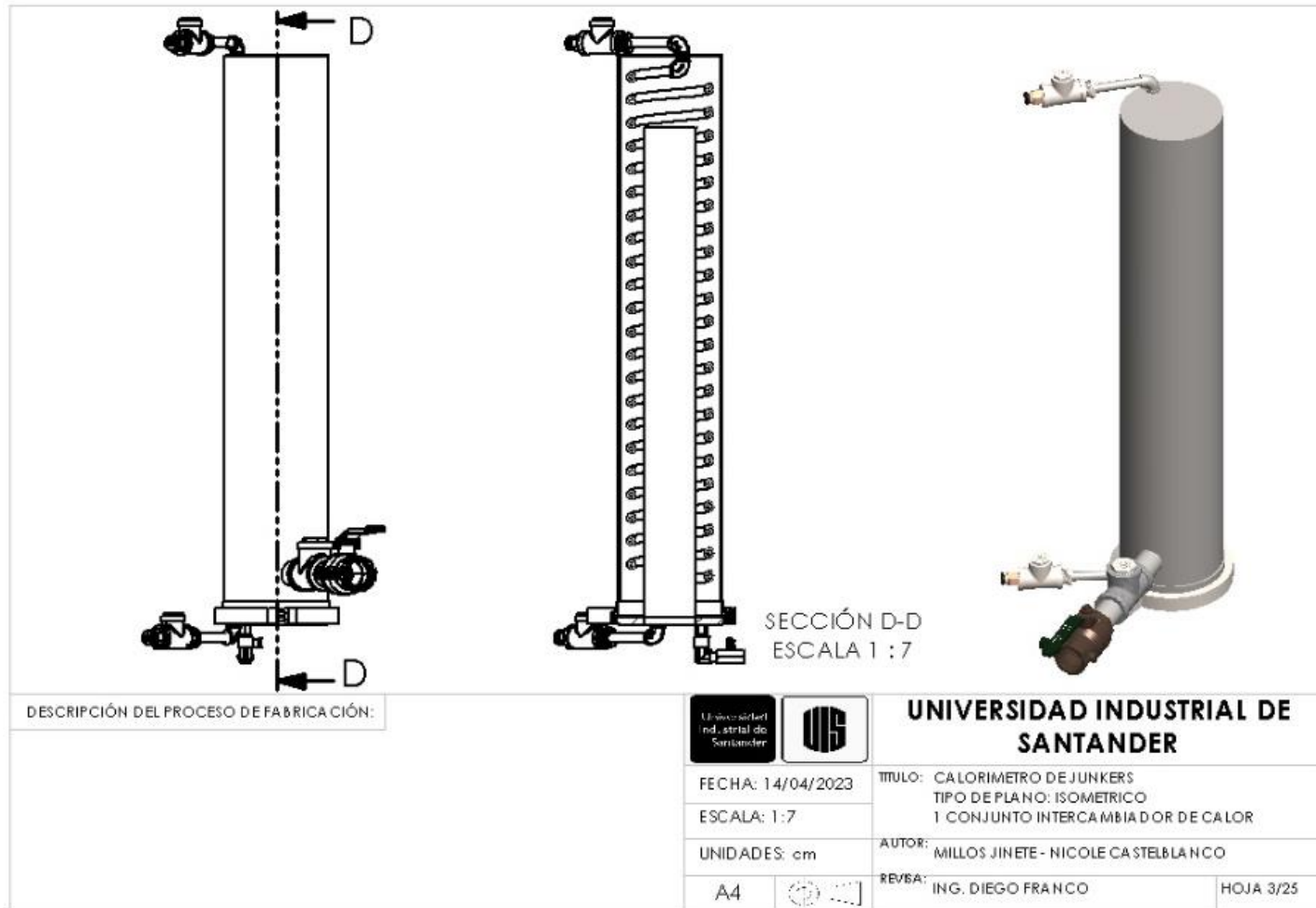


Figura A3. Plano explosionado conjunto intercambiador de calor.



Figura A4. Plano isométrica conjunto cilindro exterior.



Figura A5. Plano explosionado conjunto cilindro exterior.

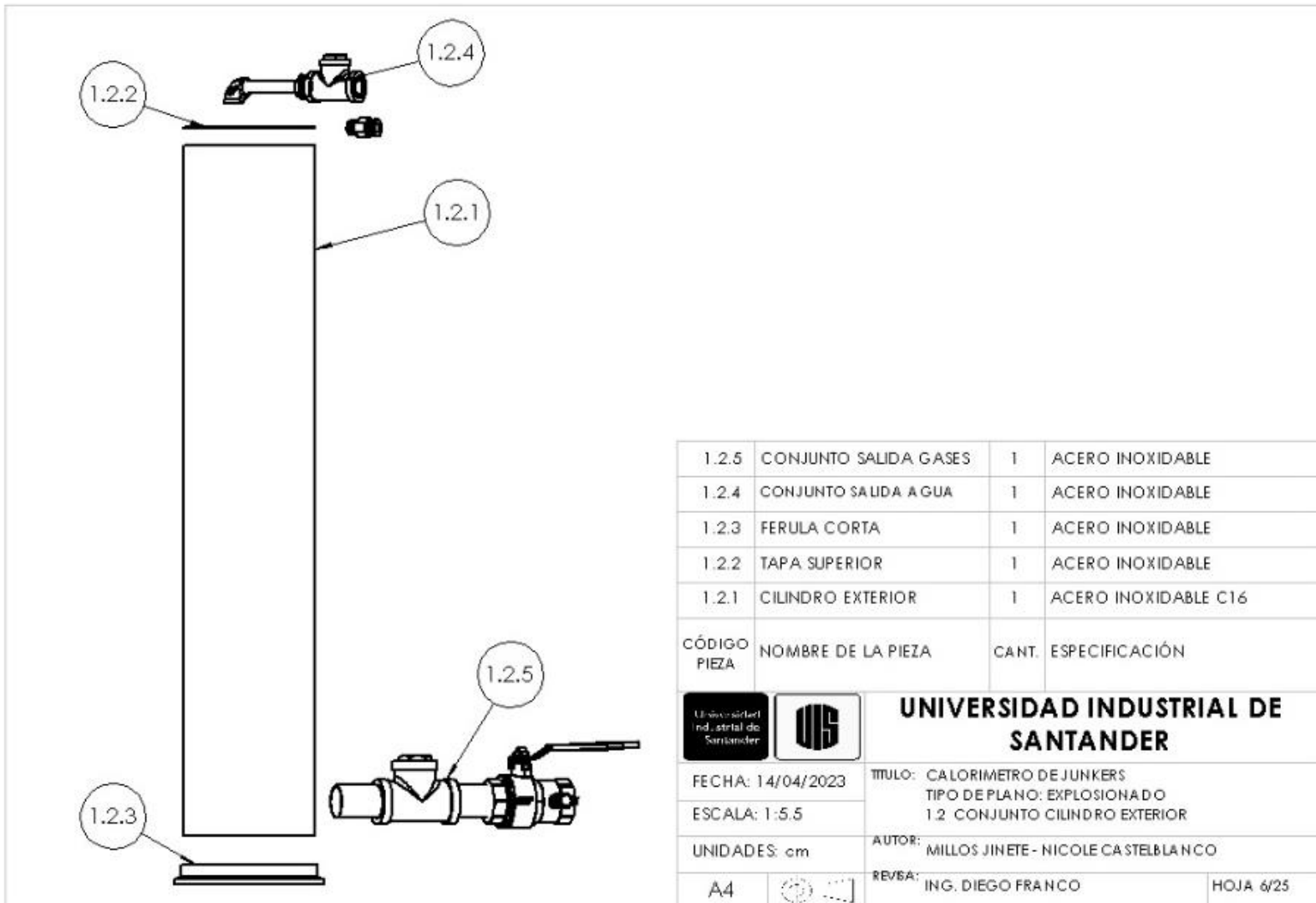


Figura A6. Plano de pieza cilindro exterior.

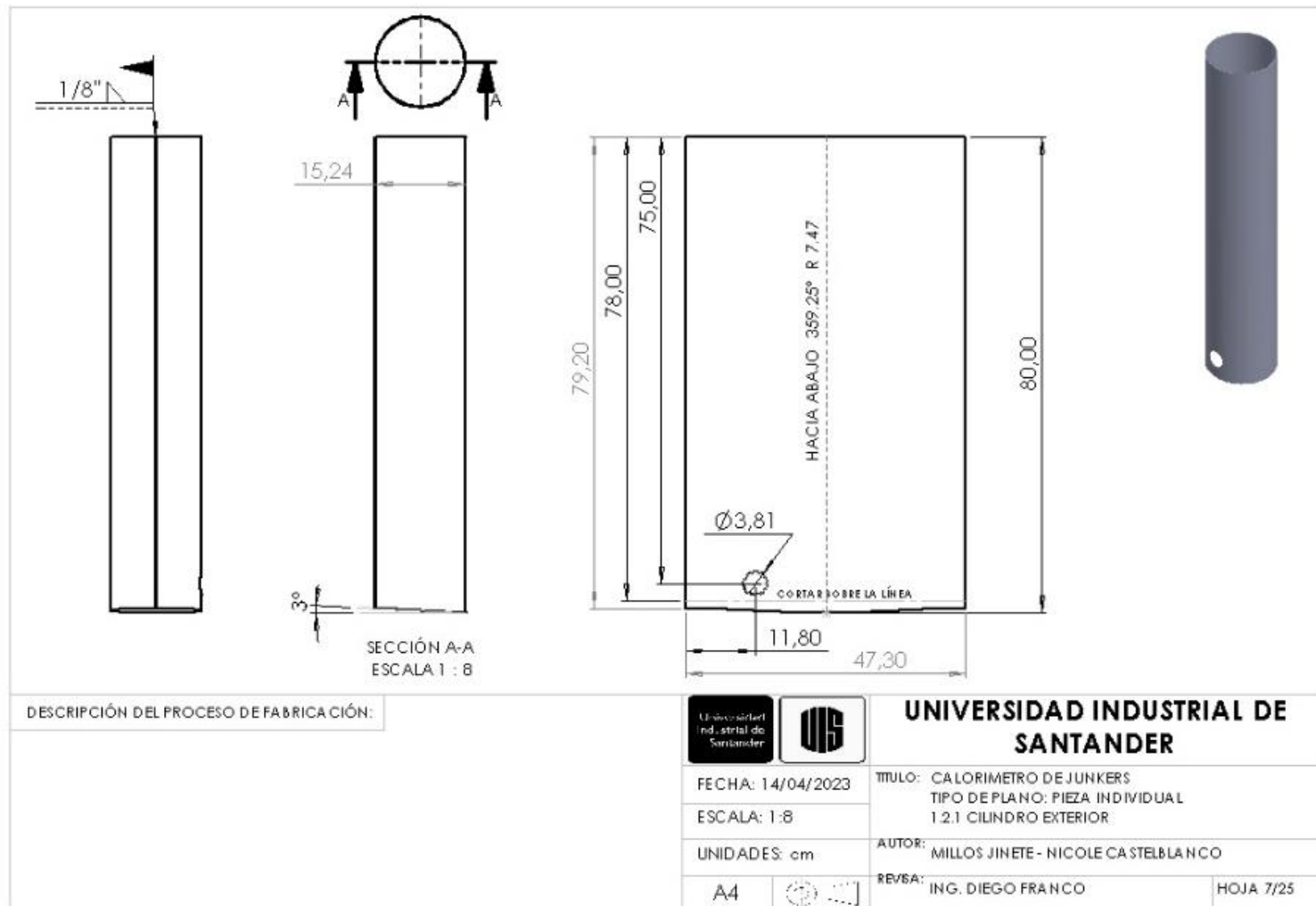


Figura A7. Plano de pieza tapa superior.

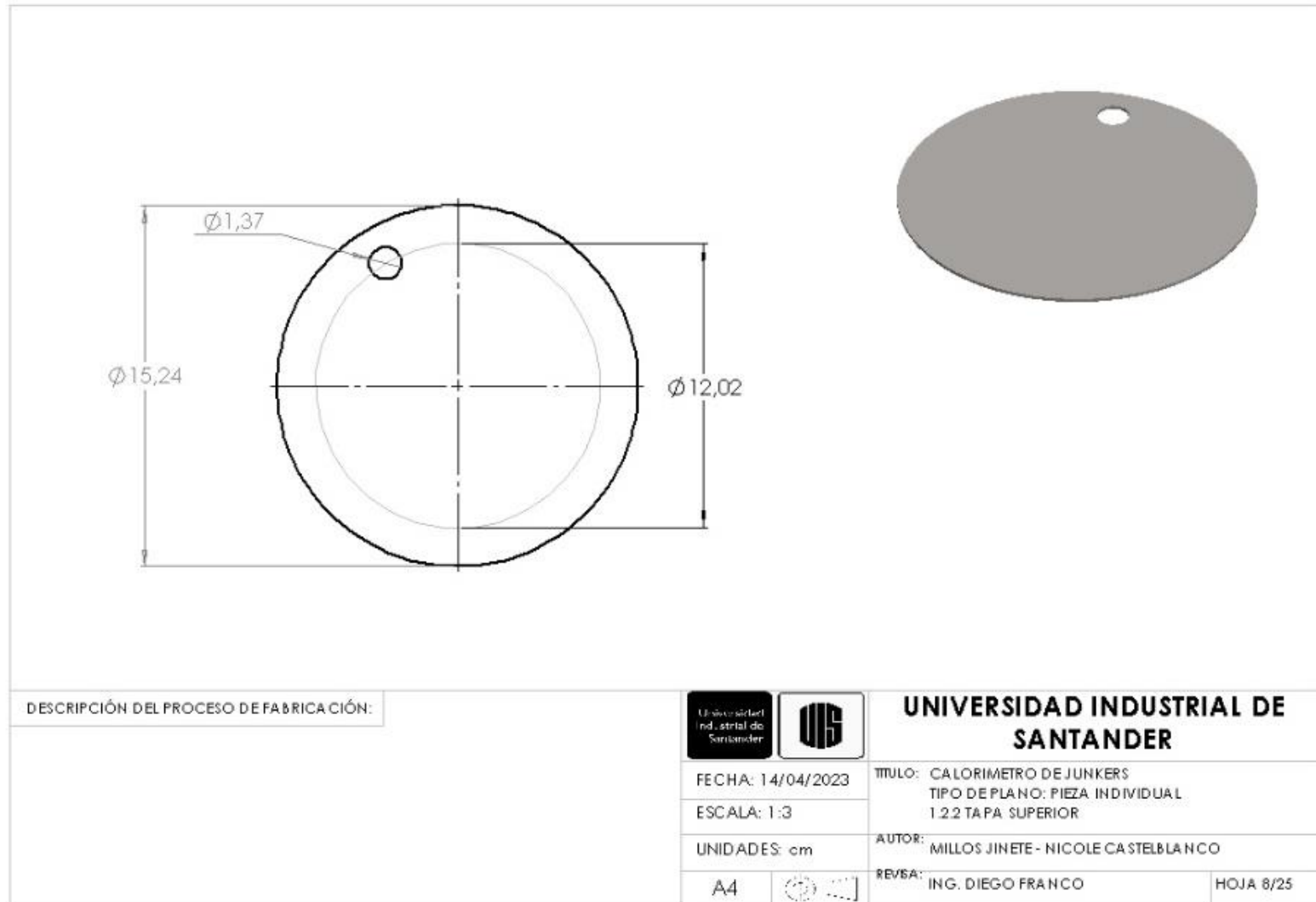


Figura A8. Plano vista isométrica conjunto salida de agua.



Figura A9. Plano vista isométrica conjunto salida gases.



Figura A10. Plano vista isométrica conjunto cilindro interior.



