

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y
METALÚRGICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**DISEÑO Y EVALUACION DE UN QUEMADOR A BIOMASA PARA UNA CALDERA
PIROTUBULAR PARA REDUCIR COSTOS DE COMBUSTIBLE EN LA EMPRESA
SOLEMAN – CUSCO**

(Investigación Tecnológica)

PRESENTADO POR:

Br. MARIBEL BONIFAZ CCOTO

Br. NILO JUSTINIANI GAMARRA

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
METALÚRGICO**

ASESOR:

Dr. PEDRO CAMERO HERMOZA

CUSCO - PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Dr. PEDRO CAMERO HERMOZA
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: DISEÑO Y EVALUACION DE UN
QUEMADOR A BIOMASA PARA UNA CALDERA PIROTUBULAR
PARA REDUCIR COSTOS DE COMBUSTIBLE EN LA
EMPRESA SOLEMAN - CUSCO (Investigación Tecnológica)

Presentado por: MARIBEL BONIFAZ CCOTO DNI N° 73638372;
presentado por: NILO JUSTINIANI GANARRA DNI N°: 23991439
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 09%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 15 de enero de 2026


Firma

Post firma Pedro Camero Hermoza

Nro. de DNI 23956513

ORCID del Asesor 0000-0001-5366-9187

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:546454304

BONIFAZ - JUSTINIANI TURNITIN.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:546454304

131 páginas

Fecha de entrega

15 ene 2026, 11:27 a.m. GMT-5

20.102 palabras

Fecha de descarga

15 ene 2026, 11:38 a.m. GMT-5

122.504 caracteres

Nombre del archivo

BONIFAZ - JUSTINIANI TURNITIN.pdf

Tamaño del archivo

3.9 MB

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones


- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
26 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

**SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA,
MINAS Y METALÚRGICA, SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO CALIFICADOR.**

Conforme al reglamento vigente de grados y títulos, ponemos a vuestra consideración la Tesis: Intitulado: **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN QUEMADOR A BIOMASA PARA UNA CALDERA PIROTUBULAR PARA REDUCIR COSTOS DE COMBUSTIBLE EN LA EMPRESA SOLEMAN – CUSCO (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA).**

Con el que deseamos que el presente trabajo sirva de base para elaborar una alternativa sostenible en la industria de la región, que consiste en evaluar el funcionamiento del quemador a biomasa para una caldera pirotubular para reducir significativamente los costos de combustible.

MARIBEL BONIFAZ CCOTO

NILO JUSTINIANI GAMARRA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi amada madre, María, cuyo amor y sacrificio han sido la fuerza impulsora de cada logro en mi vida. Aunque ya no esté físicamente presente, su influencia perdura en cada página de esta tesis. También quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis queridos tíos, Teófila y Aurelio, quienes han sido una fuente constante de aliento y guía a lo largo de mi camino académico y emocional. Su apoyo incondicional y sabias palabras han dejado una marca indeleble en mi corazón, este logro es para ustedes. Gracias por ser mi fuente de inspiración constante.

MARIBEL BONIFAZ CCOTO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la mujer que ha sido mi guía, mi inspiración y mi mayor apoyo a lo largo de esta travesía: mi querida madre, Justina. Su amor incondicional y sacrificio han sido la fuerza impulsora detrás de cada logro en mi vida. Aunque las palabras nunca serán suficientes para expresar mi gratitud, este trabajo lleva consigo el eco de su sabiduría y la huella de su amor. Gracias, mamá, por ser mi faro en la oscuridad y por enseñarme el valor de la perseverancia, este logro es tan tuyo como mío.

NILO JUSTINIANI GAMARRA

AGRADECIMIENTOS

En el culmen de este arduo pero gratificante camino académico, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a aquellos que han sido parte fundamental de nuestra travesía.

En primer lugar, a Dios, quien ha sido nuestra fuente de fortaleza y guía en cada paso de este viaje. Agradecemos por la sabiduría y las bendiciones que nos han permitido llegar hasta aquí.

A nuestros queridos familiares, cuyo amor y apoyo incondicional han sido pilares inquebrantables. Gracias por ser nuestro faro en momentos de dificultad y por compartir nuestra alegría en este logro compartido.

A nuestros respetados docentes, les agradecemos por compartir su conocimiento, inspiración y paciencia. Cada lección aprendida en sus aulas ha sido esencial para nuestro crecimiento académico.

A nuestro asesor, Dr. Pedro Camero, extendemos nuestro más sincero agradecimiento. Su orientación experta, apoyo constante y dedicación han sido clave para el éxito de esta tesis. Valoramos profundamente la mentoría que nos ha brindado.

A todos aquellos que, de una manera u otra, han influido en nuestra trayectoria, ya sea con palabras alentadoras, comprensión o amistad, les agradecemos de corazón.

MARIBEL BONIFAZ CCOTO

NILO JUSTINIANI GAMARRA

INDICE GENERAL

PRESENTACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iv
INDICE GENERAL	vi
INDICE DE TABLAS.....	x
INDICE DE FIGURAS	xi
SIMBOLOGÍA.....	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Problema General	2
1.3. Problemas Específicos.....	3
1.4. Justificación.....	3
1.4.1. <i>Justificación Económica</i>	3
1.4.2. <i>Justificación Ambiental</i>	3
1.4.3. <i>Justificación Social</i>	4
1.4.4. <i>Justificación Tecnológica</i>	4
1.5. Objetivo de Investigación.....	4
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.5.2. <i>Objetivo Especifico</i>	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO	6

2.1. Antecedentes Nacionales e Internacionales.....	6
2.1.1. <i>Antecedentes Nacionales</i>	6
2.1.2. <i>Antecedentes Internacionales</i>	7
2.2. Bases Teóricas	8
2.2.1. <i>Caldera</i>	8
2.2.2. <i>Partes de una Caldera</i>	9
2.2.3. <i>Clasificación de Calderas</i>	11
2.2.4. <i>Variables de Operación de Calderas</i>	16
2.2.5. <i>Accesorios de una Caldera</i>	18
2.2.6. <i>Biomasa</i>	22
2.2.7. <i>Definición del Proceso de Combustión de la Biomasa</i>	27
2.2.8. <i>Poder Calorífico</i>	31
2.2.9. <i>Dimensionamiento del Quemador</i>	32
2.2.10. <i>Otros Combustibles</i>	33
2.2.11. <i>Material Usado para la Construcción del Quemador</i>	35
2.2.12. <i>Baterías de Agua en Quemadores de Biomasa</i>	40
2.2.13. <i>Diseño</i>	41
2.2.13.1. <i>Herramientas del Diseño Industrial</i>	43
2.2.13.2. <i>Autodesk Inventor</i>	44
CAPÍTULO III	46
METODOLOGIA.....	46
3.1. <i>Ámbito de Estudio</i>	46
3.2. <i>Enfoque de la investigación</i>	47
3.2.1. <i>Naturaleza y Alcance</i>	47
3.2.2. <i>Nivel de investigación</i>	48
3.2.3. <i>Tipo de Investigación</i>	48
3.3. <i>Diseño Metodológico</i>	49
3.3.1 <i>Método General de Investigación</i>	49
3.3.2 <i>Etapas del Proceso Metodológico</i>	49
3.4. <i>Población y Muestra</i>	51

3.4.1 Población.....	51
3.4.2 Muestra.....	51
3.4.3 Justificación.....	51
3.5. Procedimiento de Construcción y Diseño	51
3.6. Instrumentos de Recolección de Datos.....	52
3.6.1 Instrumentos	52
3.7. Validación Tecnológica y Evaluación Económica.....	52
CAPITULO IV	53
DISEÑO Y EVALUACION DEL QUEMADOR A BIOMASA	53
4.1. Propuesta de Alternativas de Solución	53
4.2. Selección del Material de Construcción del Quemador	54
4.3. Características del Quemador a Biomasa	54
4.4. Proceso Productivo Para el Quemador a Biomasa	55
4.5. Cuadro Base Para el diseño del Quemador a Biomasa.....	59
4.6. Diseño de Detalle.....	62
4.6.1. Cálculo de Energía Total Requerida.....	62
4.6.2. Cálculo de la Cantidad de Leña Necesaria.....	63
4.6.3. Cálculo de la Cantidad de Petróleo D2	63
4.6.4. Cálculo de la Cantidad del Gas GLP.....	63
4.6.5. Masa Seca del Combustible Leña Eucalipto.....	64
4.6.6. Cálculo del Oxígeno Requerido	64
4.6.7. Conversión de Moles de O₂ a Masa	65
4.6.8. Cálculo de la Masa y Volumen de Aire Requerido	65
4.6.9. Cálculo del Caudal Volumétrico de Aire	66
4.6.10. Dimensionamiento del Quemador de Biomasa	67
CAPITULO V	74
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
5.1. Resultados.....	74
5.1.1. Dimensiones del Quemador	74

5.1.2. Cantidad de Biomasa Utilizada.....	76
5.1.3. Volumen de Aire Requerido.....	77
5.1.4. Reducción de Costos de Combustible.....	78
5.2. Discusión	80
5.1. Interpretación de los Resultados Más Significativos	80
5.2. Respuesta a las Preguntas de Investigación	81
5.3. Discusión de Limitaciones del Estudio.....	82
5.4. Contraste con Antecedentes Nacionales e Internacionales.....	83
5.5. Otras Observaciones Relevantes y Resultados No Esperados	83
5.6. Implicaciones y Recomendaciones	84
5.7. Reflexión Final Sobre la Importancia de los Hallazgos	86
CONCLUSIONES.....	87
RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	100
ANEXO 1: Matriz de Consistencia	101
ANEXO 2: Ficha de Registro.....	103
ANEXO 3: Registro Fotográfico.....	104
ANEXO 4: Planos de Construcción de Quemador.....	107

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Ventajas entre Biomasa y Combustibles Fósiles</i>	16
Tabla 2 <i>Composición Química de la Biomasa</i>	24
Tabla 3 <i>Composición Aproximada en la Madera de Eucalipto</i>	25
Tabla 4 <i>Composición en la Corteza del Eucalipto</i>	25
Tabla 5 <i>Composición Elemental para Madera Seca</i>	27
Tabla 6 <i>Comparativa Entre los Combustibles Como GLP, Diesel D2 y Leña Eucalipto</i>	34
Tabla 7 <i>Tabla de Composición Química del Acero A36</i>	36
Tabla 8 <i>Comparación de Alternativas de Solución</i>	53
Tabla 9 <i>Propiedades Mecánicas del Acero A36 Aplicables al Diseño de Quemadores</i>	54
Tabla 10 <i>Características del Quemador</i>	55
Tabla 11 <i>Variables base Para el Diseño del Quemador a Biomasa para una Caldera Piro tubular de 100 BHP</i>	60
Tabla 12 <i>Consumo de Biomasa</i>	76
Tabla 13 <i>Caudal y Volumen de Aire para una Combustión Completa</i>	77
Tabla 14 <i>Resumen del Consumo de Leña y Volumen Requerido</i>	78
Tabla 15 <i>Comparación de Costos entre Biomasa y Combustibles Tradicionales</i>	79
Tabla 16 <i>Recomendaciones Técnicas para Optimizar el Sistema de Biomasa</i>	85

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Partes Principales de una Caldera con Quemador a Biomasa.....	11
Figura 2 <i>Comparación entre Calderas Acuotubulares y Pirotubulares</i>	14
Figura 3 <i>Mapa Geográfica Empresa SOLEMAN</i>	47
Figura 4 <i>Esquema del Proceso Productivo de un Quemador a Biomasa</i>	56
Figura 5 <i>Recorrido de Gases en Caldera Pirotubular Horizontal de 100 BHP – Tres Pasos</i>	61
Figura 6 <i>Vista Isométrica del Quemador a Biomasa Integrado en la Caldera Pirotubular de 100 BHP</i>	70
Figura 7 <i>Vista de la Estructura Interna del Quemador Rectángulo</i>	71
Figura 8 <i>Entrada de Aire Frío y Aire Caliente en el Sistema de Combustión del Quemador</i>	72
Figura 9 <i>Vista del Refractario y Ubicación del Ventilador del Quemador a Biomasa</i>	73
Figura 10 <i>Características del Diseño</i>	76

SIMBOLOGÍA

AISI:	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del hierro y el Acero)
ANSYS:	Sistema de Análisis (Swanson Analysis Systems, Inc.)
ASTM:	American Society of Testing Material (Sociedad Americana Pruebas de Materiales)
BHP:	Caballo de Fuerza de Caldera (Brake Horsepower)
c:	Capacidad Calorífica
CAD:	Diseño Asistido por Computadora
CNC:	Control Numérico Computarizado
CxHy:	Representa la fórmula general del combustible (hidrocarburos)
EAFIT	Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico
FAO:	Food and Agriculture Organization
FD:	Tiro forzado
FEA:	Análisis de Elementos Finitos
FTFE:	Politetrafluoroetileno
HBW	Dureza Brinell con Bola de Carburo de Tungsteno
GLP:	Gas Licuado de Petróleo
GPa	GigaPascal

ID:	Tiro Inducido
J/kg°C	Julios por Kilogramo por Grado Celsius
L _v :	Calor Latente de Vaporización
m:	Masa
MJ/kg	Megajulios por Kilogramo
MPa	Mega Pascal
η:	Eficiencia
PCI:	Poder Calorífico Inferior
Q :	Caudal Volumétrico
Q:	Energía
Q_{vap} :	Energía de Vaporización
t:	Tiempo
UX:	Experiencia de Usuario
V_{aire} :	Volumen total de Aire requerido
v:	Velocidad
ΔT:	Cambio de Temperatura

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño y la evaluación técnico-operativa de un quemador a biomasa para calderas pirotubulares, orientado a reducir los costos de combustible entre 20% y 30% respecto a combustibles fósiles. Se determinó la cantidad necesaria de biomasa (38.54 kg de leña) y el volumen óptimo de aire para lograr una combustión eficiente y generación de vapor constante durante una hora de operación.

Desde el punto de vista tecnológico, el quemador permite el uso eficiente de biomasa local como fuente renovable, contribuyendo a la reducción significativa de costos operativos (S/ 19.00 frente a S/ 66.00 del gas y S/ 73.72 del petróleo). Técnicamente, el diseño asegura una combustión completa con correcta dosificación de aire y distribución del combustible, lo que se traduce en altos niveles de eficiencia térmica y menores emisiones contaminantes. Su implementación facilita la descentralización energética y promueve la sostenibilidad ambiental en la industria.

El estudio demuestra que el sistema no solo es viable económicamente, sino también robusto en su desempeño técnico, aportando una alternativa limpia para el sector industrial andino. Además, ofrece una guía práctica replicable para futuras aplicaciones que busquen optimizar el uso de biomasa en calderas pirotubulares.

Palabras clave: Biomasa, Reducción de costos, Combustible, Evaluación.

ABSTRACT

This paper presents the design and technical-operational evaluation of a biomass burner for firetube boilers, aimed at reducing fuel costs by 20% to 30% compared to fossil fuels. The required amount of biomass (38.54 kg of firewood) and the optimal air volume were determined to achieve efficient combustion and constant steam generation during one hour of operation.

From a technological perspective, the burner enables the efficient use of local biomass as a renewable source, contributing to a significant reduction in operating costs (S/ 19.00 compared to S/ 66.00 for gas and S/ 73.72 for oil). Technically, the design ensures complete combustion with proper air dosing and fuel distribution, resulting in high levels of thermal efficiency and lower pollutant emissions. Its implementation facilitates energy decentralization and promotes industrial environmental sustainability. The study demonstrates that the system is not only economically viable but also robust in its technical performance, providing a clean alternative for the Andean industrial sector. It also offers a replicable practical guide for future applications seeking to optimize the use of biomass in firetube boilers.

Keywords: Biomass, Cost reduction, Fuel, Evaluation.

INTRODUCCIÓN

Las calderas son máquinas, que por medio de un proceso de combustión y transferencia de calor generan vapor de agua. En la industria ha sido usada desde hace mucho tiempo atrás, siglo XVII, aunque se presume de su uso incluso antes, se usaban para generar energía y alimentar máquinas de vapor en la revolución industrial. En la actualidad el desarrollo de la ingeniería ha evolucionado torrencialmente en el mercado de calderas (automatización con softwares y hardwares) se extendió a varios sectores, como la producción de alimentos, la industria química, calefacción, entre otros. En el Perú las calderas se llegan a usar desde los tiempos de la colonia española, entre ellas mencionamos algunas industrias; industria alimentaria, industria petroquímica, de generación de energía, industria textil, industria de papel, salud, etc.

Según sea el diseño, se usan distintos tipos de combustible como el gas, el petróleo, leña, carbón, etc. En la presente investigación se diseñó un quemador a biomasa (leña, carbón, residuos orgánicos, etc.) para una caldera pirotubular que permite reducir costos de un 71.21% a 74.22% en el combustible a comparación con combustibles fósiles (gas o petróleo), asimismo, permite reducir emisiones toxicas al medio ambiente, menor cantidad de producción de cenizas y su posterior reutilización como abono.