Figura A11. Plano vista explosionada conjunto cilindro interior.

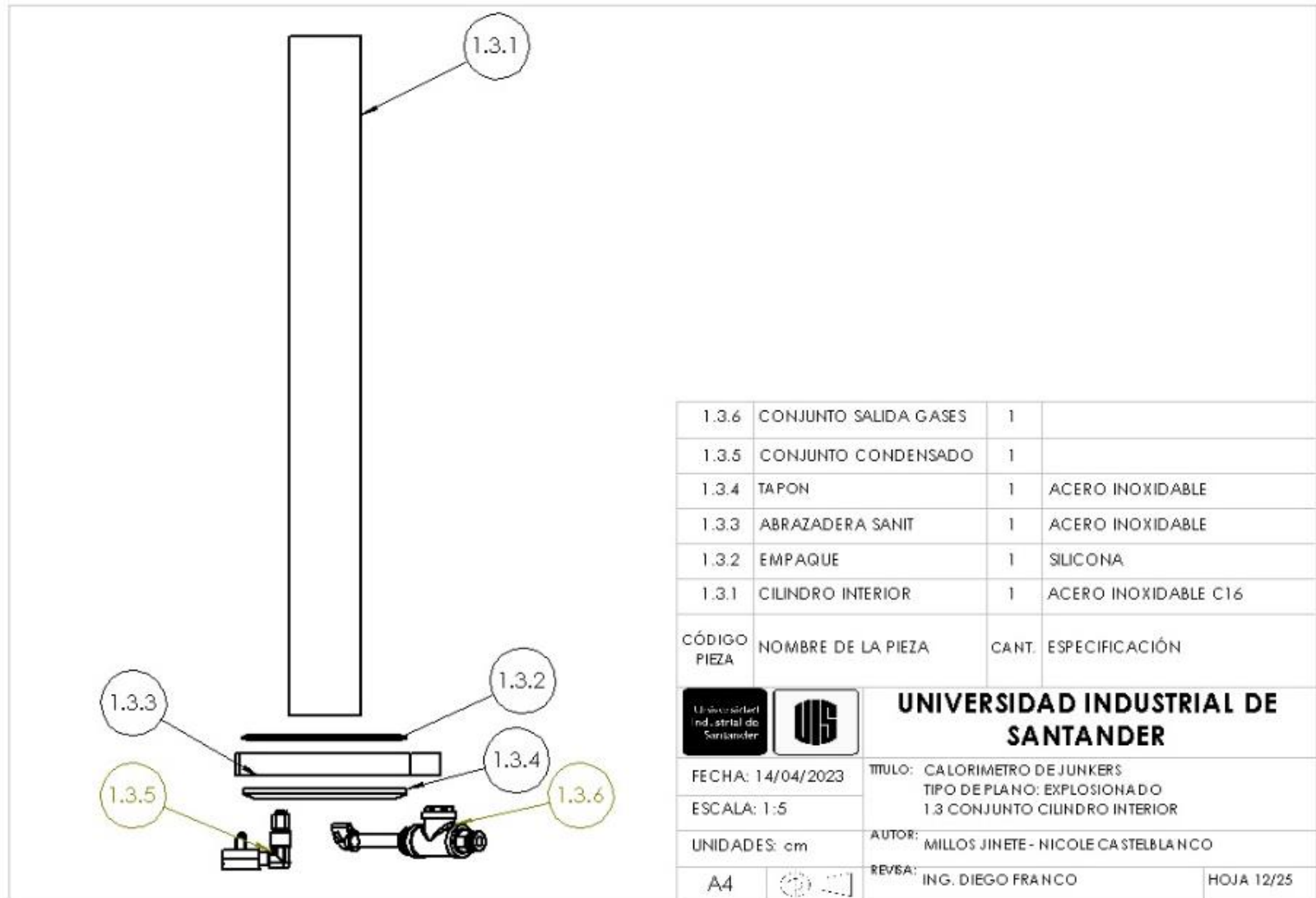


Figura A12. Plano pieza individual cilindro interior.

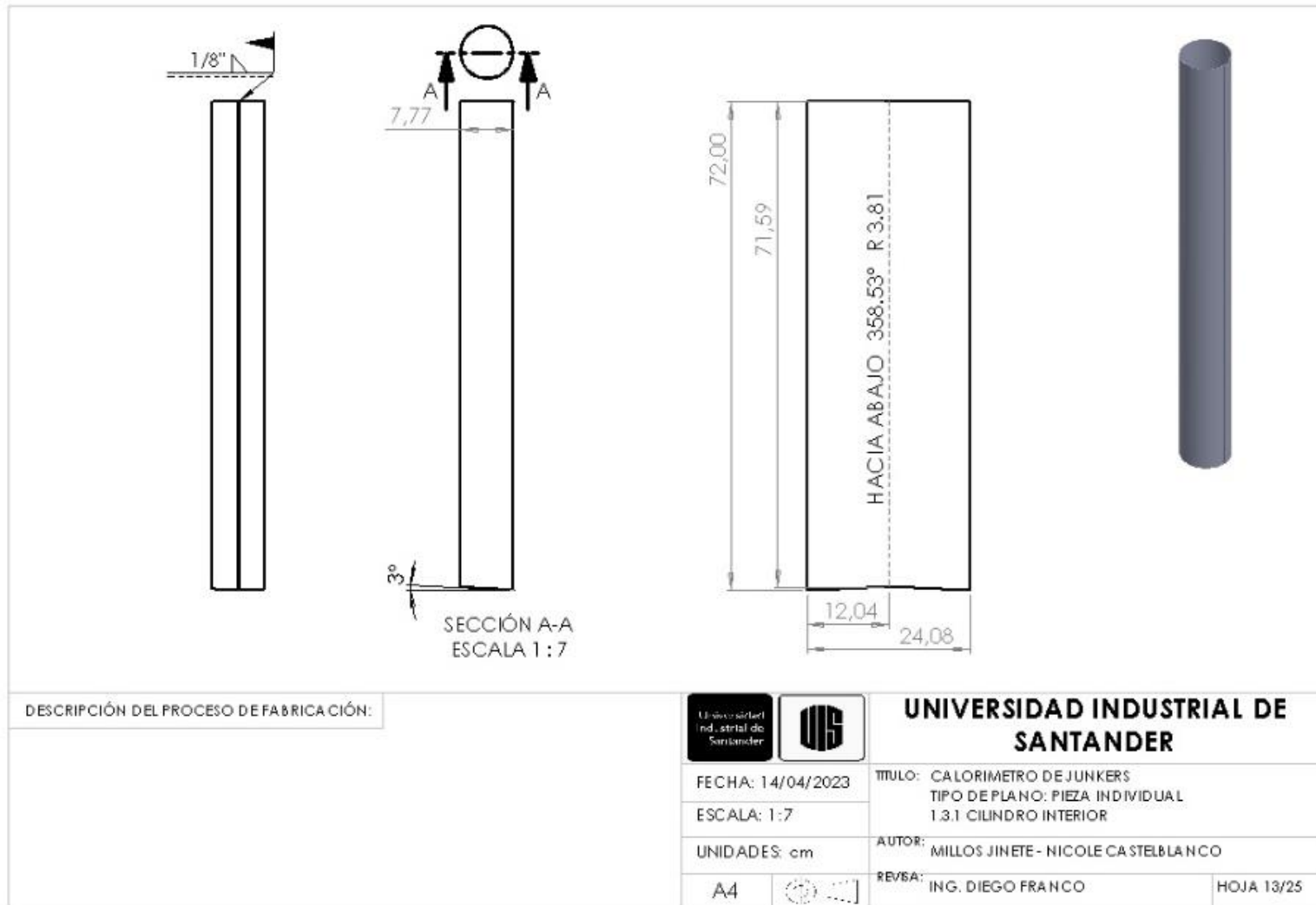


Figura A13. Plano pieza individual tapón.



Figura A14. Plano vista isométrica conjunto condensado.



Figura A15. Plano vista isométrica conjunto entrada agua.



Figura A16. Plano vista isométrica conjunto espiral helicoidal.



Figura A17. Plano vista explosionada conjunto espiral helicoidal.

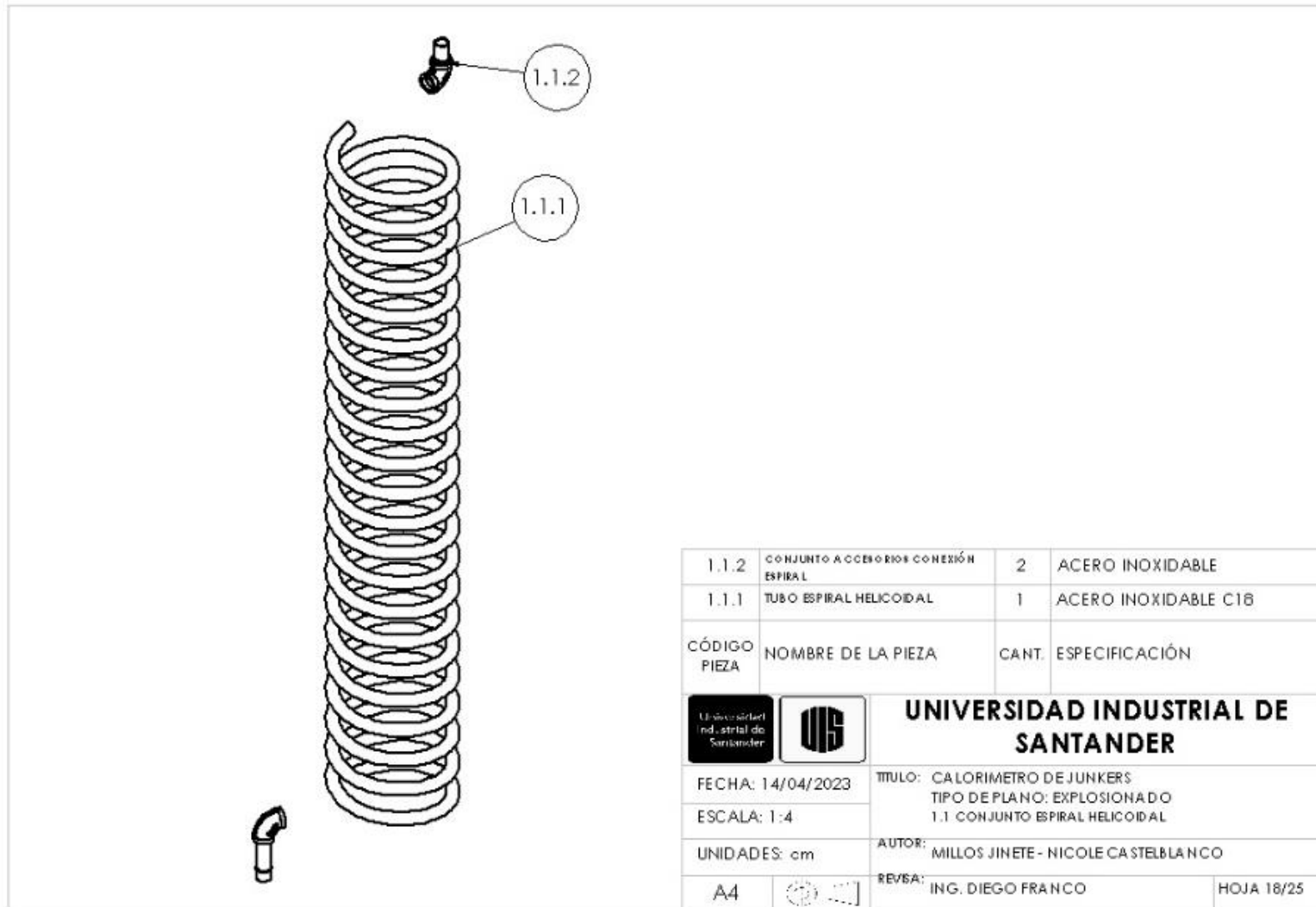


Figura A18. Plano pieza individual tubo espiral helicoidal.

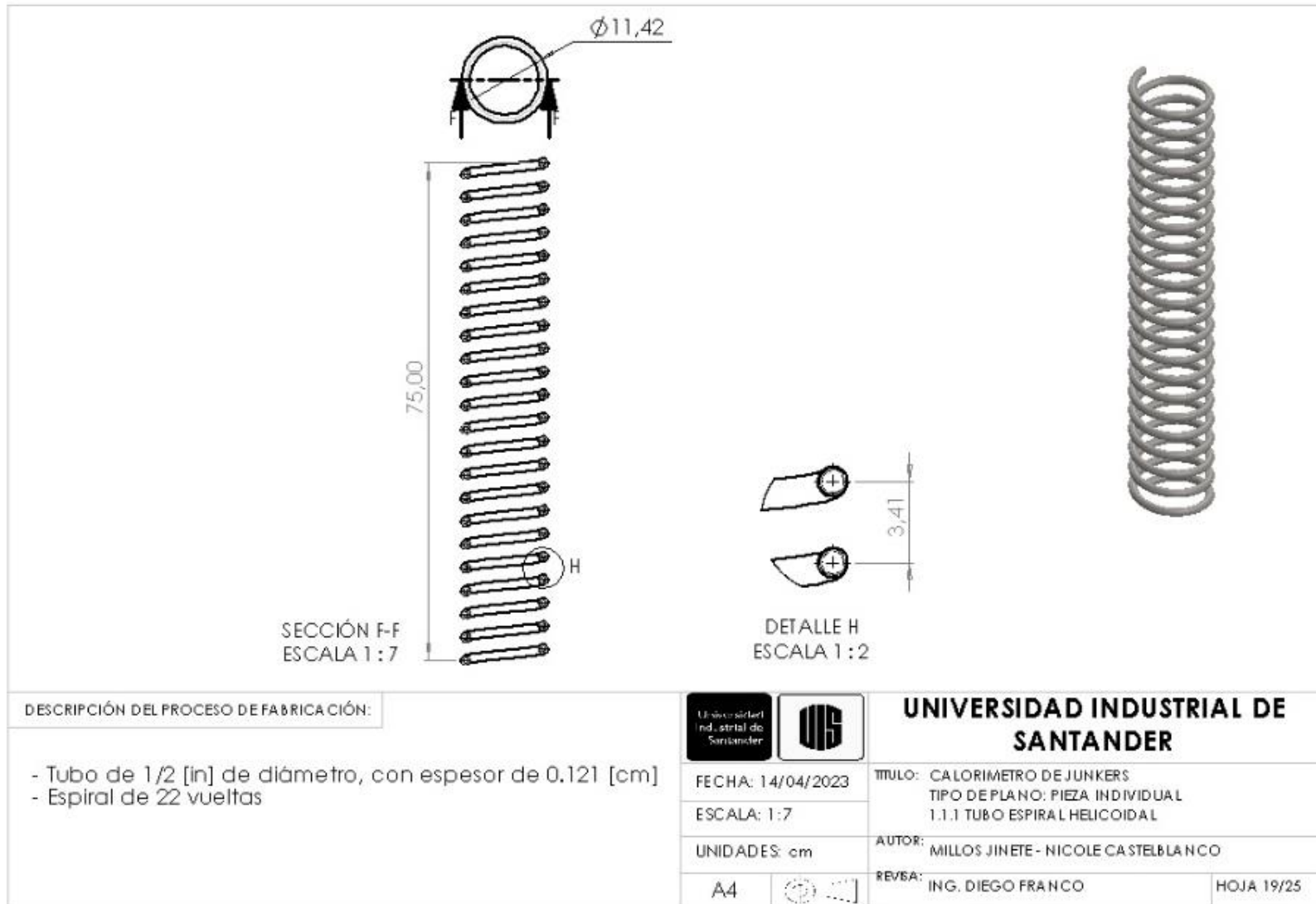


Figura A19. Plano vista isométrica conjunto accesorio espiral.