En un contexto más amplio, esta investigación se sitúa en la corriente de tendencias actuales que buscan integrar energías renovables en procesos industriales. La biomasa, como fuente de energía sostenible, adquiere especial relevancia en este escenario. Además, se reconoce la urgencia de superar los desafíos ambientales y económicos vinculados al uso de combustibles fósiles, especialmente en términos de impacto en la salud y en el medio ambiente.

Esta investigación no solo contribuye al avance tecnológico en el campo de las calderas, sino que también se alinea con la creciente necesidad de soluciones innovadoras y sostenibles. Esta investigación se presenta como una respuesta estratégica que anticipa posibles regulaciones futuras, promoviendo así prácticas industriales más responsables y eficientes.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del Problema

En el contexto industrial contemporáneo, la generación de vapor mediante calderas constituye un proceso esencial para múltiples sectores productivos, como el alimentario, textil, químico y metalúrgico. En la región del Cusco, las empresas que operan con calderas pirotubulares enfrentan un incremento sostenido en los costos energéticos debido al uso predominante de combustibles fósiles, especialmente gas licuado de petróleo (GLP) y diésel. Dichos combustibles no solo implican altos costos operativos, sino que también generan emisiones contaminantes que contribuyen al calentamiento global y afectan la calidad del aire local (Ministerio de Energía y Minas, 2024; IEA, 2022).

La empresa Soleman S.R.L., dedicada al diseño y fabricación de calderas industriales, presenta actualmente un elevado gasto operativo derivado del uso de combustibles fósiles en sus sistemas térmicos. Esta situación impacta negativamente en la rentabilidad y sostenibilidad de su producción. Frente a ello, se plantea la necesidad de desarrollar tecnologías de combustión sostenibles que permitan reducir el costo energético y mitigar el impacto ambiental, aprovechando los recursos locales de biomasa disponibles, como la leña de eucalipto (FAO, 2021; González & Quispe, 2019). Según Navarrete Rodríguez et al. (2022), la biomasa proveniente del Eucaliptus glóbulos representa una alternativa renovable de bajo costo energético, con potencial para su aprovechamiento térmico en procesos industriales. Sin embargo, su aprovechamiento eficiente requiere un diseño técnico adecuado

del quemador, que permita una combustión completa y estable, asegurando el rendimiento térmico y la reducción de costos.

Diversos estudios señalan que el empleo de biomasa como fuente energética puede reducir hasta en 70–90 % los costos de combustible respecto a los derivados del petróleo, además de disminuir significativamente las emisiones de CO₂, CO y NO_x (González & Quispe, 2019; FAO, 2021). Sin embargo, el diseño e implementación de un quemador a biomasa para calderas industriales requiere un estudio detallado de las variables térmicas, de combustión y del flujo de aire, con el fin de garantizar una eficiencia energética mínima del 80 %, conforme a los estándares técnicos de la ASME BPVC (2022) y las normas UNE-EN ISO/IEC 17025 (2021).

La carencia de modelos tecnológicos locales adaptados a las condiciones ambientales de Cusco —caracterizadas por la altitud y presión atmosférica reducida— limita la adopción de energías renovables en procesos térmicos industriales. En consecuencia, surge la necesidad de diseñar y evaluar un quemador a biomasa que responda a las demandas térmicas de una caldera pirotubular de 100 BHP, optimizando el consumo de combustible y contribuyendo a la transición energética sostenible promovida por el Ministerio de Energía y Minas (2024) y la FAO (2021).

1.2. Problema General

¿Será posible diseñar y evaluar un quemador a biomasa (eucalipto) para una caldera pirotubular que permita reducir los costos de combustible en la empresa SOLEMAN – Cusco?

1.3. Problemas Específicos

- ¿Cuáles serán las dimensiones óptimas del quemador a biomasa (eucalipto) que garanticen un funcionamiento eficiente en la reducción de costos de combustible?
- ¿Qué cantidad de biomasa (eucalipto) se requerirá para generar el calor necesario que asegure el adecuado funcionamiento térmico de la caldera pirotubular?
- ¿Qué caudal de aire será necesario para lograr una combustión completa y estable en el quemador diseñado para la caldera pirotubular?

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación Económica

Con la implementación de este trabajo, contribuirá con el diseño de un quemador a leña que permitirá bajar costos operativos en la generación de vapor y permitirá beneficiar a los productores de leña de la región.

La biomasa, como fuente de energía renovable, ofrecerá la oportunidad de estabilizar y reducir los costos de combustible en los diferentes sectores de la industria (productores lácteos, Tecnopor, sauna, piscinas, etc.).

1.4.2. Justificación Ambiental

La evaluación de un quemador a biomasa contribuirá directamente a la mitigación del cambio climático al disminuir las emisiones de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos. Este enfoque sostenible contribuirá a la conservación de los recursos naturales y fomentará prácticas responsables en la gestión de la energía (reforestación).

1.4.3. Justificación Social

Con el diseño de este quemador no solo aborda aspectos económicos y ambientales, sino que también tiene una relevancia significativa en el ámbito social. La implementación de tecnologías sostenibles, como un quemador a biomasa, no solo impacta la eficiencia operativa de la empresa, sino que también contribuye positivamente a la comunidad y sus miembros con la comercialización masiva de la leña (eucalipto) y la cultura de reforestación.

1.4.4. Justificación Tecnológica

Este trabajo se sustenta en la necesidad de adoptar tecnologías innovadoras para optimizar la eficiencia energética y la gestión de recursos en el contexto industrial. La implementación de un quemador a biomasa representa una solución tecnológica avanzada con el potencial de transformar la matriz energética, aprovechando las ventajas técnicas que ofrece.

1.5. Objetivo de Investigación

1.5.1. Objetivo General

Diseñar, optimizar y evaluar el rendimiento técnico de un quemador de biomasa (eucalipto) para una caldera pirotubular, con el fin de reducir costos de combustible y mejorar la eficiencia energética en la empresa SOLEMAN – Cusco.

1.5.2. Objetivo Especifico

- Calcular las dimensiones del quemador de biomasa para una caldera pirotubular para la evaluación de su funcionamiento en la reducción de costos de combustible.
- Calcular la cantidad de biomasa requerida en el quemador para el funcionamiento de una caldera pirotubular.
- Calcular la cantidad de aire (comburente) requerido para una combustión completa en el quemador de una caldera pirotubular.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Nacionales e Internacionales

2.1.1. Antecedentes Nacionales

(Aguilar, A. 2023), en su trabajo llamado: *Diseño de un prototipo de caldera que usa como combustible biomasa (hueso de aceituna, hueso de palta y cascara de almendras) aplicado a un sistema de calefacción, para el puesto de salud Imata en la región altoandina de Arequipa*. Realizado en la Universidad Católica de Santa María.

El trabajo tiene como objetivo diseñar un prototipo de caldera que utiliza como combustible residuos orgánicos producidos en la región Arequipa (hueso de aceituna, hueso de palta y cáscara de almendras) aplicado a un sistema de calefacción para la posta médica de Imata y con un costo económicamente menor que el ofrecido por el mercado actual de calderas. Como resultado para las pruebas se usaron 3 tipos de combustible alcanzando un 95% de eficiencia y una potencia mínima de 80KW en cada caso, reduciendo los costos del diseño de una caldera para su sistema de calefacción.

La Tesis doctoral: *Diseño de una caldera piroacuotubular (mixta) para la reducción de emisiones de gases de combustión mediante la generación simultánea de agua caliente y vapor de agua, presentada por Duilio Leoncio Aguilar Vizcarra* en la Universidad Nacional Federico Villarreal (Lima, Perú, 2023). Esta investigación propone un diseño innovador de caldera piroacuotubular que genera simultáneamente agua caliente y vapor de agua, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de combustión. Mediante una metodología que

incluye dimensionamiento, construcción y análisis térmico-analítico, se calculan los volúmenes de agua, masas metálicas y transferencia de calor, aplicando el método de Ganapaty para optimizar la velocidad de los gases y la caída de presión. Los resultados demuestran que, en comparación con la generación paralela en dos unidades independientes, el diseño propuesto reduce significativamente las emisiones de CO₂ en 55.65% y de CO en 55.66%, así como el consumo de combustible en 55.64%. Se concluye que esta caldera de tipo mixto constituye una solución tecnológica sostenible que contribuye a la mitigación de gases de efecto invernadero y al cumplimiento de los objetivos ambientales globales.