Figura A20. Plano vista isométrica conjunto estructural.

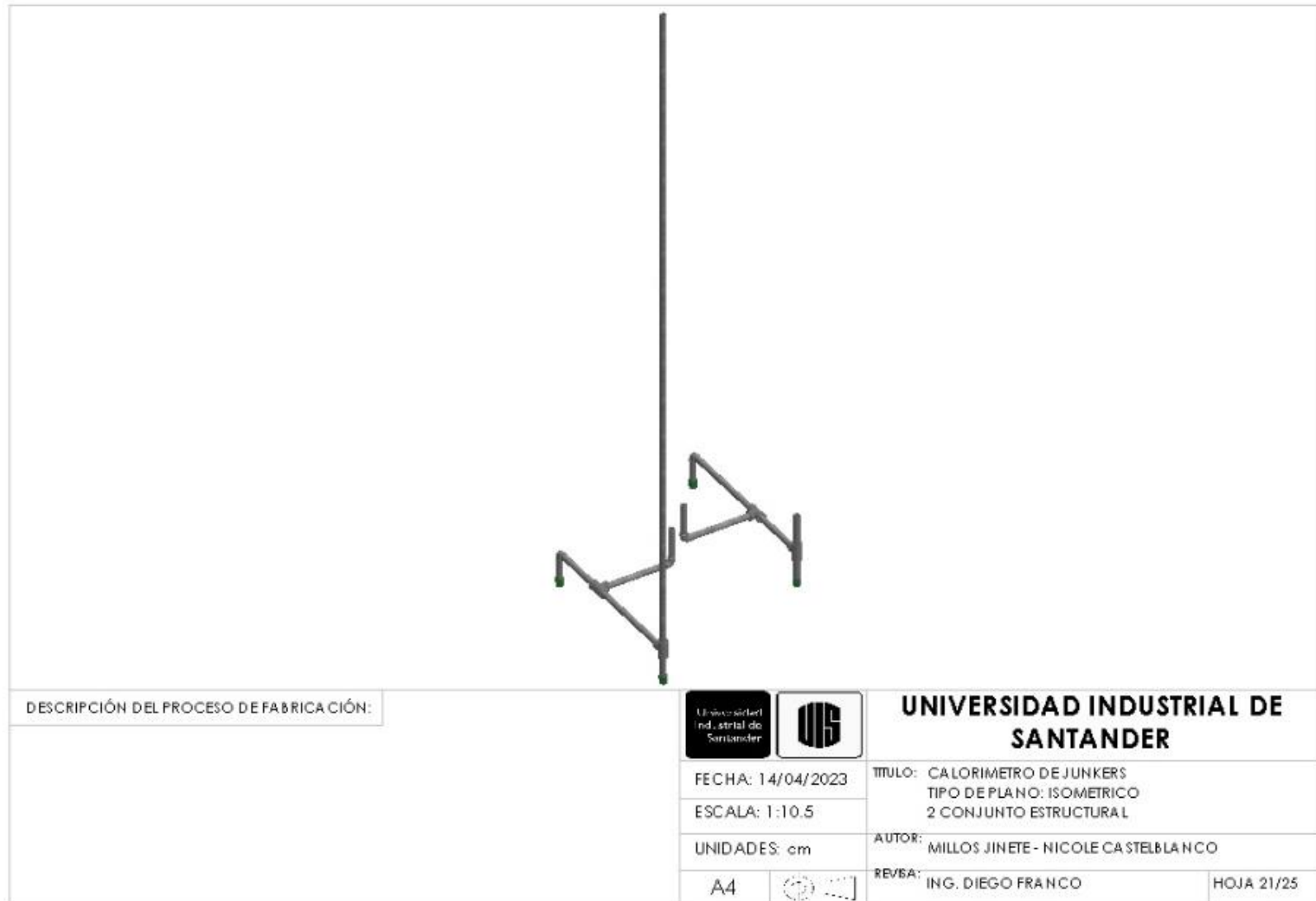


Figura A21. Plano vista explosionada conjunto estructural.

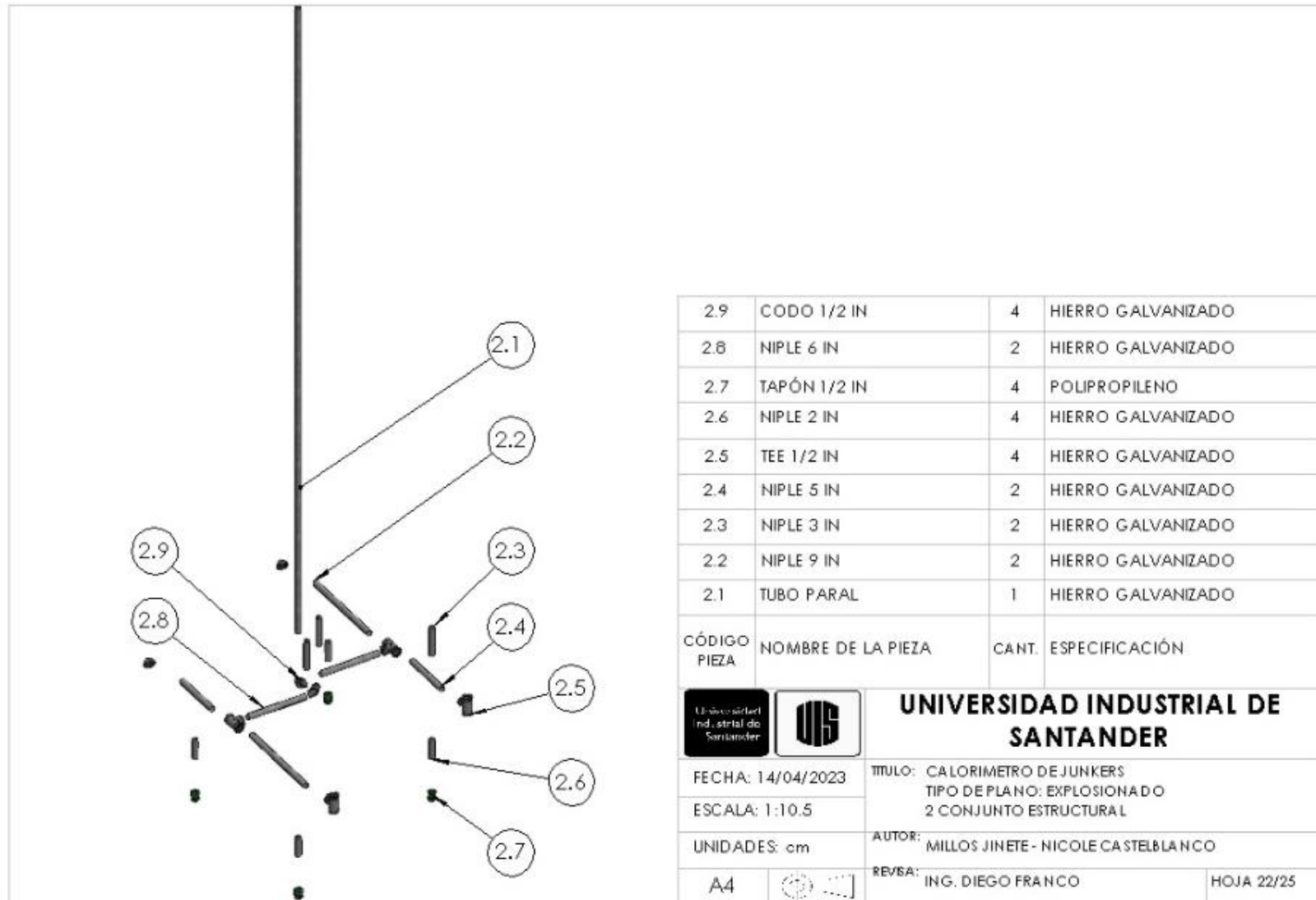


Figura A22. Plano vista isométrica conjunto vaso precipitado.



Figura A23. Plano vista explosionada conjunto vaso precipitado.

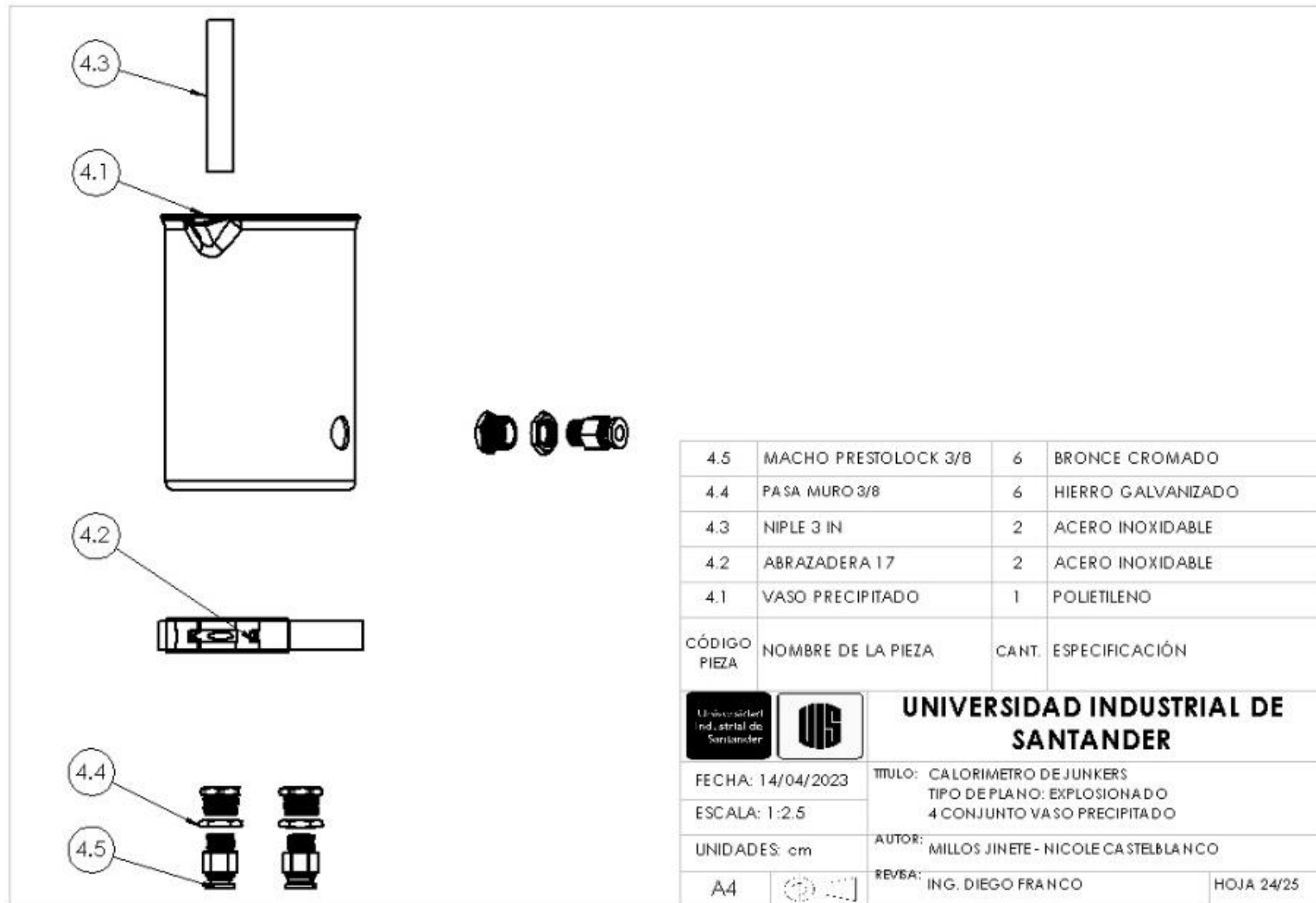
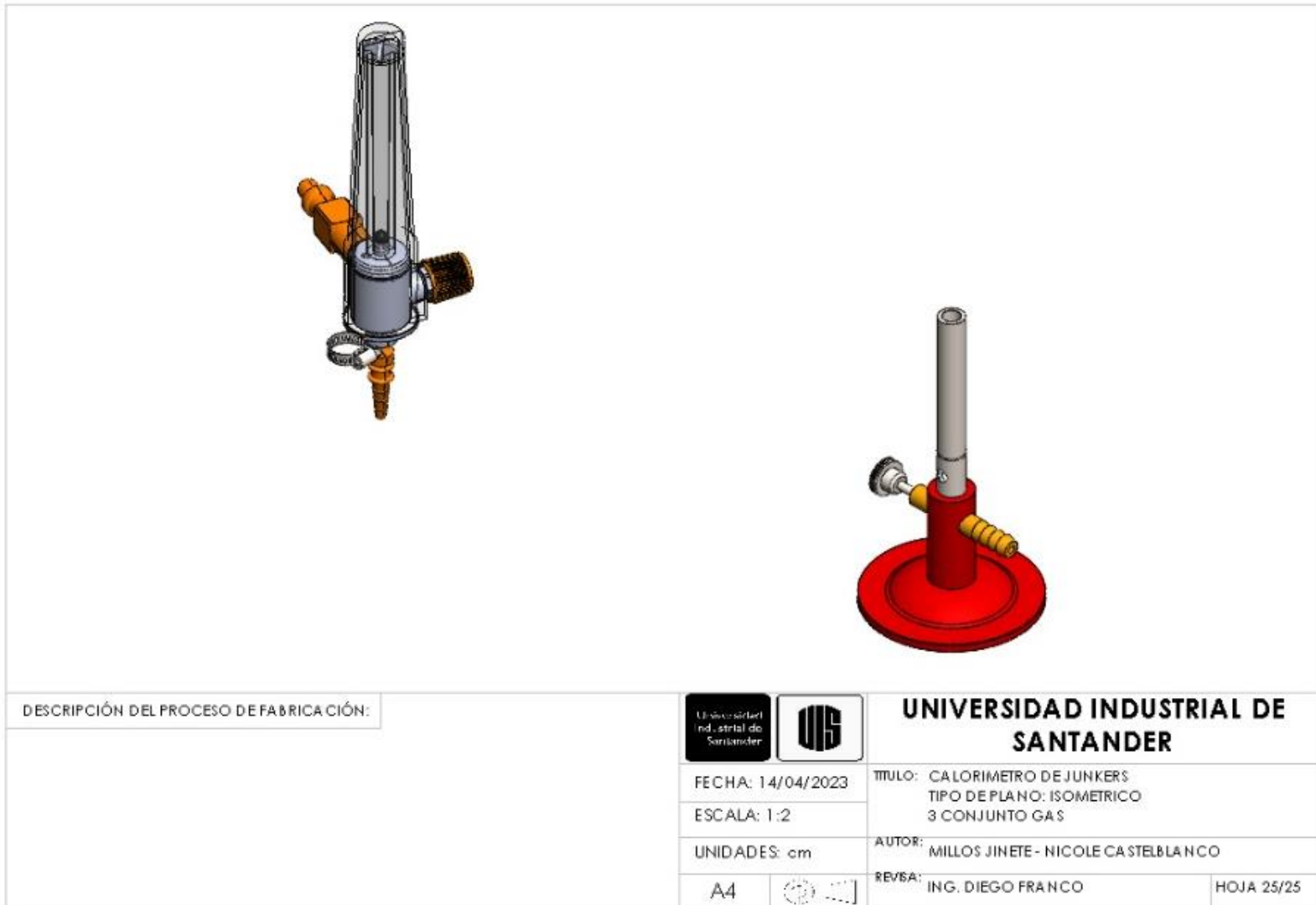


Figura A24. Plano vista isométrica conjunto gas.



Anexo B. Código en Python utilizado para el análisis térmico y el dimensionamiento del dispositivo funcional.

A continuación, se presenta el código utilizado durante el proceso de análisis térmico y dimensionamiento del intercambiador, este código fue realizado en el lenguaje python (versión 3.10.9), utilizando las librerías CoolProp para la determinación de las propiedades termodinámicas de las sustancias puras, la librería Matplotlib para graficar y la librería math para algunos métodos y facilidad de cálculos.

```
# CALCULO CALOR NETO
#Libraries
%matplotlib inline
import matplotlib.pyplot as mp
import CoolProp.CoolProp as CP
import numpy as np
import math as mt

#Initial conditions for design
flow_gn = 100 #[L/h] #volumetric flow initial condition
R_u = 0.08205 #[atm*L/mol*K] gas universal constant
d_i = 0.0762 #[m] inner diameter shell
d_o = 0.1524 #[m] outer diameter shell
d_w = 0.0127 #[m] water's diameter spiral tube
d_e = (d_i+d_o)/2
P_atm_bga = 90888.525 # [Pa] según vantí
P_atm = 1 #atm , 101325 Pa
T_ad = 2300 #[K]
Tw_sup = 50+273.15 #[K] temperatura de superficie
Tg_out = 27+273.15 #[K]
T_rocio = 55.8 #[C] temperatura de rocío en bga Pi(H2O)=0.163 atm (valor
tomado de tabla A-5 termod.cengel)
stfb = 5.670e-8 #cte stefan boltzman
Re_crit = 2300 # número de reynolds critico

#DICTIONARIES*****
#natural gas composition from vantí mol/mol
gn ={#fracciones molares reactivos
    "CH4":0.8186,
    "C2H6":0.1161,
    "C3H8":0.0192,
    "C4H10":4.5*10**-3,
    "N2":9*10**-3,
    "CO2":0.0318
}
```

```

#molar mass of each component of natural gas Kg/mol
mM = { "CH4":CP.PropsSI('M', 'CH4'),
       "C2H6":CP.PropsSI('M', 'ethane'),
       "C3H8":CP.PropsSI('M', 'C3H8'),
       "C4H10":CP.PropsSI('M', 'Butane'),
       "N2":CP.PropsSI('M', 'N2'),
       "CO2":CP.PropsSI('M', 'CO2')
}

#products natural gas composition
gn_p = { #fracciones molares de los productos humedos del gas natural en
condiciones estequiometricas
       "CO2":0.1015,
       "N2":0.7156,
       "H2O":0.1827
}

#natural gas products without water
gn_pw = {#fracciones molares de los productos secos del gas natural en
condiciones estequiometricas
       "CO2":0.1242,
       "N2":0.8757,
}

#prandtl numbers of natural gas products
pprandtl = { #numeros de prandtl a 2300K y 1 atm , tomados de Transf.deCalor
cengel
       "CO2":0.8815,
       "N2":0.4483,
       "H2O":0.7833
}

#prandtl numbers of natural gas products
ppprandtl = { #numeros de prandtl a 1000C y 1 atm , tomados de Transf.deCalor
cengel
       "CO2":0.7455,
       "N2":0.7022,
       "H2O":0.8639
}

#thermal conductivity of natural gas products
cconductivity = { #conductividad térmica a 2300K y 1 atm , tomados de
Transf.deCalor cengel
       "CO2":0.1152,
       "N2":0.1859,
       "H2O":0.2918
}

#Molar mass of each product of natural gas Kg/mol
mM_p = {

```

```

"CO2":CP.PropsSI('M', 'CO2'),
"N2":CP.PropsSI('M', 'N2'),
"H2O":CP.PropsSI('M', 'H2O')
}

#Formation enthalpy(25C,1atm)[kJ/kmol] tomado de turns
hf = {
    "CH4":-74873,
    "C2H6":-84670,
    "C3H8":-103800,
    "C4H10":-127100,
    "N2":0,
    "CO2":-393522,
    "H2O":-285830
}

#FUNCTIONS*****
#function for browsing the dictionaries
def browse(dictionary):
    #print(dictionary)
    value = ''
    for i in dictionary:
        value += i + " " + ":" + " " + str(dictionary[i]) + "\n"
    print(value)

#function for showing the heat exchanger dimensions
def showSize():
    print(f"\t Área del Intercambiador:{A:.3f}[m^2]\n \t Longitud
Intercambiador(Sección anular):{L_inter:.3f}[m]\n \
\t Longitud tubería agua: {L_tubo:.3f}[m]\n \t Número de espiras:
{cont+1}")

#function for calculating the dinamic viscosity of natural gas products
def dinaViscosity(T,P,fgn_p):#(temp,presión,fracciones molares productos)
    miuSum = 0 #acumulador
    if T<(T_rocio+273.15):#temperatura de rocío vapor de agua condiciones
estándar
        miu_p = {
            "CO2":CP.PropsSI('V', 'T', T, 'P', P, "CO2"),
            "N2":CP.PropsSI('V', 'T', T, 'P', P, "N2")
        }
        miuSum = ((gn_pw["CO2"]*miu_p["CO2"])+(gn_pw["N2"]*miu_p["N2"]))
    else:
        miu_p = {
            "CO2":CP.PropsSI('V', 'T', T, 'P', P, "CO2"),
            "N2":CP.PropsSI('V', 'T', T, 'P', P, "N2"),
            "H2O":CP.PropsSI('V', 'T', T, 'P', P, "H2O")
        }
        for i in (miu_p):
            miuSum += miu_p[i]*fgn_p[i]

```

```

    return miuSum #devuelve la viscosidad dinámica de los productos[Kg/m*s]

#for calculating the prandtl number of the natural gas products
def prandtl(T,P,fgn_pw,fprandtl,fgn_p): #(Kelvin,pascal,dic_GNproductos sin
agua,dic_#prandtl,dic_fracc.mol.prod)
    Pr = 0
    if T<T_rocio+273.15: #si está por debajo de la temperatura de rocío no
tiene en cuenta el agua
        for i in fgn_pw:
            Cp = CP.PropsSI('CPMASS', 'T', T, 'P', P, i)
            mu = CP.PropsSI('VISCOSITY', 'T', T, 'P', P, i)
            k = CP.PropsSI('CONDUCTIVITY', 'T', T, 'P', P, i)
            Pr += ((Cp * mu) / k)*fgn_pw[i]
    else:
        for i in fgn_p:
            Pr += fprandtl[i]*fgn_p[i]
    return Pr

#for calculating the thermal conductivity of natural gas products
def conductivity
(T,P,fgn_pw,fconductivity,fgn_p): #(Kelvin,pascal,dic_GNproductos sin
agua,dic_condc.térmod.prod,dic_fracc.mol.prod)
    kc = 0
    if T<T_rocio+273.15: #si está por debajo de la temperatura de rocío no
tiene en cuenta el agua
        for i in fgn_pw:
            k = CP.PropsSI('CONDUCTIVITY', 'T', T, 'P', P, i)
            kc += k*fgn_pw[i]
    else:
        for i in fgn_p:
            kc += fconductivity[i]*fgn_p[i]
    return kc

#Function for caculating the water properties
def wProperties(T,P,fluid): #(Celsius, Pascal) calcula las propiedades de
cualquier fluido
    rho = CP.PropsSI('D', 'T', T+273.15, 'P', P, fluid) #[Kg/m^3]
    mu = CP.PropsSI('V', 'T', T+273.15, 'P', P, fluid) #[Kg/m*s]
    Cp = CP.PropsSI('CPMASS', 'T', T+273.15, 'P', P, fluid)/1000 #[Kj/Kg*K]
    k = CP.PropsSI('CONDUCTIVITY', 'T', T+273.15, 'P', P, fluid) #[W/m*K]
    Pr = ((Cp * mu) / k)*1000
    return rho,mu,Cp,k,Pr

#function for calculating the natural gas density [reactivos]
def density(T,P,fgn,fnM): #(T[C],P[atm],fgn[gas natural
composition],fnM[molar mass])
    v = (R_u*(T+273.15))/P #[L/mol]
    vSum = 0
    for i in gn:
        vSum += ((fgn[i]*v)/fnM[i])/1000 #[m^3/Kg]
    return 1/vSum #devuelve la densidad del gas [kg/m^3]

```

```

#function for calculating the products natural gas density
def pdensity(T,P,fgn_p,fmM_p):#(temp,presión,fracciones molares productos,
masa molar productos)
    v = (R_u*(T+273.15))/P #[L/mol]
    vSum = 0
    if T<55.8: #temperatura de rocío vapor de agua condiciones estándar
        vSum
    =(gn_pw["CO2"]*(v/fmM_p["CO2"]))+(gn_pw["N2"]*(v/fmM_p["N2"]))/1000
    #[m^3/Kg]
    else:
        for i in gnp:
            vSum += ((fgn_p[i]*v)/fmM_p[i])/1000 #[m^3/Kg]
    return 1/vSum #devuelve la densidad del gas [kg/m^3]

#Function for calculating the experimental HHV and the error rate
def fHHV(VH2O,VGas,T1,T2): #(lpm,lpm,Celsius,Celsius,Pascal)
    T_prom = (T1+T2)/2
    Cp_prom = CP.PropsSI('CPMASS', 'T', T_prom+273.15, 'P', 90888.525 ,
'H2O')/1000 #[Kj/Kg*K]
    rhow_prom = CP.PropsSI('D', 'T', T_prom+273.15, 'P', 90888.525 , 'H2O')
#[Kg/m^3]
    rho_gas = density(25,0.897,gn,mM) #Tamb,PatmBGA,componentesGN,MasaMolarGN
    delta_T = T2-T1
    pcs = (Cp_prom*rhow_prom*VH20*delta_T)/(rho_gas*VGas)
    error = abs(((pcs - HHV)/HHV)*100)
    return pcs,error #kJ/Kg
#FUNCTIONS*****

#Stoichiometric balance for natural gas
# {0.8186(CH4) + 0.1161(C2H6) + 0.0192(C3H8) + 4,5x10^-3(C4H10) + 9x10^-3(N2)
+
# 0.0318(CO2)}fuel + {α(O2+3.76N2)}air -> V_CO2(CO2)+V_H2O(H2O)+V_N2(N2)

vCO2 = gn["CH4"]+2*gn["C2H6"]+3*gn["C3H8"]+4*gn["C4H10"]+gn["CO2"]
vH2O = (4*gn["CH4"]+6*gn["C2H6"]+8*gn["C3H8"]+10*gn["C4H10"])/2
alpha = (2*vCO2+vH2O-2*gn["CO2"])/2
vN2 = (2*gn["N2"]+alpha*3.76*2)/2

print("*****COEFICIENTES MOLARES PRODUCTOS*****")
print(f"V_CO2: {vCO2:.4f}\t V_H2O: {vH2O}\t α: {alpha}\t V_N2: {vN2:.4f}")

mM_gn = 0 #declaro la variable acumuladora como cero(masa molar del gas
natural)
for i in gn or mM: #for para recorrer el diccionario
    mM_gn += gn[i]*mM[i]#Kg/mol #sumatoria de la multiplicación de la
cantidad de moles por la masa molar de cada elemento

#calculation of the stoichiometric air-fuel ratio
air_fuel = (4.76*alpha*CP.PropsSI('M','AIR'))/mM_gn #Kg(air)/Kg(fuel)

```

```

#calculation of net molar heat [Kj/Kmol]
q_neto_m = (vCO2*hf["CO2"]+vH2O*hf["H2O"])-
(gn["CH4"]*hf["CH4"]+gn["C2H6"]*hf["C2H6"]+gn["C3H8"]*hf["C3H8"]+gn["C4H10"]*
hf["C4H10"]+gn["CO2"]*hf["CO2"])
q_neto = q_neto_m/(mM_gn*1000) #[Kj/Kg] net heat = HHV

#the net heat is equal to higher heat value qneto=PCS
HHV = abs(q_neto)
print(f"\n \t HHV teórico : {HHV:.3f}[Kj/Kg]")
print(f"\n \t ρ reactivos GN (27°C,1atm) :
{density(27,1,gn,mM):.3f}[Kg/m^3]")

m_dot_fuel = density(27,1,gn,mM)*(flow_gn/1000) #[Kg/h] masic flow of natural
gas
print(f"\n \t m _fuel: {m_dot_fuel:.3f}[Kg/h]")

Q_neto = (q_neto*m_dot_fuel)/3600 #net heat [Kw]
print(f"\n \t Qneto: {Q_neto:.3f}[Kw]")

#masic flow of air
m_dot_air = air_fuel*m_dot_fuel #[Kg(air)/h]
m_dot_total = m_dot_air+m_dot_fuel #[Kg/h]total mass flow of reagents
m_react=m_prod

```

CALCULO COEFICIENTE TOTAL DE TRASNFERENCIA DE CALOR

```

#h_o coef.transferencia de calor convección exterior (GAS)
A_c = ((mt.pi*(d_o**2-d_i**2))/4)-(d_w*(mt.pi*(d_o+d_i)/2)) #[m^2] anular
section area
A_c_sa = ((mt.pi*(d_o**2-d_i**2))/4) #0.01368 #área transversal de la sección
anular

d_mix_prom = (pdensity(2026.85,1,gn_p,mM_p)+pdensity(27,1,gn_p,mM_p))/2
#[Kg/m^3] #densidad promedio (d(Tad)+d(Tg_out))/2

#average gas velocity
ST = (d_e-d_i) #distancia entre el centro de la sección transversal de la
espira hasta la pared del intercambiador
v_gas = m_dot_total/(d_mix_prom*A_c_sa) #[m/h]
v_max = (ST/(ST-(d_w/2)))*v_gas #velocidad máxima del gas [m/h]
print(f"\n \t Velocidad promedio gas: {v_gas:.3f}[m/h]")

perimetro = 2*mt.pi*(d_i+d_o) #[m]perimetro de la sección anular
d_h = 4*A_c/perimetro #[m] diametro hidraulico
L_c = d_h #[m] Longitud caracteristica

#calculo el promedio de la viscodidad dinámica a temperatura de llama ad y
temperatura de salida de los gases

```

```

miu_mix_prom =
(dinaViscosity(2300,101325,gn_p)+dinaViscosity(300,101325,gn_p))/2 #[Kg/m*s]

Re_gas = (d_mix_prom*v_max*L_c)/(miu_mix_prom*3600) #número de reynolds
print(f"\n \t #Reynolds: {Re_gas:.3f}")

#calculo número de prandtl promedio a temperatura de llama ad y temperatura
de salida de los gases
prandtl_mix_prom =
(prandtl(300,101325,gn_pw,pprandtl,gn_p)+prandtl(2300,101325,gn_pw,pprandtl,gn_p))/2

#calculo número de prandtl a temperatura de superficie del intercambiador
prandtl_mix_s =prandtl(1300,101325,gn_pw,pprandtl,gn_p)

#calculo conductividad térmica promedio a temperatura de llama ad y
temperatura de salida de los gases
k_mix_prom =
(conductivity(300,101325,gn_pw,cconductivity,gn_p)+conductivity(2300,101325,gn_pw,cconductivity,gn_p))/2 #[W/m*K]

#calculo número de nusselt según Zukauskas
C_1 = 0.8 # "página 470 incropera tabla 7.5"
mg = 0.4 # "página 470 incropera tabla 7.5"
Nu =
C_1*Re_gas**mg*(prandtl_mix_prom**0.36)*(prandtl_mix_prom/prandtl_mix_s)**(1/4)

#calculo coeficiente de transferencia convectivo para el gas
h_gas = (Nu*k_mix_prom)/L_c
print(f"\n \t coeficiente convectivo gas h_o: {h_gas:.3f}[W/m^2*K]")

#Calculo del coeficiente de radiación h_radiación (GAS)
Pw = P_atm*gn_p["H2O"] #presión parcial agua
Pc = P_atm*gn_p["CO2"] #presión parcial dióxido de carbono
L = 0.65*(d_i*3.28084) #3.6V/As
e_c = 0.025 #gráfica 13-36 @1500K Pc*L=0.025
e_w = 0.016 #gráfica 13-36 @1500K Pw*L=0.045
C_c = 1.1 #gráfica 13-37 Pc*L=0.025
C_w = 1.1 #gráfica 13-37 (Pw+P)/2=0.045
delta_e = 0 #Pc*L+Pw*L=0,07 Pw/(Pc+Pw)=0,643
e_gas = C_c*e_c + C_w*e_w - delta_e
T_sup = 1000 #[K]
T_gas = 1500 #[K]
h_rad = e_gas*stfb*(T_sup**2+T_gas**2)*(T_sup+T_gas) #[W/m^2*K]
h_comb = h_rad + h_gas #[W/m^2*K]
print(f"\n \t coeficiente radiación gas h_rad: {h_rad:.3f}[W/m^2*K]")
print(f"\n \t coeficiente combinado gas h_comb: {h_comb:.3f}[W/m^2*K]")