2.1.2. Antecedentes Internacionales

Raafael Moral Salas (2024) de la Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Jaén, España; en su trabajo *Diseño y Cálculo de una Caldera Pirotubular de Vapor de 750 kW, para una Producción de 1000 kilos de vapor/hora a 8 bares, como Condiciones de Trabajo*, presenta el diseño y cálculo detallado de una caldera pirotubular de biomasa con una capacidad de producción de 1000 kg de vapor por hora a una presión de 8 bares. El estudio incluye un análisis exhaustivo de cinco combustibles de biomasa —pellets EN Plus, hueso de aceituna, cáscara de almendra, astillas de madera y residuos de poda de olivar— evaluando su combustión, emisiones y eficiencia energética. Se emplea la normativa UNE-EN 12953 para el dimensionamiento de los componentes sometidos a presión, garantizando la seguridad y funcionalidad del equipo. Adicionalmente, se modela la caldera en 3D mediante SOLIDWORKS y se realiza un estudio termodinámico para calcular la transferencia de calor y el rendimiento global. Los resultados indican que el hueso de aceituna y los pellets son los combustibles más eficientes, con rendimientos superiores al 80%. Finalmente, se elabora un

presupuesto estimado y se proponen mejoras para optimizar el rendimiento, como la ampliación de la longitud de la caldera o la incorporación de sistemas de recuperación de calor.

En su tesis de maestría: *Conversion of Furnace Oil Fired Boiler to Biomass (Gliricidia) Fired (External/Internal) Furnace Boiler*, para la Universidad Real de Tecnología (KTH) de Suecia, Kahandawa Arachchilage (2011) investiga la conversión técnica, económica y ambiental de calderas de fueloil a biomasa, utilizando Gliricidia como combustible principal. El estudio compara dos métodos de conversión aplicados en Sri Lanka: un horno externo con pared de agua (water-wall) para una caldera de 18 ton/h en una fábrica de papel, y un horno interno con parrilla para una caldera de 2 ton/h en una fábrica textil. Los resultados demuestran que la sustitución es técnicamente viable, logrando una relación de reemplazo de 1 litro de fueloil (derivado de petróleo) por 3.5 kg de biomasa. Económicamente, los ahorros operativos superan el 60%, con períodos de retorno de inversión de 3 a 4 meses para ambos casos. Ambientalmente, el proyecto reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, con un potencial de reducción de 6,468 toneladas de CO₂ anuales para la fábrica de papel, haciéndolo elegible para Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). El trabajo concluye que la conversión a biomasa es una solución sostenible y económicamente atractiva para la industria, aprovechando los recursos locales de biomasa.

2.2.Bases Teóricas

2.2.1. Caldera

La caldera es un equipo o dispositivo de generación de calor, agua caliente y vapor a partir de una transferencia de calor mediante una combustión de distintos combustibles, se

trata de un recipiente cerrado donde se lleva a cabo el calentamiento del agua por medio de una cámara de combustión gracias al comburente y al aire donde se termina de transformar el agua de estado líquido a estado gaseoso a temperaturas presiones distintas a la atmosférica. (ACHS, 2020).

Son muy utilizadas en la industria, ya sea con fines de esterilización, calentar otros fluidos o generar electricidad, industria minera, industria alimentaria, industria petroquímica, de generación de energía, industria textil, industria de papel, etc. (ACHS, 2020).

Formas de transferencia de calor en una caldera:

- a) Por conducción: La conducción es una forma de transferencia de calor que ocurre por el contacto directo entre las llamas del fuego y el casco de las calderas que contienen el líquido que transporta el calor (Arnijos & Morales, 2012).
- b) Por radiación: La radiación es otra forma de transferencia de calor que ocurre sin tener un contacto directo con las llamas (Arnijos & Morales, 2012).
- c) Por convección: La convección es una forma de transferencia de calor que gracias a los gases calientes que son producidos en el proceso de combustión, no se tiene un contacto directo con las llamas, pero si hay un cuerpo de por medio que genera la transferencia de calor. (Arnijos & Morales, 2012).

2.2.2. Partes de una Caldera.

Las calderas tienen un peso muy considerable en relación a la potencia que pueden generar, estos equipos tienen distintas partes básicas exceptuando las partes eléctricas de la caldera (ventilador, electrobomba, etc.), Antay & Pfuro, (2022), entre las partes principales podemos ver en la Figura 1.

a) Casco u hogar

Es el cuerpo de la caldera, lleva tubos en su interior por donde pasa la llama transfiriendo calor sujetos por los espejos (Caiza y Ojeda, 2023).

b) Chimenea

Es por donde se eliminan los gases de combustión una vez que se hizo la transferencia de calor (Caiza y Ojeda, 2023).

c) Quemador

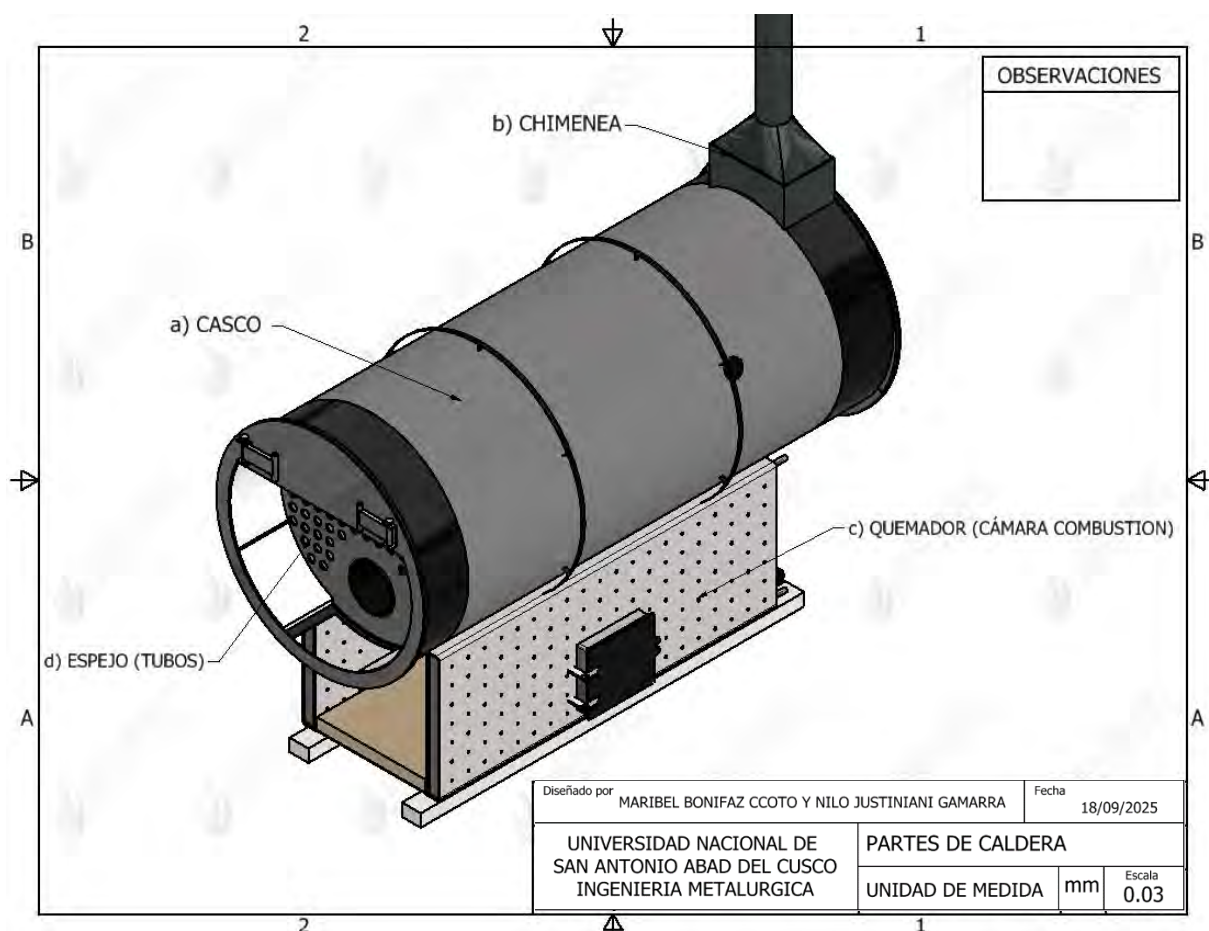
Llamado también como hogar u cámara de combustión es un tubo cilíndrico que va dentro de la caldera, donde soporta la mayor cantidad de calor generado por la combustión. (Antay & Pfuro, 2022).

d) Espejos

Sección de convección (tubos), la caldera lleva dos espejos que están acoplados con el casco o cuerpo de la caldera, estos llevan una cierta cantidad de agujeros por donde pasan los tubos de intercambio de calor (Caiza y Ojeda, 2023). Tubos cilíndricos que están soldados en paralelo con el tubo del hogar, es donde ocurre el intercambio de calor con los gases de combustión al fluido (agua) a través de las superficies de calefacción (Antay y Pfuro, 2022).