```

```

#CALCULO DEL h_i COEFICIENTE DE CONVECCIÓN INTERNA (AGUA)
Tw_in = 25 #[C]
Tw_out = 30 #[C]
Tw_prom = (Tw_in+Tw_out)/2 #[C]
delta_w = Tw_out-Tw_in #[C]

#flujo másico agua
Q_dot_neto =abs(Q_neto*3600) #[Kj/h]
m_dot_w = (Q_dot_neto/(delta_w*wProperties(Tw_prom,101325,'Water')[2]))/3600
#[Kg/s]

#Número de reynolds del agua calculado a la temperatura promedio entre la
salida y la entrada
Re_w = (4*m_dot_w)/(mt.pi*d_w*wProperties(Tw_prom,101325,'Water')[1])
print(f"\n \t #Reynolds Agua: {Re_w:.3f}")

#calculo número de nusselt según gnilinski
#Nusselt laminar flow
m = 0.5+0.2903*(d_w/d_e)**0.194
Nu_w_l =
3.66+0.08*(1+0.8*(d_w/d_e)**0.9)*(Re_w**m)*(wProperties(Tw_prom,101325,'Water
')[4])** (1/3)
#Nusselt turbulent flow
gamma = (0.3164/Re_w**0.25)+0.03*(d_w/d_e)**0.5 #friction factor by Mishra
and gupta
Nu_w_t =
((gamma/8)*Re_w*wProperties(Tw_prom,101325,'Water')[4])/(1+12.7*((gamma/8)**(
1/2))*((wProperties(Tw_prom,101325,'Water')[4])** (2/3)-1))

#Nusselt
Y = (2.2*10**4 -Re_w)/(2.2*10**4 - Re_crit)
Nu_w = Y*Nu_w_l+(1-Y)*Nu_w_t

#calculo coeficiente convectivo agua
h_i = (Nu_w*wProperties(Tw_prom,101325,'water')[3])/d_w
print(f"\n \t coeficiente convectivo agua h_i: {h_i:.3f}[W/m^2*K]")

#coeficiente total de transferencia de calor
U = 1/((1/h_comb)+(1/h_i))
print(f"\n \t coeficiente total de transferencia de calor U:
{U:.3f}[W/m^2*K]")

# CALCULO DE LA DIFERENCIA MEDIA LOGARITMICA

#Calculo LTMD intercambiador contraflujo
delta_t_1 = T_ad - (Tw_out+273.15)
delta_t_2 = (Tg_out) - (Tw_in+273.15)
lmtd_cf = (delta_t_1-delta_t_2)/(mt.log(delta_t_1/delta_t_2)) #[K]

#Calculo LMTD a flujo cruzado
R_fc = (Tw_in-Tw_out)/(Tg_out-T_ad)

```

```

P_fc = (Tg_out-T_ad)/(Tw_in-T_ad)
F = 1 #valor asumido gráfica 11-18 Tc cengel
lmtd = F*lmtd_cf
print(f"\n \t diferencia media logaritmica flujo cruzado LMTD:
{lmtd:.3f}[K]")

#ÁREA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR
A = (abs(Q_neto*1000))/(U*lmtd) #[m^2]
print(f"\n \t El área del intercambiador de calor es A: {A:.3f}[m^2]")

#longitud del intercambiador
L_inter = A/(mt.pi*(d_o-d_i))
print(f"\n \t La longitud del intercambiador es L: {L_inter:.3f}[m]")

```

CALCULO LONGITUD DE TUBERÍA HIDRAULICA

```

#flujo volumetrico = 60L/h
#calculo calor de convección
e_s = 0.8 #emisividad de superficie
m_dot_gas = 0.7089 #flujo másico de gas total prod [Kg/h]
h_t = 7.267 #coef.tc convectivo [W/m^2*K]
A_s = 0.014 #área superficial de 1 espira [m^2]
e_c_a = 0.018 #gráfica 13-36 @1500K Pc*L*(Ts/Tg)
e_w_a = 0.028 #gráfica 13-36 @1500K Pc*L*(Ts/Tg)
e_c = 0.025 #gráfica 13-36 @1500K Pc*L=0.025
e_w = 0.016 #gráfica 13-36 @1500K Pw*L=0.045
rad = 0.0571 #[m] #radio de la espira vista frontal
perimetro_tubo = 2*mt.pi*rad #perimetro de cada espira [m]

cont = 0
Tlist = []
X_axis = []

while T_gas>350:
    Tlist.append(T_gas)
    delta_tt = Tw_sup - T_gas #[K]
    Q_conv = h_t*A_s*delta_tt #calor convectivo [W]
    h_t-=0.5

#calculo calor de radiación
e_gas = C_c*e_c + C_w*e_w

alpha_c=C_c*(T_gas/Tw_sup)**0.65*(e_c_a)
alpha_w=C_w*(T_gas/Tw_sup)**0.45*e_w_a

alpha_g =alpha_c+alpha_w
Q_rad = ((e_s+1)/2)*A_s*stfb*(e_gas*T_gas**4-alpha_g*Tw_sup**4) #[W]

Q_total = Q_rad + Q_conv #[W]

```

```

    Cp_CO2 = CP.PropsSI('CPMASS', 'T', T_gas, 'P', 101325, 'CO2')/1000
# [Kj/Kg*K]
    Cp_H2O = CP.PropsSI('CPMASS', 'T', T_gas, 'P', 101325, 'H2O')/1000
# [Kj/Kg*K]
    Cp_N2 = CP.PropsSI('CPMASS', 'T', T_gas, 'P', 101325, 'N2')/1000
# [Kj/Kg*K]
    Cp_gas =Cp_CO2*gn_p["CO2"] +Cp_H2O*gn_p["H2O"]+Cp_N2*gn_p["N2"]
# [Kj/Kg*K]

    #sumo esa cant aproximada debido a que los valores de emisividad y
absortividad
    #aumentan segun disminuye la temperatura de los gases
    e_c_a +=0.005
    e_w_a +=0.005
    e_c+=0.005
    e_w+=0.005

    #calcula la temperatura de salida de los gases
    T_gas_out = T_gas-((Q_total*3600)/(m_dot_gas*Cp_gas*1000)) #[K]

    #igualo la temperatura de salida de los gases a la T_gas para que tome
esa temperatura de salida
    #de los gases como la nueva temperatura de entrada de nuevo al ciclo y
siga evaluando
    #hasta q se cumpla la condición que me saque del ciclo
    T_gas = T_gas_out
    ##
    cont +=1
    print(f"{T_gas:.3f}[K] -:{cont}")

L_tubo = (cont)*perimetro_tubo #sumo una espiras extra [m]
print(f"\n \t La cantidad de espiras del intercambiador son:{cont} ")

print(f"\n \t La longitud del tubo es aproximadamente:{L_tubo:.3f} metros")

```

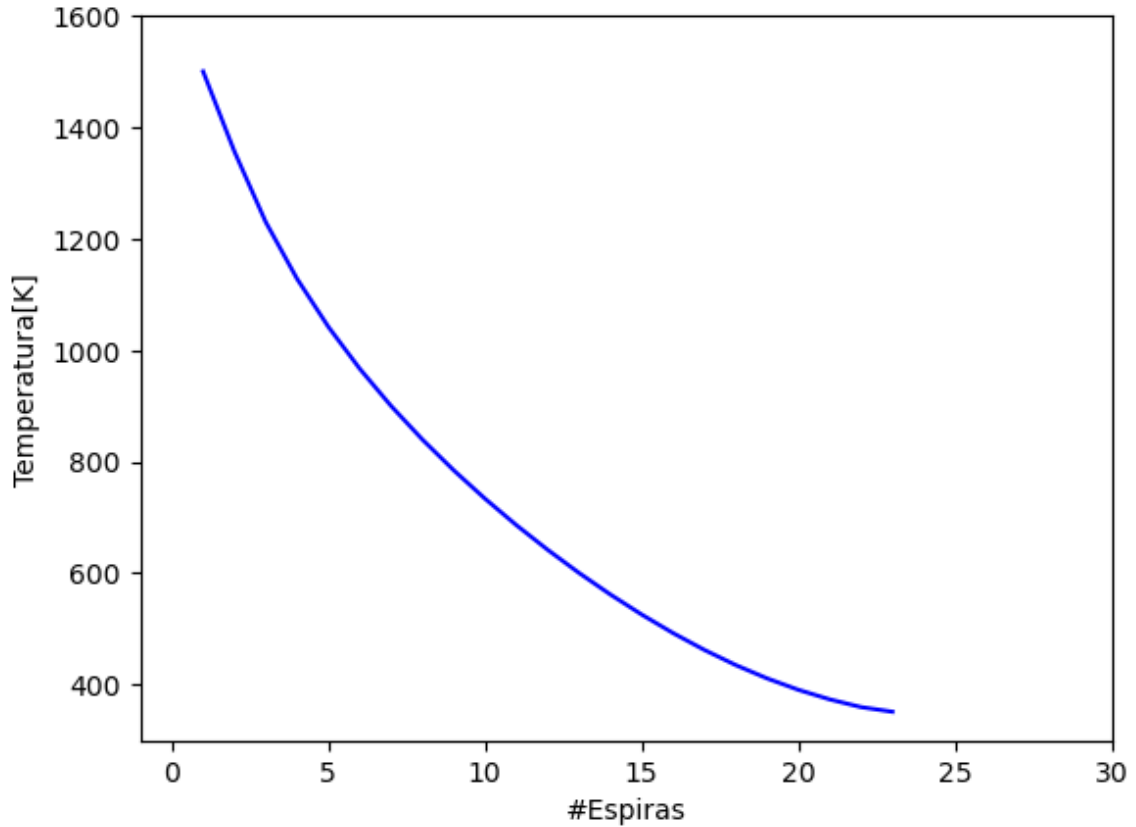
COMPORTAMIENTO TEMPERATURA DEL GAS A LO LARGO DEL INTERCAMBIADOR

```

showSize()
for i in range(1,len(Tlist)+1):
    X_axis.append(i)

mp.plot(X_axis,Tlist,'blue')
mp.axis([-1,30,300,1600])
mp.ylabel("Temperatura[K]")
mp.xlabel("#Espiras")

```



Anexo C. Estructura de las competencias educativas de materias afines al dispositivo con el fin de apoyar el aprendizaje experimental

La estructuración de las competencias educativas de materias afines al dispositivo se desarrolló en cinco pasos.

En primer lugar, se identificaron las asignaturas dentro del plan de estudios del curso de Ingeniería Mecánica afines al dispositivo desarrollado, y que se pueden beneficiar de un proceso de aprendizaje experimental.

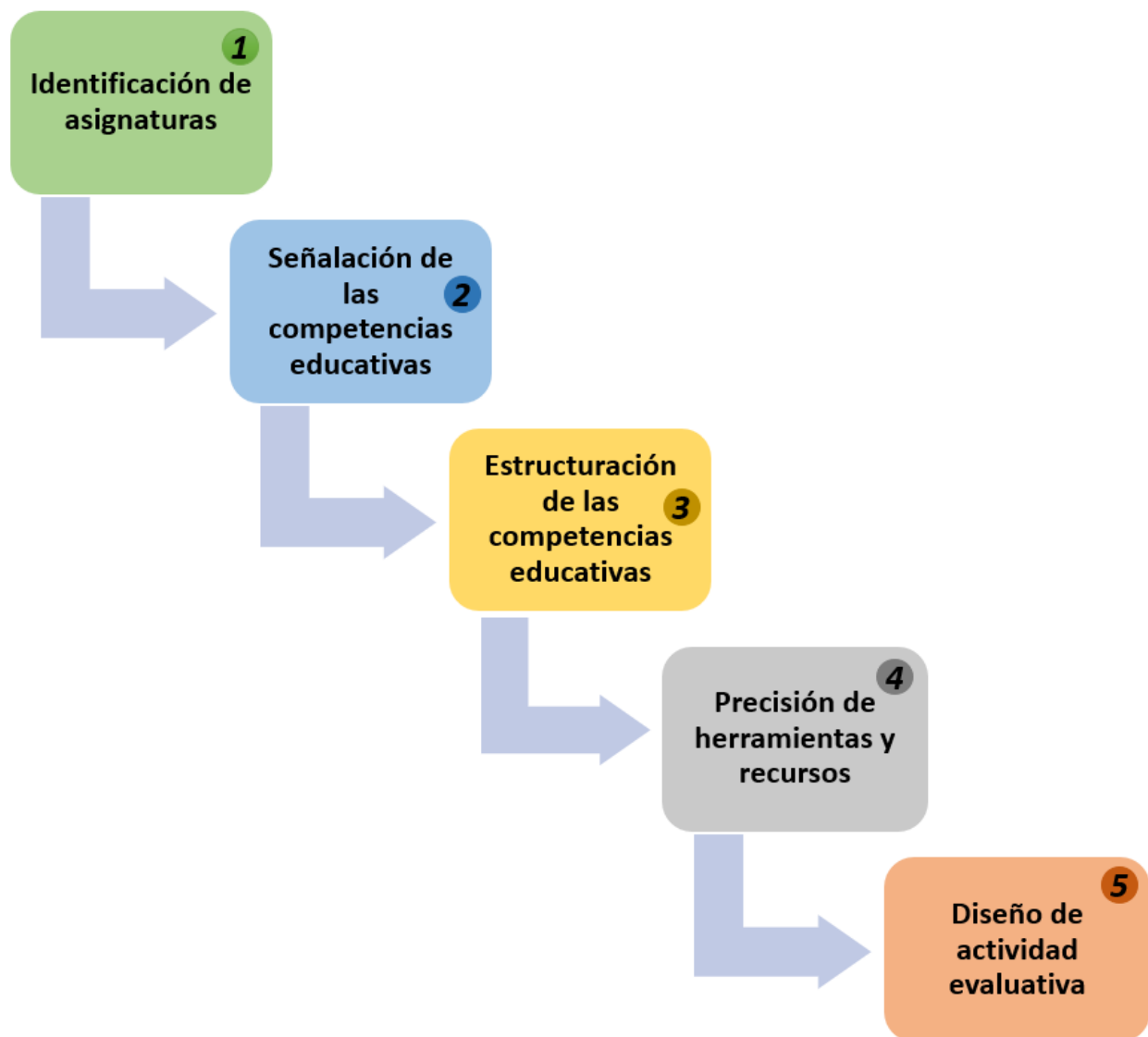
En segundo lugar, se identificaron las competencias educativas necesarias para comprender el funcionamiento del dispositivo. Para ello, se revisaron los programas de estudio de las

asignaturas identificadas con el fin de determinar las competencias y habilidades específicas requeridas para usar el dispositivo.

En tercer lugar, se procedió con la estructuración de las competencias educativas. Una vez identificadas las competencias, se organizaron según las asignaturas del área térmica a la que corresponden y del semestre que se cursa. Además, se especifica cómo esa competencia adquirida ayuda a entender la práctica de calorimetría.

En cuarto lugar, se determinaron las herramientas y recursos necesarios para apoyar el aprendizaje experimental en la práctica de laboratorio con el calorímetro. Es decir, se definen materiales, equipos y guía de funcionamiento.

En quinto lugar, se diseñó la actividad evaluativa que permite a los estudiantes aplicar las competencias identificadas durante la práctica de calorimetría de gases combustibles.

Figura C1. Estructuración metodológica de materias a fines al calorímetro.

Identificación de asignaturas

Para el primer paso, se procedió a revisar en el plan de estudios de Ingeniería mecánica las asignaturas afines al dispositivo (calorímetro de gases combustibles). Teniendo en cuenta que el dispositivo es un intercambiador de calor, se identificaron las asignaturas del área de ciencias térmicas del programa académico, considerando que estas asignaturas son las que brindan a los estudiantes las herramientas para entender el calorímetro.

De acuerdo con lo anterior se identificaron las siguientes asignaturas relevantes para comprender el dispositivo: Termodinámica I, Termodinámica II, Transferencia de calor, Sistemas térmicos, Mecánica de Fluidos y la electiva Combustión Industrial.

Identificación de las competencias educativas.

Para la identificación de competencias, se tomaron las competencias específicas de cada asignatura identificada previamente. Estas competencias se desarrollan en los estudiantes, a partir de procesos de formación, o de manera práctica a lo largo del desarrollo profesional.

El resultado de este ejercicio es un conjunto de macro y micro competencias, que validan el perfil requerido en cada estudiante para lograr comprender el calorímetro de gases combustibles.

Termodinámica I

- Aplica los conceptos de estado y proceso termodinámico en sistemas cerrados, volumen de control o ciclo.

Para el caso del calorímetro de gases combustibles, el cual es un volumen de control, es muy importante comprender los conceptos de estado termodinámico y del proceso. Estos se pueden caracterizar mediante la determinación de un conjunto específico de propiedades, como la temperatura y la presión.

- Aplica los principios fundamentales de la termodinámica a volúmenes de control.
- Utiliza los conceptos fundamentales de la primera y segunda ley de la termodinámica en volúmenes de control.

Termodinámica II

- Construye el modelo del sistema térmico a analizar sea un sistema cerrado, volumen de control o ciclo.

El estudiante debe tener la capacidad de comprender el calorímetro y a partir de esto identificar que el mismo es un volumen de control, donde existen unos flujos másicos de entrada, salida y a partir de esto construir un modelo.

- Define y analiza el proceso que sufren las sustancias (puras o mezclas) dentro de un volumen de control

Teniendo en cuenta el modelo hecho, el estudiante debe comprender los flujos másicos de entrada y de salida, y a partir de esto establecer balances de masa. Únicamente se analizan los estados termodinámicos a la entrada y salida.

- Reconoce las propiedades termodinámicas de las sustancias puras.

El estudiante debe comprender que las sustancias puras o mezclas son las que describen el comportamiento termodinámico de un sistema en un estado específico. Algunas de las propiedades termodinámicas más importantes para comprender el calorímetro de gases combustibles son: presión, temperatura, volumen, viscosidad, densidad, entalpías de formación, temperatura de llama adiabática, calor específico, entre otras.

Transferencia de calor

- Realiza el diagrama de flujo de energía del problema a resolver
- Establece las ecuaciones del balance de energía del problema

El estudiante debe comprender las variables que hacen parte de la ecuación del balance de energía para comprender que en el intercambiador de calor no hay trabajo y las variaciones de energía son únicamente de la energía interna, debido a que no hay energía potencial ni cinética.

- Identifica el mecanismo y las ecuaciones fundamentales de la transferencia de calor.

En este caso, debe comprender las diferentes maneras en las cuales los fluidos intercambian energía en forma de calor, para el caso del calorímetro, gases producto de la combustión de gas natural que entregan parte de su energía al agua.

- Tiene en cuenta el marco de referencia en la evaluación de las propiedades.

El estudiante debe lograr identificar un marco de referencia adecuado para realizar cálculos relacionados con la transferencia de calor, teniendo en cuenta factores como la dirección, la magnitud del flujo de calor, también la geometría y propiedades de los materiales involucrados.

- Aplica correlaciones experimentales asociadas a la transferencia de calor.

El estudiante debe tener la capacidad de interpretar y analizar los resultados obtenidos utilizando las correlaciones experimentales para sacar conclusiones sobre el comportamiento de la transferencia de calor en el calorímetro.

- Establece el proceso de solución del problema.

Sistemas Térmicos

- Realiza procesos de diseño de sistemas térmicos básicos.
- Modela elementos de sistemas térmicos tales como intercambiadores de calor, torres de enfriamiento, colectores solares térmicos y fotovoltaicos, calderas etc.

Teniendo en cuenta que el calorímetro es un intercambiador de calor, el estudiante debe comprender dicho sistema y su funcionamiento.

- Analiza sistemas térmicos como un conjunto de elementos que cumplen una función específica.

En el marco del calorímetro, el estudiante debe comprender la sinergia sobre el conjunto de elementos de los cuales está compuesto el equipo, para de esta manera lograr entender su finalidad.

- Utiliza herramientas informáticas para el modelamiento, simulación y optimización de sistemas térmicos.
- Conoce la metodología para el diseño térmico y mecánico de intercambiadores de calor.
- Trabaja en equipo.

El estudiante debe tener la capacidad de trabajar en equipo para lograr desarrollar los retos propuestos en la experiencia de laboratorio.

Mecánica de Fluidos

- Aplica los principios fundamentales de la mecánica de fluidos

Para comprender el comportamiento de los fluidos dentro del intercambiador, el estudiante debe tener la capacidad de analizar el principio de conservación de la masa que existe en el flujo másico de agua y además debe comprender la ley de la viscosidad, una propiedad importante de los fluidos.

- Aplica correlaciones experimentales asociadas a la mecánica de fluidos

El estudiante debe tener la capacidad de interpretar y analizar los resultados obtenidos utilizando las correlaciones experimentales para sacar conclusiones sobre el comportamiento de los fluidos en el calorímetro.

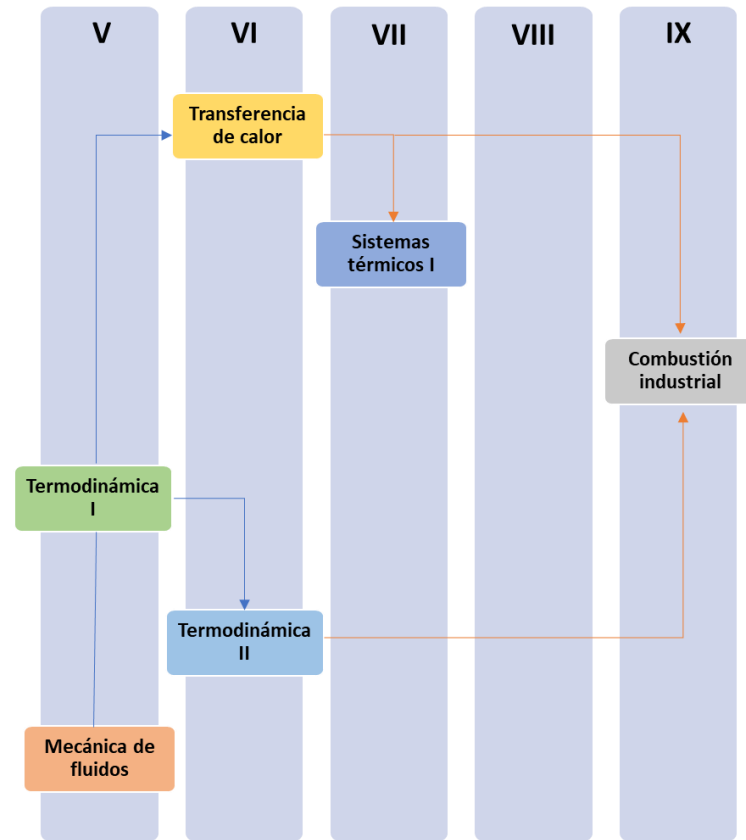
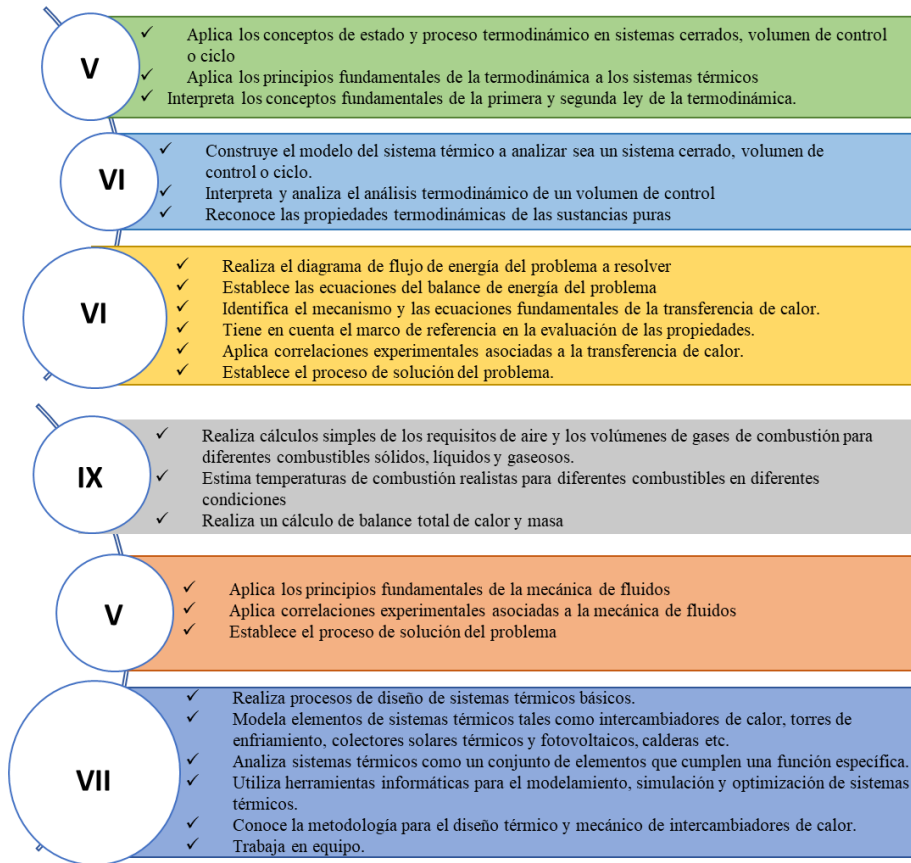
- Establece el proceso de solución del problema

Combustión Industrial

- Realiza cálculos simples de los requisitos de aire y los volúmenes de gases de combustión para diferentes combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.
- Estima temperaturas de combustión para diferentes combustibles en diferentes condiciones operacionales.
- Realiza un cálculo de balance global de calor y masa para una mezcla reactiva.

Estructuración de las competencias educativas

Luego de identificar las competencias, se estructuraron agrupándolas por nivel de complejidad según el semestre y asignatura donde estas se adquieren. Es importante recalcar que las competencias identificadas en las asignaturas allí estructuradas son las competencias necesarias únicamente para lograr comprender el funcionamiento de un calorímetro utilizado para determinar el poder calorífico de gases combustibles.



Anexo D. Manual de operación

Introducción	135
1. Objetivo del manual	135
1.1 Descripción del intercambiador de calor	135
1.2 Principios de operación.....	136
1.2.1 Flujo másico constante de agua	136
1.2.2. Flujo másico constante de gas.....	140
2. Requisitos previos.....	141
2.1 Condiciones de instalación	141
2.2 Información sobre los fluidos de trabajo (agua y gas natural).....	143
3. Instrucciones de operación.....	144
3.1 Instrucciones de seguridad.....	144
3.2 Procedimiento de encendido	150
3.3 Control de temperatura	153
3.4 Ajuste de caudal de gas y agua	153
3.5 Apagado del equipo	155
4. Mantenimiento	156
4.1 Inspección y limpieza periódica.....	156
5. Solución de problemas	157
5.1 Fugas en vasos de precipitado o conexiones hidráulicas	157
5.2 Apagado de llama del quemador.....	157

5.3 No fluye agua por el calorímetro	157
4.1 La bomba dejó de enviar agua	158
5.4 El agua sobrepasa el vaso de precipitado superior y se riega	158

Introducción

En esta sección encontrará el manual de operación del Calorímetro de Junkers para su correcto uso y funcionamiento.

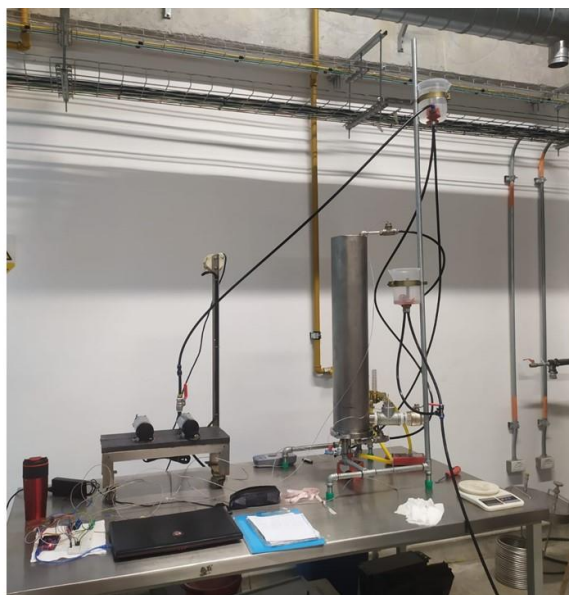
1. Objetivo del manual

El objetivo del manual de operación del calorímetro de Junkers es proporcionar instrucciones y orientación detallada sobre el uso, funcionamiento y mantenimiento del equipo. Este manual es una guía que proporciona información específica y detallada sobre cómo operar y mantener el equipo de manera segura y eficiente, incluyendo información sobre precauciones de seguridad, procedimientos operativos, mantenimiento preventivo, solución de problemas y otras consideraciones importantes.

1.1 Descripción del intercambiador de calor

El calorímetro de Junkers es un intercambiador de calor con disposición de flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclados. Los dos fluidos presentes que intercambian energía en forma de calor son: Gas natural y agua. En este caso el fluido caliente es el gas natural, el cual le entrega su energía en forma de calor al fluido frío, el agua. El material del cual está manufacturado el intercambiador es acero inoxidable AISI 304.

El intercambiador ha sido diseñado de manera compacta para mejorar el intercambio de calor, el material seleccionado en función de preservar el equipo debido a la corrosión con los fluidos, además, el menor espesor de la tubería por donde fluye el agua, lo que también contribuye a mejorar el intercambio de calor. Asimismo, en el diseño del intercambiador fue considerada la facilidad de mantenimiento de este, por lo que su diseño permite desmontar el equipo por partes para facilitar su limpieza y mantenimiento, lo que asegura su funcionamiento óptimo a largo plazo.

Figura D1. Calorímetro de Junkers.