Figura 1

Partes Principales de una Caldera con Quemador a Biomasa.



Nota. El gráfico representa las partes de una caldera diseñada en la empresa SOLEMAN.

2.2.3. Clasificación de Calderas.

Las calderas se clasifican en diversas formas, ya sea por la disposición del fluido, su movilidad, presión de trabajo, por su número de pasos, Caiza y Ojeda, (2010), por el ingreso de agua, por la posición de los tubos de intercambio, por el combustible utilizado, por el tiro de aire, entre los principales tenemos:

2.2.3.1. Calderas Acuotubulares.

En este tipo de calderas el agua que ingresa se conduce por el interior de los tubos que se encuentran dentro de la caldera bañándolos a estos tubos exteriormente por los gases de combustión (García, 2022), se emplean para aumentar el intercambio y con ello, conlleva a soportar mayores presiones, siendo costosa, presentando problemas de suciedad en el agua y tiene una menor inercia térmica.

- Se utilizan principalmente para altas demandas de presión de vapor considerando el diseño, desde 20 HP hasta 2000 HP.
- El tiempo de arranque para producir vapor a su presión de trabajo es mínimo.
- El vapor que se produce en este tipo de calderas es un vapor seco que es mejor aprovechado para sistemas de transmisión.

2.2.3.2. Calderas Pirotubulares.

Las calderas de vapor piro tubulares, humo tubulares o conocidas también por calderas de tubos de humo o humotubulares, en estas calderas el fuego pasa dentro de los tubos que a su vez ellos se encuentran dentro del cuerpo de la caldera. durante el paso por los tubos, se transfiere el calor a la zona de agua circulante hasta hacerla hervir, los vapores resultantes burbujan con el resto de agua caliente y llegan a acumularse en la parte superior (domo) para poder extraerla para los diferentes procesos que se requiera. En la parte superior que es el domo donde se acumula el vapor lleva una válvula de seguridad hasta más de una para impedir que exceda presiones peligrosas que afecten la integridad de la caldera, una de las desventajas de las calderas pirotubulares es que presenta una gran pérdida de humos

(Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018). En la Figura 2 podemos ver diferencias entre calderas pirotubulares y calderas acuotubulares.

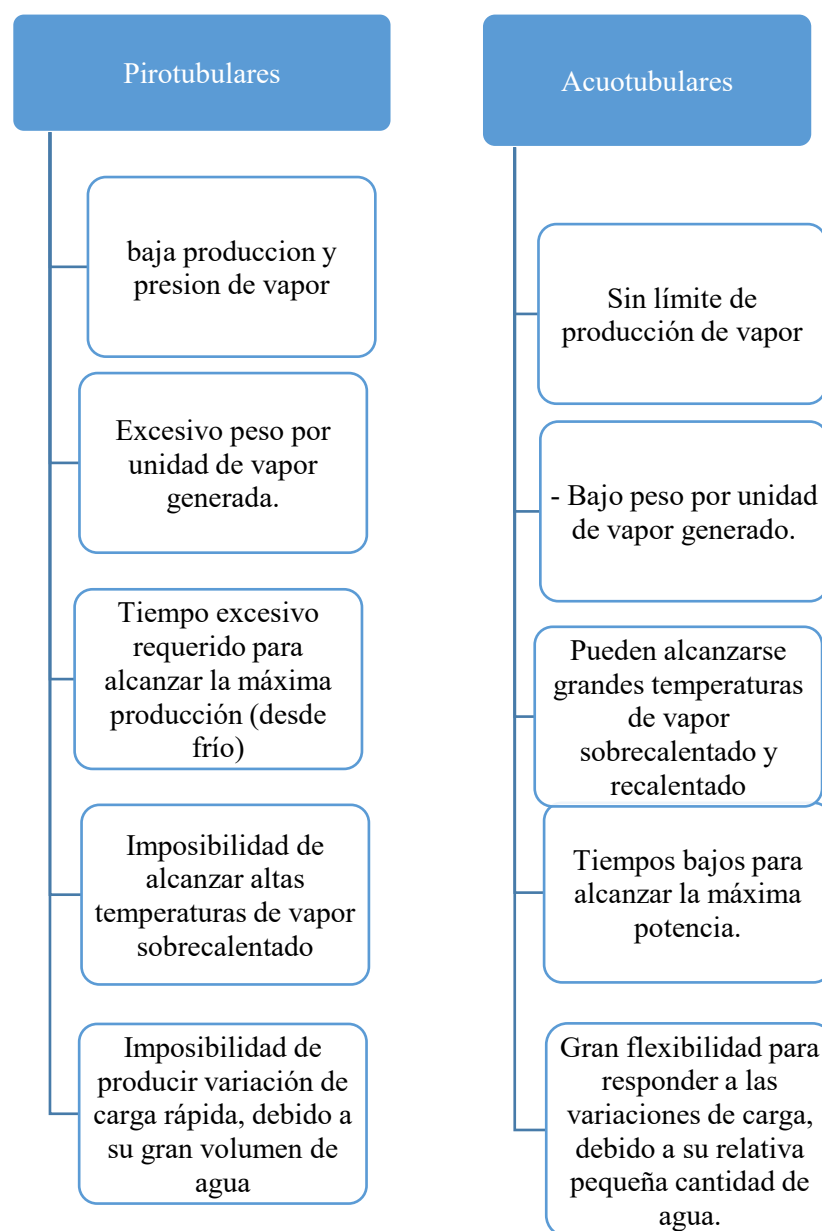
2.2.3.3. Calderas de Biomasa.

El concepto de biomasa se refiere a toda materia orgánica que proviene de plantas, arboles, y desechos animales que se convierten en energía útil, energía térmica, eléctrica o carburante vegetal a partir del proceso de la fotosíntesis. Su principal característica es tener un bajo contenido de carbono y alto contenido de oxígeno y compuestos volátiles. El uso de la biomasa para la energía es inverso de la fotosíntesis, las plantas que contienen clorofila transforman el dióxido de carbono y el agua en productos minerales sin valor energético a un alto contenido energético y a su vez sirven como alimento para otros seres vivos. Además, la biomasa es una excelente fuente renovable de carbón que puede ser procesada en combustibles sólidos, combustibles líquidos y combustibles gaseosos (Lenntech, 2024).

Se entiende desde el punto de vista ambiental un aprovechamiento energético, no contribuye con los gases de efecto invernadero, las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera es neutro a comparación con los restos fósiles; en la Tabla 1 se puede ver más de las ventajas del uso de biomasa como combustible.

Figura 2

Comparación entre Calderas Acuotubulares y Piro tubulares.



Nota. Esta tabla muestra la diferencia entre las calderas acuotubulares y piro tubulares.

Elaboración propia.

Las calderas de biomasa son las que emplean combustibles naturales como fuente generadora de energía, estos pueden ser los pellets de madera, hueso de aceituna, huesos de palta, cáscaras de almendras, cáscaras de otros frutos secos o residuos forestales para generar la energía térmica requerida por un sistema de calefacción a través de radiadores, aire o suelo radiantes (Aguilar, 2023).

Con las calderas de biomasa se logra un importante ahorro económico en la adquisición de combustible y una enorme disminución de emisiones de carbono y azufre. (Bentancurt & Ospina, 2010).

Entre las calderas a biomasa conocidas tenemos:

- a) Las calderas de pellets producen pequeña potencia por el hecho de que son comprimidos de residuos forestales, residuos de podas o serrines en forma cilíndrica de pequeño tamaño (5 a 6 mm de diámetro y 2 a 3 cm de longitud). Gracias al tamaño de los pellets y por la forma de alimentación a las calderas de biomasa puede ser automatizada ya que estos combustibles pueden ser almacenados en un silo (Lenntech, 2024).
- b) Las calderas de briquetas son comprimidos de biomasa con forma cilíndrica, sus dimensiones son mayores a los de los pellets (20 a 50 cm de longitud y 10 a 15 cm de diámetro), la composición de las briquetas es parecida a la de los pellets de igual forma ayuda en su almacenamiento, su limpieza y además de facilitar su transporte a diferencia de la leña (Lenntech, 2024).
- c) Las calderas de leña son aquellas que también entran en la definición de calderas de biomasa, pero en realidad en estas calderas sólo utilizamos leña directamente. Poseen una potencia mayor que las calderas de pellets (Lenntech, 2024).

Tabla 1*Ventajas entre Biomasa y Combustibles Fósiles*

Biomasa	Combustibles fósiles
Es abundante	Escasa
Inagotable	Se agotan
Precios bajos y estables	Constante incremento de precios
Genera puestos de trabajos locales	Beneficio hacia el exterior
Limpia y moderna	Malos olores y riesgos de explosiones
Mínimas emisiones de gases nocivos CO ₂ y CO neutro	Altas emisiones de gases nocivos CO ₂ y CO
Producto local y abundancia	Viene del extranjero

Nota. En esta tabla se muestra las diferencias entre la biomasa y combustibles fósiles en el uso como combustible de una caldera. Fuente: elaboración propia.

2.2.4. Variables de Operación de Calderas.

Las calderas tienen varias variables importantes que se controlan y dan seguimiento para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Estas variables son:

a) Vapor

La función principal de una caldera es convertir el agua en vapor a través de la aplicación de calor. Esto generalmente se logra calentando el agua a alta presión, lo que eleva su temperatura por encima del punto de ebullición y la convierte en vapor (Fiteferra, 2023).

b) Agua

El flujo de agua hacia y desde la caldera debe ser controlado para mantener el equilibrio térmico y evitar problemas como la formación de depósitos o la cavitación (Fiteferra, 2023).

Mantener un nivel de agua adecuado en la caldera es esencial para evitar problemas de sobre calefacción y garantizar una transferencia de calor efectiva (Fiteferra, 2023).

c) El aire

El suministro de oxígeno adecuado para la combustión es necesario para lograr una quema completa y eficiente del combustible (Fiteferra, 2023).

d) Presión

La presión en una caldera es una variable crítica ya que puede afectar la seguridad y eficiencia de la operación. La presión se mide en psi (libras por pulgada cuadrada perteneciente al sistema imperial o anglosajón) o en bar (Fiteferra, 2023).

e) La temperatura

La temperatura del agua o del vapor generado en la caldera es esencial para diversos procesos industriales y aplicaciones de calefacción. Se mide en grados Celsius o Fahrenheit (García, 2022).

f) Combustible

Si la caldera funciona con combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo o el carbón, el suministro y la composición del combustible son factores críticos para el rendimiento y la eficiencia (García, 2022).

g) Eficiencia

La eficiencia de la caldera se calcula en función de la cantidad de calor generado en relación con la energía contenida en el combustible utilizado (García, 2022).

h) Presión de vapor

Si la caldera produce vapor, la presión del vapor es importante para diversas aplicaciones que dependen de la energía del vapor (García, 2022).

2.2.5. Accesorios de una Caldera.

a) Control de nivel

Todas las calderas tienen, por lo menos, un indicador o control de nivel de agua que consta de un tubo de cristal (alrededor de ellos se debe colocar protectores que no deben impedir la visibilidad del nivel del agua). Su función principal es asegurar que al encender el equipo el nivel de agua en el interior de la caldera se encuentre con la cantidad adecuada para una segura operación. Cuando sube el nivel de agua por arriba del valor medio envía una señal para que la bomba se detenga en caso contrario, baje el nivel de agua, hace que la bomba se encienda. (Fiteferra, 2023).

Los indicadores o control de nivel están predispuestos a daños por la corrosión de los químicos en el agua de la caldera, y también a la erosión durante la purga de fondo, especialmente en el lado del vapor. Cualquier señal de corrosión o de erosión dispone de un tubo de cristal (Fiteferra, 2023).

b) Manómetro

Un manómetro permite la medición de la presión interna de la caldera y necesita por lo menos un control de presión que ayude a los operadores a monitorear y mantener la presión dentro de los límites recomendados. Cuando el agua se calienta, se expande inmediatamente y ocupa un mayor espacio por lo tanto el manómetro refleja la presión en el recipiente durante esa expansión, regulando el funcionamiento y ayudando a la caldera a evitar situaciones peligrosas (García, 2022).

La unidad de medida común para la presión en calderas es PSI (libras por pulgada cuadrada) o Bar. El manómetro se instala en un lugar estratégico de la caldera, generalmente en el panel frontal, para que los operadores puedan monitorear fácilmente la presión (García, 2022).

c) Válvula de seguridad

Es esencial para la seguridad de la caldera. Su función principal es liberar automáticamente la presión si esta supera el límite máximo, evitando así posibles explosiones, (López et al., 2021).

Cuando la presión en la caldera supera el nivel seguro establecido, la válvula de seguridad se abre automáticamente para permitir la liberación controlada de vapor o fluido. Esta liberación ayuda a prevenir situaciones de sobrepresión que podrían provocar daños en la caldera o incluso ocasionar una falla catastrófica (López et al., 2021).

d) Válvulas de antirretorno

Las válvulas de antirretorno, también conocidas como válvulas de retención, son dispositivos que permiten el flujo de un fluido en una dirección y evitan su retroceso en la dirección opuesta. En el contexto de calderas, estas válvulas se utilizan para controlar el flujo de vapor o agua y garantizar que se mueva en la dirección correcta a través de los diferentes componentes del sistema (Moscoso, 2014).

e) Ventilador

El sistema de alimentación de aire en una caldera es un componente crucial que asegura la combustión eficiente del combustible, ya sea gas de mar, petróleo, carbón o biomasa. La cantidad adecuada de aire es esencial para lograr una relación óptima entre el combustible y el oxígeno, lo que contribuye a una combustión completa (evitar la formación de productos de combustión no deseados) y, por lo tanto, a la eficiencia del sistema. Según ACHS (2020) uno de los dispositivos clave en este sistema es el ventilador de aire.

f) Extractor

Sistema de Eliminación de Humos y Gases de Combustión: Incluye chimenea y dispositivos de escape que dirigen los productos de combustión de manera segura fuera del sistema (Aguilar, 2023).

Un extractor en una caldera, también conocido como ventilador de tiro o extractor de gases, es un componente esencial del sistema de ventilación que se encarga de evacuar los gases de combustión generados durante el proceso de quema de combustible en la caldera. Su función principal es crear un flujo de aire a través del sistema de escape, permitiendo que los productos de la combustión sean expulsados de manera segura al exterior (Aguilar, 2023).

g) Motobomba

Una motobomba en una caldera es una unidad compuesta por un motor y una bomba que trabajan en conjunto para mover agua u otro fluido a través del sistema de la caldera. Este sistema de circulación es esencial para garantizar una transferencia de calor efectiva y mantener condiciones operativas seguras y eficientes. Según Aguilar (2023).

h) Sistema de control

Un sistema de control automático en una caldera es un conjunto integrado de instrumentación, sensores, actuadores y lógica de control que trabaja de manera automatizada para gestionar y mantener los parámetros operativos de la caldera dentro de rangos predeterminados. El objetivo principal es regular la temperatura, la presión y otros factores críticos para asegurar un funcionamiento seguro y eficiente (Aguilar, 2023).

i) Empaquetadura

Las empaquetaduras en una caldera son materiales sellantes que se colocan entre las superficies de unión para prevenir fugas de fluidos, ya sea agua de mar o vapor. Estas empaquetaduras se utilizan en varias ubicaciones dentro de una caldera donde se requiere sellado hermético para garantizar la seguridad operativa y la eficiencia del sistema, para Aguilar (2023).

j) Válvulas de purga

Las válvulas de purga de fondo son dispositivos de purga instalados en la parte inferior de la caldera para eliminar de manera periódica los sedimentos y lodos que tienden a acumularse en el fondo del tanque. Estos sedimentos pueden consistir en minerales, partículas

sólidas suspendidas, lodos y otros materiales que se depositan con el tiempo debido al proceso de calentamiento del agua, Aguilar (2023)

k) Válvulas de agua de alimentación

Regula el flujo de agua de alimentación a la caldera. Asegúrese de que la caldera siempre tenga la cantidad adecuada de agua para mantenerla funcionando de manera segura.

Recuerde que la elección de accesorios específicos dependerá de la configuración exacta de la caldera y de los requisitos particulares de su aplicación. Además, siempre es crucial cumplir con las normativas y regulaciones locales relacionadas con la seguridad y las emisiones (García, 2022).

l) Quemadores

Los quemadores son dispositivos ubicados en la caldera que se encargan de la combustión controlada del combustible para generar calor. Pueden utilizar diversos tipos de combustibles, como gas natural, gasóleo, biogás, o incluso combustibles sólidos en ciertos tipos de calderas. La función principal del quemador es proporcionar una llama eficiente y segura para calentar el agua o el fluido térmico en la caldera, para García (2022).

2.2.6. Biomasa

La biomasa se define como la materia orgánica proveniente de animales, vegetales y residuos industriales que puede ser utilizada como fuente de energía renovable (Scribd, s.f.). Es un recurso energético limpio y sostenible que puede reemplazar el consumo de combustibles fósiles para la producción de electricidad y calor (Burra & Gupta, 2019).