1.2 Principios de operación

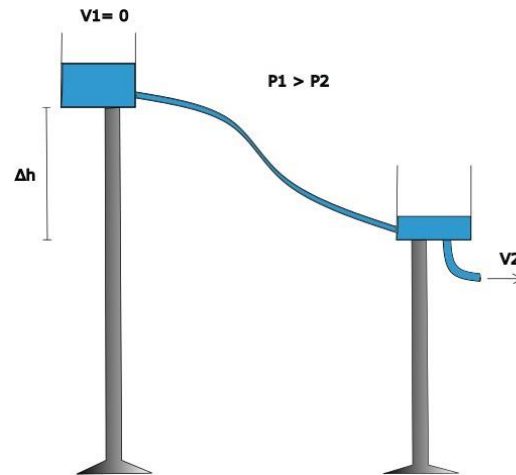
El principal objetivo del intercambiador es cuantificar el poder calorífico superior del gas natural, para lograr medir esta propiedad se deben cumplir ciertos requerimientos. Se debe garantizar que los dos fluidos en el intercambiador se encuentren en flujo estable o estacionario, además de esto, es importante asegurar que la temperatura de los productos del gas natural a la salida sea lo más cercana posible a la temperatura de los reactivos de este.

1.2.1 Flujo másico constante de agua

El principio físico conocido como “principio de los vasos comunicantes” se aplica cuando los recipientes o vasos están conectados entre sí y tienen una comunicación directa, es decir, están en la misma altura o nivel. La presión hidrostática de un líquido depende de su altura, densidad y aceleración debida a la gravedad. A mayor altura, mayor será la presión hidrostática del líquido en ese punto. Por lo tanto, si dos o más vasos están conectados, pero a diferentes alturas, la presión del líquido será diferente en cada vaso, y los niveles de líquido no se igualarán.

En este caso, el nivel del líquido será mayor en el vaso que esté a mayor altura y menor en el vaso que esté a menor altura, de acuerdo con la relación entre la presión hidrostática y la altura del líquido.

Figura D2. Principio de los vasos comunicantes.



Donde P_1 y P_2 hacen referencia a las presiones hidrostáticas del punto 1 y 2, teniendo en cuenta lo anteriormente planteado y aplicando la ecuación de Bernoulli, se puede concluir con la siguiente ecuación al despejar la velocidad V_2

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

v_2 : Velocidad de salida

g : Aceleración gravitacional

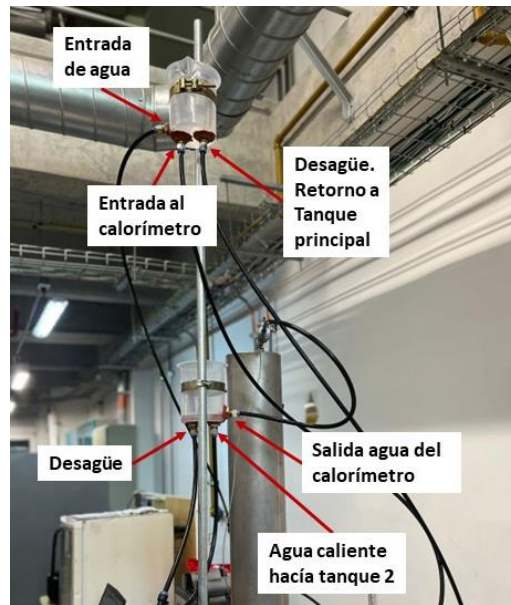
$\Delta h = h_1 - h_2$: Diferencia de alturas entre las superficies inferiores de los vasos

El flujo másico de agua constante se garantiza a través de dos recipientes (Vasos de precipitado), los cuales fueron adaptados con conectores rápidos para manguera. Estos vasos cuentan con una entrada de agua y dos salidas, la entrada como su nombre lo indica por la cual inicialmente el agua entra al vaso, luego dos salidas, en el caso del vaso ubicado en la parte

superior, una por donde el agua se dirige hacia el interior del calorímetro y otra de desagüe por la cual el agua retorna el tanque principal de abastecimiento de agua.

En el caso del vaso ubicado en la parte inferior, una salida por la cual el agua va hacía el tanque de salida, que recolecta el agua caliente al salir del calorímetro, y otra salida de desagüe.

Figura D3. Conexiones de los vasos de precipitado.



Dentro de cada vaso de precipitado hay un pequeño tubo roscado de 8cm de altura. La función que cumple este tubo es la de asegurar el flujo constante de agua que fluye hacia el calorímetro, debido a que cuando el nivel de agua extra que llega al recipiente ha alcanzado la altura del tubo roscado, este funciona como una trampa de agua y envía el agua excedente que sobrepasa la altura del tubo roscado hacía el tanque principal. De esta manera se asegura que el flujo másico de agua dentro del calorímetro sea constante.

Figura D4. Esquema de vaso de precipitado. Adaptado de (Rebolledo, 2008).

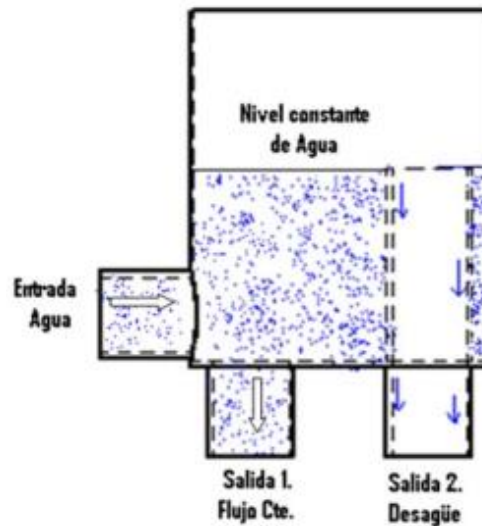
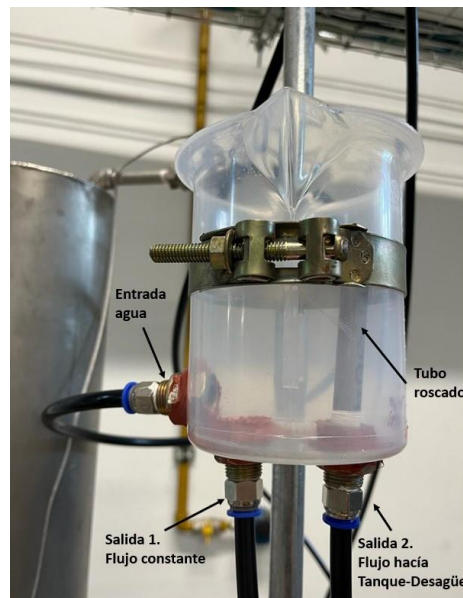


Figura D5. Entradas complementarias de los vasos de precipitado.



Es importante comprender la funcionalidad de los tubos roscados ubicados dentro de los vasos de precipitado, debido a que aseguran el flujo constante de agua.

Es posible variar la apertura de la válvula reguladora de caudal que está instalada en la bomba centrífuga (ver Figura D17), de esta manera se consigue alterar el caudal que envía la

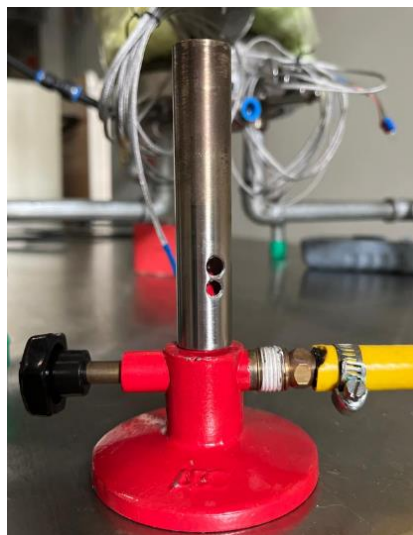
bomba hacía el vaso de precipitado ubicado en la parte superior, pero no se varía el caudal que ingresa al calorímetro. Esto se debe a que lo único que logra variar el caudal que entra al calorímetro es la diferencia de altura entre los dos vasos de precipitado por el principio de los vasos comunicantes.

Si la apertura de la válvula reguladora de caudal de la bomba está al máximo, es decir, la bomba está enviando el máximo caudal posible, el vaso de precipitado superior recibe todo ese caudal de agua, aun así, sigue entrando al calorímetro el mismo caudal establecido por la diferencia de altura entre los vasos (ver Figura D24) y el caudal excedente que envía la bomba se va por la salida del desagüe y retorna al tanque principal.

1.2.2. Flujo másico constante de gas

Para establecer un flujo másico constante de gas, se tiene un flujómetro que mide la cantidad de litros por minuto que están fluyendo hacia el quemador bunsen, el cual cuenta con una válvula de aguja que regula la cantidad de gas. Cabe recalcar que es posible implementar un medidor de flujo (Wet-Test Gas Meter), el cual lograría un flujo de gas natural totalmente estable.

Figura D6. Quemador tipo bunsen.



2. Requisitos previos

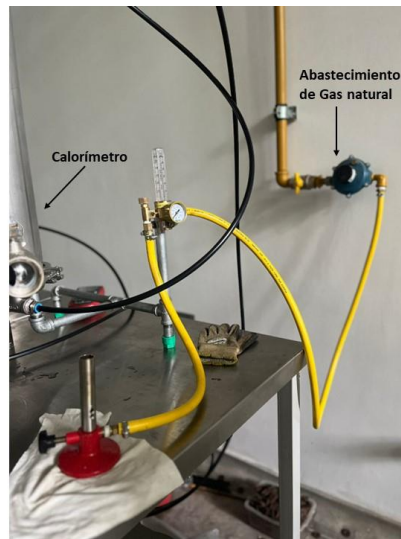
En los requisitos previos se encuentra la información referente a las condiciones de instalación para el correcto funcionamiento del calorímetro, información acerca de los fluidos de trabajo y los requisitos eléctricos y de conexión.

2.1 Condiciones de instalación

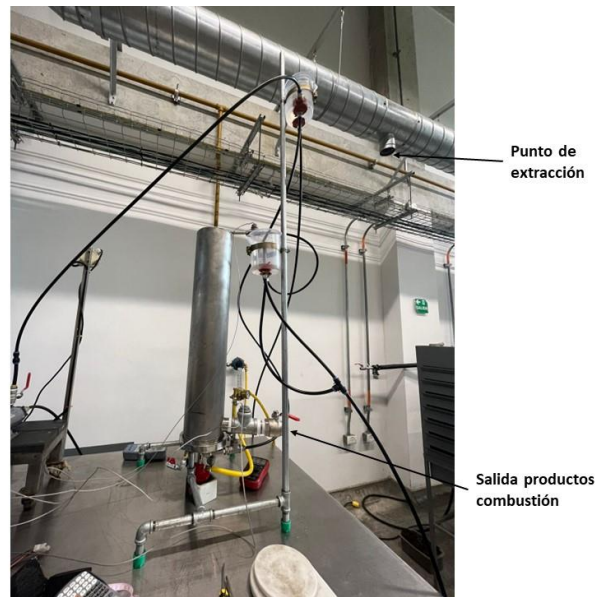
Para la ubicación del equipo se deben considerar 4 puntos importantes, puntos a los cuales el equipo debe estar cerca y tener fácil acceso.

En primer lugar, el equipo debe estar cerca de un punto de gas, esta condición es muy importante debido a que uno de los fluidos de trabajo del intercambiador es gas natural.

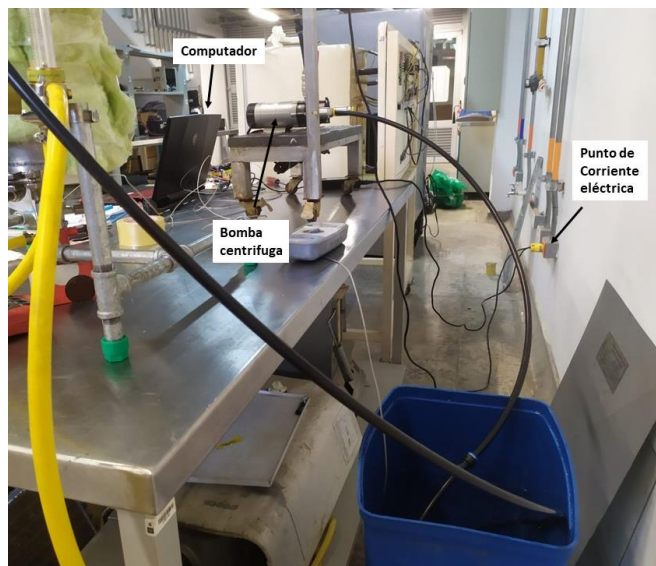
Figura D7. Disposición suministro de combustible.



En segundo lugar, el equipo debe estar situado de manera que la salida de los gases no quede en la dirección en donde se ubican los operadores de este, y además debe estar ubicado debajo de un punto de extracción de gases.

Figura D8. Salida gases de combustión y punto de extracción del edificio.

En tercer lugar, el calorímetro debe estar ubicado cerca de un punto de corriente eléctrica para facilitar la conexión de la bomba centrífuga que suministra el caudal hacía el calorímetro, así como la conexión del computador que toma los datos mediante el Arduino.

Figura D9. Conexiones eléctricas.

Por último, el equipo debe estar ubicado cerca de un punto de abastecimiento de agua, condición imprescindible para usar el colorímetro.

Figura D10. Tanque de abastecimiento de agua.



2.2 Información sobre los fluidos de trabajo (agua y gas natural)

En este caso, se usa el agua como uno de los fluidos para lograr medir el poder calorífico del gas natural debido a su alta capacidad calorífica, lo que quiere decir que puede absorber una gran cantidad de calor sin experimentar un aumento significativo en su temperatura. De esta manera es posible medir con mayor precisión la cantidad de energía transferida en forma de calor del gas hacia el agua. Además, las propiedades del agua son conocidas, permite hacer cálculos precisos.

De igual forma, el agua es un fluido ampliamente disponible y seguro para su uso en intercambiadores de calor, es un fluido no inflamable y no tóxico, lo que reduce los riesgos con su operación. Es conveniente el uso de agua como fluido en un intercambiador de calor debido a que

permite la medición directa del cambio de temperatura del agua, esto facilita la determinación del poder calorífico.

Para el caso del gas natural, es una fuente de energía fósil compuesta principalmente por metano (CH_4), la cual contiene además otros gases como etano, propano, butano, dióxido de carbono y nitrógeno. El gas natural es una importante fuente de energía que se utiliza en muchas aplicaciones, como la generación de energía, calefacción y refrigeración.

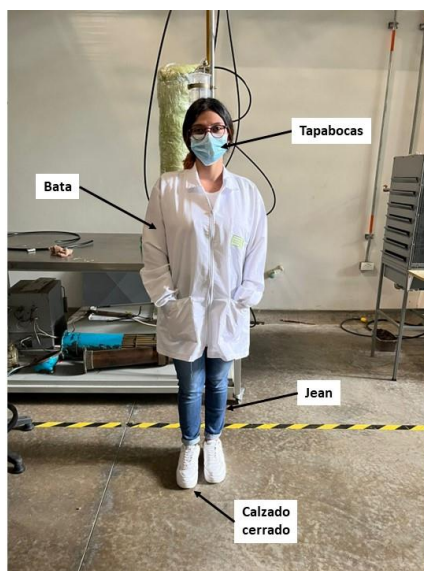
Algunas de las características importantes de este fluido son su alta eficiencia en la generación de energía y su fácil transporte, distribución y acceso a través de redes de gaseoductos.

3. Instrucciones de operación

En esta sección se encuentra la información referente a las instrucciones de seguridad, procedimiento de encendido, control de temperatura, ajuste de caudal de gas y agua, y apagado del equipo.

3.1 Instrucciones de seguridad

Es fundamental antes de iniciar cada prueba de laboratorio con el equipo, contar con la indumentaria adecuada para su operación. Como parte de esta verificación, es importante asegurarse que todas las válvulas por las cuales fluye el gas natural estén inicialmente cerradas y que los equipos y accesorios que operan con el calorímetro estén en perfecto estado y listos para la operación.