La biomasa se considera un combustible neutro en carbono, ya que el dióxido de carbono (CO_2) emitido durante su combustión es aproximadamente igual al que absorbió durante su crecimiento, lo que contribuye a la reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero (Quintero González & Quintero González, 2015).

2.2.6.1 Clasificación según el origen de la Biomasa

Pueden clasificarse en:

- Biomasa forestal: residuos de actividades forestales como ramas, cortezas y hojas.
- Biomasa agrícola: residuos de cultivos y subproductos agroindustriales.
- Biomasa residual urbana y animal: residuos orgánicos domésticos, estiércol y lodos de depuradoras (Zevallos, 2015; Nuñez, 2012).

Este tipo de biomasa residual es importante para aprovechar subproductos que de otro modo serían desechos y para minimizar el impacto ambiental (Pradhan et al., s.f.)

2.2.6.2 Composición Química de la Biomasa

El poder calorífico inferior (PCI) de la biomasa seca, como el eucalipto, se encuentra alrededor de 17 MJ/kg, aunque varía según contenido de humedad y tipo de biomasa (Scribd, s.f.). en la Tabla 2 se muestra la composición promedio de la biomasa en general.

Tabla 2*Composición Química de la Biomasa*

Componente	Porcentaje (%) Aprox.
Carbono (C)	44 - 48
Hidrógeno (H)	5 - 6
Oxígeno (O)	35 - 40
Nitrógeno (N)	0.5 o menos
Cenizas	1.5 - 5
Materia volátil	70 - 83
Carbono fijo	13 - 22
Lignina	22 - 33
Celulosa	43 - 47
Hemicelulosa	16 - 21

Nota: según, (Scribd, s.f.).

2.2.6.3 Composición del Eucalipto Seco

La composición del eucalipto seco, conocido técnicamente como *Eucalyptus grandis*, puede variar según la parte del árbol (tales como la parte de la madera, la corteza y las hojas) y las condiciones de crecimiento. A continuación, se presenta una aproximación de los principales componentes de la madera seca de *Eucalyptus grandis*, una especie frecuentemente estudiada, y algunos datos de hojas y aceites esenciales relevantes para un panorama general.

a) Madera de eucalipto

La composición se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3*Composición Aproximada en la Madera de Eucalipto*

Componente	Porcentaje en masa (%)
Celulosa	48 – 56
Lignina	27 – 29
Hemicelulosas	17 – 21
Extractivos solubles	4 – 8 (agua/etanol-benceno)
Cenizas	0.3 – 1.7

Nota: La proporción puede variar ligeramente según la edad y parte del árbol analizada (base, altura media, copa). (Irak. R, 2006).

b) Corteza de eucalipto

Los porcentajes específicos fluctúan según la edad y condiciones ambientales. (Leal et al. 2011). Su composición se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4*Composición en la Corteza del Eucalipto*

Componente	Porcentaje en masa (%)
Holocelulosa (celulosa + hemicelulosa):	35 – 47%
Sustancias solubles en agua caliente:	10 – 20%
Sustancias solubles en etanol:	4 – 10%
Lignina:	20 – 28%
Cenizas:	5 – 10%

Nota: según, Leal et al. (2011).

c) Hojas secas de eucalipto

- Aceite esencial: 1 – 3.5% (del peso de la hoja seca)
- Principal componente: 1,8-cineol (eucaliptol) $\geq 70\%$ del aceite esencial, seguido de otros terpenos y alcoholes. (ITTO, 2025)
- Celulosa, lignina y hemicelulosas: componen la mayor parte del residuo estructural.
- Humedad residual tras secado a peso constante: $<10\%$. (ITTO, 2025)

2.2.6.4 Procesos de Conversión Energética

La biomasa puede transformarse en energía a través de varios procesos:

- Combustión directa: oxidación completa para generación de calor en calderas y hornos, con un exceso de aire típico del 20-40% para asegurar la combustión completa (Análisis teórico de combustión, s.f.).
- Gasificación: conversión en gases combustibles mediante reacción parcial con aire o vapor.
- Pirólisis: descomposición térmica en ausencia de oxígeno para producir biocarbón, gases y líquidos.
- Digestión anaeróbica: descomposición biológica para producir biogás (Quintero González & Quintero González, 2015).

2.2.6.5 Ventajas Energéticas de la Biomasa

El uso de biomasa contribuye a:

- La reducción de emisiones netas de CO₂, mitigando el cambio climático (Quintero González & Quintero González, 2015).
- La valorización de residuos orgánicos, disminuyendo la contaminación ambiental (Pradhan et al., s.f.).
- La generación de energía renovable y local, con impacto positivo en la economía regional (Scribd, s.f.)

2.2.7. Definición del Proceso de Combustión de la Biomasa

2.2.7.1. Proceso de Combustión

La combustión de biomasa es una reacción química de oxidación rápida de los componentes orgánicos de la biomasa en presencia de oxígeno, liberando energía en forma de calor, además de producir dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y cenizas minerales (Demirbas, 2005, Fedepalma, 2020, EOI, 2015).

Tabla 5

Composición Elemental para Madera Seca

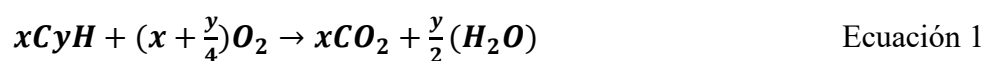
Elemento	% en masa aproximado
Carbono (C)	45–50%
Hidrógeno (H)	5–6%
Oxígeno (O)	40–45%
Nitrógeno (N)	<1%
Azufre (S)	<0.1%

Nota: elaboración propia.

La biomasa está compuesta principalmente por carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y pequeñas cantidades de azufre (S) esto se ve en la Tabla 2. La composición elemental para madera seca (eucalipto) se muestra en la Tabla 5.

2.2.7.2. Reacción Estequiométrica de la Combustión

La reacción completa de combustión para un hidrocarburo genérico $x\text{C}_y\text{H}$ (como la biomasa o la leña) se expresa estequiométricamente como:



$x\text{C}_y\text{H}$ representa la fórmula general del combustible, donde:

- x es el número de átomos de carbono
- y es el número de átomos de hidrógeno
- $x\text{C} = 44.05\% = 0.445$
- $y\text{H} = 5.24\% = 0.0524$

Esta ecuación indica que para oxidar completamente el carbono e hidrógeno contenidos en el combustible se requiere combinarlo con oxígeno formando dióxido de carbono y agua.

Para la biomasa (eucalipto) cuyo carbono e hidrógeno están en proporciones específicas, y considerando también el oxígeno que forma parte de la composición, se realiza un balance similar, las reacciones de combustión completa del carbono e hidrogeno en biomasa son:

- Combustión completa del carbono:



Ecuación 2

- Oxidación del hidrógeno:



Ecuación 3

2.2.7.3 Consumo de Combustible Considerando Eficiencia

La cantidad de combustible necesaria se calcula según la ecuación 4:

$$m_{combustible} = Q_{total}/PCI \times \eta$$

Ecuación 4

Donde:

- $m_{combustible}$ es la masa de leña en kg
- Q_{total} es el calor total
- PCI es el poder calorífico inferior del combustible (kcal/kg)
- η es la eficiencia del quemador/caldera (decimal)

➤ Cantidad de masa seca de leña

$$m_{seca} = m_{total} \times (1 - humedad)$$

Ecuación 5

2.2.7.4 Oxígeno Necesario por kg de Leña Seca

Para combustión completa:

- Cada mol de carbono requiere 1 mol O_2 .

- Cada mol de hidrógeno requiere 0.5 mol O_2 .

➤ **Cálculo del oxígeno requerido**

La combustión completa se modela químicamente como la oxidación del carbono e hidrógeno:



Cada mol de carbono requiere un mol de oxígeno para formar dióxido de carbono y cada mol de hidrógeno requiere medio mol de oxígeno para formar agua.