Figura D 11. Indumentaria necesaria para la práctica de laboratorio.

Antes de iniciar una prueba se debe chequear la disposición de los siguientes accesorios y equipos que funcionan con el calorímetro.

Inicialmente, la válvula de abastecimiento de gas (ver Figura D12), la perilla reguladora de gas del flujómetro (ver Figura D13)y la perilla reguladora del quemador bunsen (ver Figura D14) deben estar cerradas. Además de esto, la válvula por la cual sale el condensado producto del enfriamiento del vapor de agua (ver Figura D15) debe estar cerrada, y la válvula por donde salen los gases producto de la combustión (ver Figura D16) debe estar totalmente abierta.

Figura D12. Válvula de la línea de gas.**Figura D13. Regulador del flujómetro de gases.**

Figura D14. Regulador del quemador.



Figura D15. Válvula de condensado.



Figura D16. Válvula salida gases de combustión.

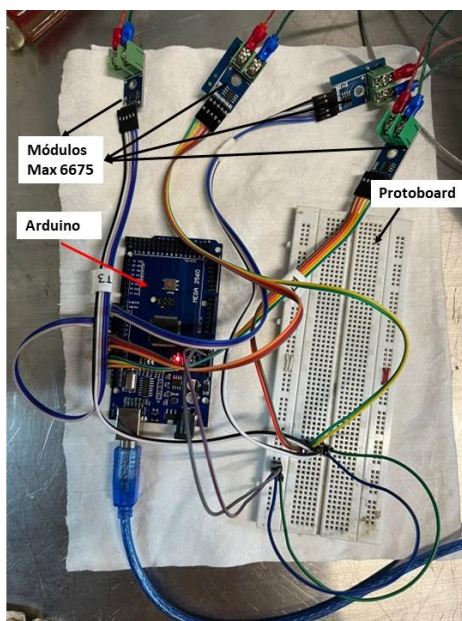


Para el abastecimiento de agua se debe revisar que la válvula reguladora de caudal de la bomba centrífuga (ver Figura D17) esté totalmente abierta, además se debe revisar que las conexiones rápidas para manguera estén aseguradas y que las mangueras estén ubicadas correctamente para que el agua pueda fluir sin problemas.

Es importante revisar que el tanque de abastecimiento de agua tenga suficiente agua para la prueba y que el tanque receptor del agua que sale del calorímetro esté listo.

Figura D17. Válvula de la bomba.

Para el monitoreo de la temperatura de los fluidos deben estar conectadas las termocuplas a los módulos Max y estos conectados a la protoboard y al Arduino, como se muestra en la Figura D18. De igual forma el Arduino al computador y el programa de Arduino abierto para compilar el código e iniciar el monitoreo.

Figura D18. Sistema de recolección de datos.

3.2 Procedimiento de encendido

Una vez que los accesorios y equipos estén preparados, se inicia el procedimiento de encendido, el cual consiste en permitir que los fluidos de trabajo circulen por el intercambiador y monitorear sus temperaturas desde el computador.

En primer lugar, se procede con el encendido de la bomba centrífuga para que el agua fluya por el calorímetro

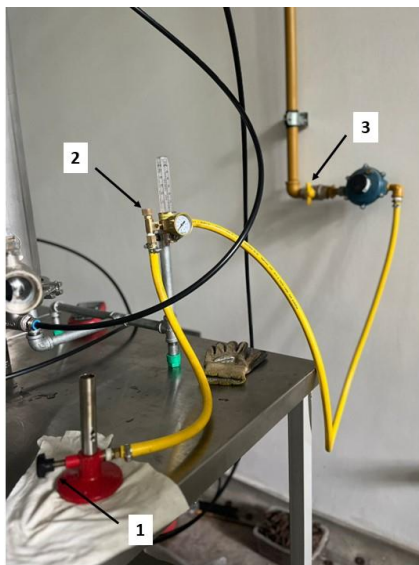
Figura D19. Encendido de la bomba.



Una vez el agua empieza a fluir agua por el calorímetro, se procede con el encendido del quemador bunsen, para el cuál se deben abrir 3 válvulas. En primer lugar, se debe abrir la válvula reguladora del quemador, luego se procede a abrir la perilla del flujómetro para permitir el paso del gas y por último se abre la válvula de abastecimiento de gas natural. La variación de la apertura de estas válvulas va a depender de la condición de flujo volumétrico que se necesite para la respectiva prueba, asimismo, este flujo volumétrico se puede medir de manera visual en el flujómetro (ver Figura D20).

Figura D20. Nivel del flujómetro

Es sumamente importante que la apertura de las válvulas para el flujo de gas natural se haga en el orden indicado previamente, esto con el fin de evitar inconvenientes con la línea de abastecimiento de gas natural.

Figura D21. Válvulas del suministro de gas.

Luego de abrir las válvulas 1 y 2 e inmediatamente después de abrir la válvula número 3 se debe encender la llama del quemador. La llama se puede iniciar usando un encendedor, el cual

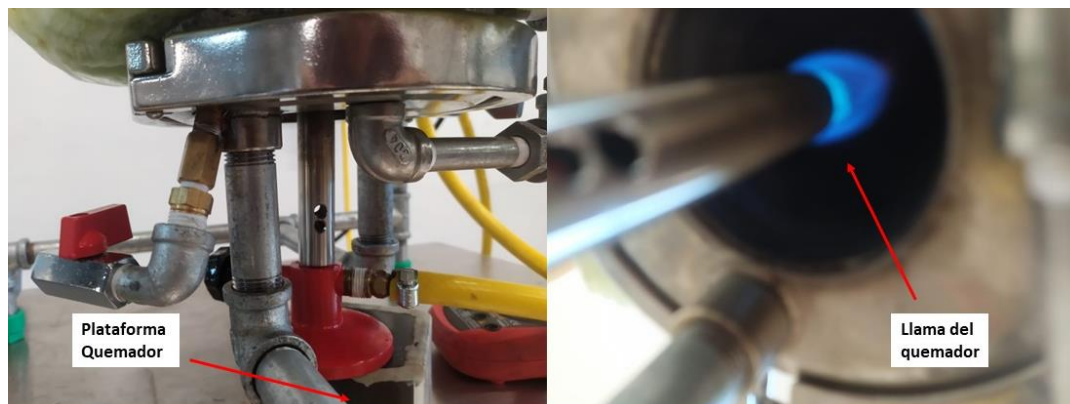
se debe acercar a la parte superior del quemador y allí se debe accionar para producir la llama y encender el quemador. Esto se debe hacer lo antes posible para que no haya flujo de gas natural al ambiente, ya que podría ser peligroso.

Figura D22. Operación del intercambiador de calor.



Después de encender el quemador, se coloca debajo del tubo interior del intercambiador de calor, situándolo encima de una pequeña plataforma para elevar su altura. Esto permite que la llama del quemador quede dentro del tubo interior del calorímetro y se reduzca la pérdida de energía en forma de calor por radiación con el ambiente.

Figura D23. Visualización de la llama del quemador.



Una vez se han puesto en marcha los equipos para el flujo másico de agua y gas, y se han establecido las condiciones de flujo deseadas, se procede a compilar el código del Arduino en el computador para monitorear las temperaturas de los fluidos.

3.3 Control de temperatura

En función del objetivo principal del calorímetro, el cual es medir el poder calorífico del gas natural, se realiza un control y monitoreo de temperatura y flujo volumétrico de ambos fluidos de trabajo, agua y gas natural, para obtener mediciones precisas.

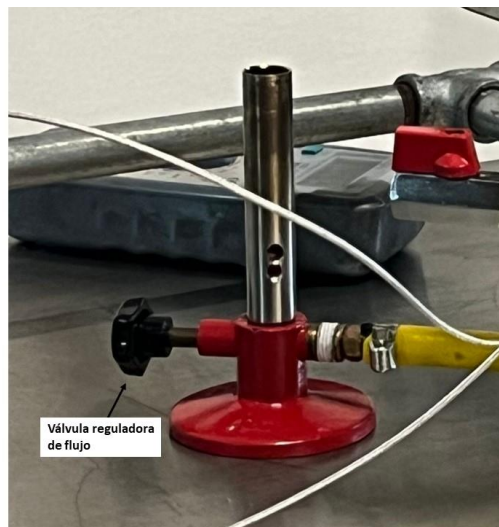
Para el control de la temperatura de los fluidos durante la operación, es posible alterar algunas condiciones dispuestas en el calorímetro precisamente para lograr este objetivo. Debido a que las variaciones de temperatura de los fluidos de trabajo son lo que realmente importa en el intercambiador de calor, el control de temperatura se logra principalmente mediante la modificación de los flujos volumétricos. Además de las condiciones previas establecidas en el diseño para mejorar la transferencia de calor entre los fluidos de trabajo dentro del intercambiador.

3.4 Ajuste de caudal de gas y agua

Para modificar el flujo volumétrico de agua en el calorímetro únicamente se debe cambiar la diferencia de altura entre los dos vasos de precipitado. Es recomendable establecer el vaso superior a una altura fija y únicamente variar la altura del vaso inferior, esto debido a que es más fácil de acceder a este por la altura a la que se encuentra.

Figura D24. Altura de los vasos de precipitado.

Para modificar el flujo volumétrico de gas natural hay que variar la válvula de aguja reguladora que se encuentra en el quemador bunsen y revisar de manera visual en el flujómetro el flujo que se quiere establecer.

Figura D25. Válvula mechero tipo bunsen.

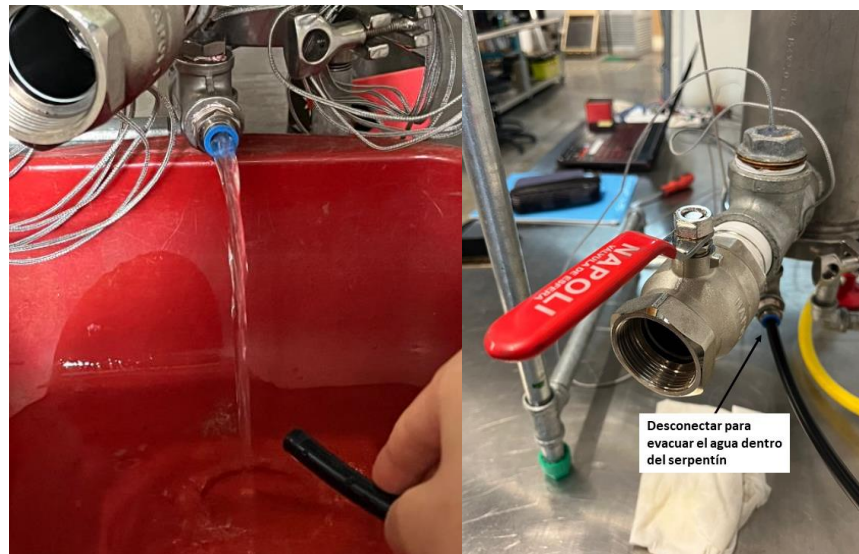
3.5 Apagado del equipo

El procedimiento para el apagado del equipo es similar al encendido, en primer lugar, se debe parar el flujo de gas natural, se debe hacer en orden, igual que como en el encendido, pero no en el mismo orden. Para el apagado se debe cerrar primero la válvula de abastecimiento de gas natural (3), hay que esperar aproximadamente 10 segundos mientras el gas que haya quedado en la línea se quema, después se cierra la perilla del flujómetro (2) y por último se cierra la válvula reguladora de flujo del quemador (1), ver Figura D25.

Una vez se ha detenido el flujo de gas natural, se procede a apagar la bomba con el mismo botón con el que se enciende, de esta manera se corta el flujo volumétrico de agua.

Luego, se detiene el monitoreo de las temperaturas en el computador desde la interfaz de Arduino. Una vez se han completado los pasos previamente descritos, se procede a desconectar la manguera por la cual entra agua al calorímetro para evacuar el agua que haya quedado dentro del serpentín, se debe ubicar un pequeño valde debajo de la conexión para recolectar el agua (ver Figura D26).

Figura D26. Vaciado del serpentín.



Este proceso se repite con la válvula de salida del condensado, para lograr evacuar el agua que haya quedado dentro del intercambiador debido a la condensación del vapor de agua producto de la combustión.

4. Mantenimiento

En esta sección se encuentra la información referente a la inspección y limpieza periódica de algunos componentes del calorímetro de Junkers.

4.1 Inspección y limpieza periódica

Cuando se está operando el calorímetro es indispensable estar constantemente revisando algunos componentes de este. Es muy importante chequear que la llama del quemador esté encendida, esta inspección hay que hacerla constantemente durante todo el tiempo en el que transcurra cada prueba, debido que, si la llama se apaga, queda fluyendo gas natural dentro del intercambiador de calor y podría ser peligroso.

En segundo lugar, se debe estar comprobando el nivel de agua del tanque de abastecimiento, para que la bomba pueda funcionar sin ningún inconveniente.

En tercer lugar, es fundamental estar comprobando que las conexiones de las mangueras y los accesorios hidráulicos por los cuales fluye el agua estén bien conectadas, antes de cada prueba hay que asegurarlos.

En cuarto lugar, se requiere estar revisando permanentemente durante toda la prueba el monitoreo de las temperaturas de los fluidos.

En quinto lugar, es necesario estar limpiando la mesa de trabajo en donde se encuentra ubicado el calorímetro, esto debido a que al trabajar con agua es común que haya algunas gotas y pueda mojar algún dispositivo.

Por último, es importante revisar y cumplir con todos los requisitos establecidos en las instrucciones de operación para no tener problemas en la prueba de laboratorio.

5. Solución de problemas

En esta sección se encuentran algunos problemas que podría presentar el calorímetro mientras se está operando.

5.1 Fugas en vasos de precipitado o conexiones hidráulicas

En caso de que se presenten fugas en los vasos de precipitado, se deben apretar un poco los accesorios roscados de las mangueras de conexión rápida. Adicional a esto, si se siguen presentando fugas, se debe adicionar un poco de silicona roja para alta temperatura por la parte interior del vaso de precipitado en donde están las conexiones de los accesorios. Si las fugas se presentan en algún otro accesorio del sistema hidráulico, se debe cambiar el teflón y apretar estos accesorios.

5.2 Apagado de llama del quemador

En caso tal se presente esta situación, se debe cerrar totalmente la válvula de abastecimiento de gas natural, es importante seguir la recomendación hecha de inspeccionar la llama constantemente. Se debe abrir totalmente la válvula de salida de los gases y la válvula de salida del condensado producto de la combustión que se encuentran en el calorímetro para que todo el gas que haya quedado dentro del intercambiador pueda ser evacuado fácilmente. Es conveniente esperar un tiempo prudente para dejar que todo el gas que haya quedado dentro del intercambiador salga antes de encender nuevamente el quemador.

5.3 No fluye agua por el calorímetro

En la eventualidad de que se presente este problema, es necesario subir un poco la altura del vaso de precipitado inferior para que no haya problema con la presión dentro la línea hidráulica.

Después de que empiece a fluir el agua sin algún problema ya se puede ubicar nuevamente el vaso inferior donde se quería establecer para iniciar la prueba.

5.3.1 La bomba dejó de enviar agua

En la contingencia de que la bomba centrífuga deje de enviar agua al sistema, se debe apagar esta, luego se precisa llenar de agua el vaso de precipitado superior, cuando el nivel de agua del vaso de precipitado empieza a disminuir se debe inmediatamente encender nuevamente la bomba.

5.4 El agua sobrepasa el vaso de precipitado superior y se riega

En la circunstancia de que suceda esto, se debe acomodar la manguera conectada al desagüe del vaso de precipitado superior, ya que es posible que la agua no esté fluyendo correctamente por la manguera y se estanque.