El número de moles de oxígeno necesario para masa m es:

$$nO_2 = m \times \frac{x_C}{MC} + m \times \frac{x_H}{4MH} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- $MC=12\text{g/mol}=0.012\text{kg/mol}$
- $MH=1\text{g/mol}=0.001\text{kg/mol}$

➤ **Conversión de moles de O_2 a masa**

$$mO_2 = nO_2 \times MO_2 \quad \text{Ecuación 9}$$

- $MO=32\text{g/mol}=0.032\text{kg/mol}$

2.2.7.5 Caudal Volumétrico de Aire

El caudal volumétrico de aire (Q) necesario para la combustión está relacionado con el volumen total de aire requerido (V_{aire}) y el tiempo de combustión (t) según:

$$Q = V_{\text{aire}}/t$$
Ecuación 10

Donde:

- Q es el caudal volumétrico en m^3/s o m^3/h ,
- V_{aire} es el volumen total de aire requerido (m^3),
- t es el tiempo durante el cual se proveerá ese volumen (s o h)

2.2.8. Poder Calorífico

El Poder Calorífico Inferior (PCI) de la biomasa indica la cantidad de energía liberada por la combustión de un kilogramo de biomasa seca, descontando la energía de vaporización del agua formada. Para el eucalipto y maderas similares (Fedepalma, 2020; R. Paredes, 2019), el PCI es aproximadamente:

$$\text{PCI} \approx 17\text{MJ/kg}$$

Este valor puede variar según el contenido de humedad y la composición química

Además, en investigaciones peruanas sobre eucalipto se han reportado valores promedio del orden de 19.5 MJ/kg para eucalipto peruano muy seco, mostrando variación según especie y condiciones de humedad. (Revista IMASI, 2021)

Para leña con 20% de humedad, el valor energético efectivo disminuye respecto al PCI debido al contenido de agua que utiliza parte de la energía para evaporarse. Sin embargo, el rango aproximado a considerar para el cálculo es alrededor de 17 MJ/kg con base en esta humedad habitual para trabajo y evaluación energética. (Garcia. G, 2013).

La energía requerida para calentar un volumen de agua se calcula con la fórmula:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad \text{Ecuación 11}$$

donde:

- Q es la energía
- m es la masa de agua en kg
- c es la capacidad calorífica del agua (MJ/kg°C)
- ΔT es el cambio de temperatura (°C)

Para vaporizar el agua, se añade la energía de vaporización:

$$Q_{vap} = m \times L_v \quad \text{Ecuación 12}$$

donde:

- L_v es el calor latente de vaporización (aprox. 539 kcal/kg a presión atmosférica)

2.2.9. Dimensionamiento del Quemador

El dimensionamiento de la sección transversal del conducto de entrada de aire es fundamental para garantizar una velocidad apropiada que facilite una buena mezcla y combustión. La velocidad habitual del aire en quemadores de biomasa se encuentra entre 2 y 5 m/s (García y Sánchez, 2018).

El caudal volumétrico (Q) se relaciona con la velocidad del fluido (v) y el área transversal (A) del conducto porque el volumen de aire que pasa por segundo depende de cuánto "espacio" (área) atraviesa y a qué velocidad se mueve ese aire.

La relación entre el caudal volumétrico (Q), velocidad (v) y el área transversal (A) es:

$$Q = v \times A \quad \text{Ecuación 13}$$

Área de entrada de aire:

$$A = l \times A \quad \text{Ecuación 14}$$

La velocidad del aire en los quemadores de biomasa influye directamente en la eficiencia de la combustión y estabilidad de la llama. Para aplicaciones térmicas y calderas pirotubulares, se recomienda un rango de velocidad del aire de 2 a 5 m/s, que facilita una adecuada mezcla aire-combustible sin generar turbulencias excesivas o zonas de inquemados. Esta recomendación está respaldada por estudios experimentales y manuales técnicos ([Thermal Combustion, 2022]; [Universidad de Burgos, 2013]; [Ruz, 2017]; [SINCAL, 2023]).

2.2.10. Otros Combustibles

2.2.10.1. Gas Licuado de Petróleo (GLP)

El GLP es una mezcla de hidrocarburos principalmente propano y butano, obtenida por refinación del petróleo o separación del gas natural. Se transporta y almacena en estado líquido a presiones moderadas, facilitando su manejo y distribución. Su alta eficiencia energética, bajo contenido de carbono y ausencia de azufre lo convierten en un combustible limpio y versátil, usado tanto en aplicaciones domésticas como industriales. Se le añade un odorante para detectarlo fácilmente en caso de fugas. (Ministerio de Minas y Energía, Colombia, 2024; Gasnova, 2017).

2.2.10.2. Petróleo Diesel D2

El petróleo diésel D2 es un combustible derivado del petróleo crudo, caracterizado por un alto poder calorífico y densidad. Es utilizado extensamente en motores diésel y sistemas de generación de calor industrial por su estabilidad, disponibilidad y poder energético. Su combustión genera emisiones superiores a las del GLP, debido a mayor contenido de carbono y azufre, aunque es más económico y fácil de distribuir que otros combustibles fósiles (IPE, 2019; EIA, 2023).

Tabla comparativa entre los combustibles como GLP, Diesel D2 y leña eucalipto son basadas en datos reales y confiables tales como, Tecnosoluciones CR y fuentes técnicas del sector energético para el poder calorífico inferior para combustibles comunes, Mercado local, Elgas Noticias, proveedores regionales para el precio de aproximado de los combustibles. Podemos verlo todos los datos consolidados en la Tabla 6.

Tabla 6

Comparativa Entre los Combustibles Como GLP, Diesel D2 y Leña Eucalipto

Parámetro	GLP	Diésel D2	Leña eucalipto (20% humedad)
PCI (MJ/kg)	46 – 49	43 – 44	16.7 – 19.5
Densidad (kg/m³)	530 – 560	830 – 835	~ 600
Precio (Soles por kg)	4.7 – 7.7	~4.85	0.5 – 2
Costo energético (S/ MJ)	~0.11 – 0.15	~0.29	~0.15 – 0.36

Nota: elaboración propia.

2.2.11. Material Usado para la Construcción del Quemador

2.2.11.1. Acero Estructural A36

El acero estructural A36 es un acero al carbono ampliamente utilizado en la industria y la construcción debido a su excelente combinación de resistencia, ductilidad, facilidad de fabricación y disponibilidad en el mercado local, en este caso Cusco (MaxAcero, 2023; Panel y Acanalados, 2025).

El acero combina la resistencia y la posibilidad de ser trabajado, lo que se presta para fabricaciones mediante muchos métodos. Además, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos térmicos, trabajo mecánico, o mediante aleaciones.

a) Composición Química

El acero es el principal producto siderúrgico utilizado en construcciones soldadas, especialmente el 90% son aceros al carbono y el 10% son aceros aleados, por lo que el material más importante usado en la industria es el acero al carbono.

El acero A36 está compuesto principalmente con una aleación de hierro que contiene carbono, con pequeñas cantidades de manganeso, fósforo, azufre y otros elementos que mejoran sus propiedades mecánicas y su comportamiento durante el proceso de soldadura (CGA, 2025; Metinvest, 2025).

Tabla 7*Tabla de Composición Química del Acero A36*

Elemento	Porcentaje (%)
Hierro (Fe)	~98
Carbono (C)	Máximo 0.29
Manganeso (Mn)	0.80 - 1.20
Fósforo (P)	Máximo 0.030 - 0.040
Azufre (S)	Máximo 0.030 - 0.050
Silicio (Si)	0.15 - 0.40
Cobre (Cu)	Máximo 0.20

Nota: Según estudios de Panel y Acanalados, (2025).**b) Propiedades Físicas del Acero**

- Densidad: 7.85 g/cm³ (7,850 kg/m³), aporte importante para el cálculo del peso y resistencia estructural (MaxAcero, 2023; Panel y Acanalados, 2025).
- Conductividad térmica: Aproximadamente 45 W/m·K, lo que favorece una adecuada disipación y manejo del calor en aplicaciones térmicas industriales (MaxAcero, 2023).
- Punto de fusión: Entre 1425 y 1538 °C, suficiente para resistir las temperaturas de trabajo del quemador sin degradarse (Kloeckner Metals, 2025).

c) Ventajas Prácticas del Acero A36 Para el Quemador

- Disponibilidad local: Es un material común en Cusco, lo que facilita su adquisición y reduce costos, aspecto fundamental para proyectos orientados a la optimización económica (CGA, 2025).

- Facilidad de fabricación: Su buena soldabilidad permite la construcción y montaje de la estructura del quemador con métodos convencionales sin que el material pierda su integridad (CGA, 2025; Acerostorices, 2024).
- Resistencia y durabilidad: Adecuada resistencia mecánica al desgaste y cargas térmicas de la combustión, asegurando una vida útil prolongada del equipo.

d) Clasificación de los Aceros

Los aceros se pueden clasificar de acuerdo al proceso de fabricación, por el contenido de carbono, por su estructura de fase, etc.

1. Por el Proceso de Producción

Según la fabricación los aceros se los puede obtener mediante los procesos:

- Aceros en Horno Bessemer
- Aceros al crisol abierto
- Aceros en hornos eléctricos

El acero se obtiene a partir de la fundición del hierro procedente de los altos hornos y la chatarra recuperada, reduciendo su contenido de carbono hasta un máximo de carbono del 1.7 %, al ser oxidado por una corriente de aire a presión.

2. Por su Contenido de Carbono

El contenido de carbono en los aceros al carbono simple es muy importante ya que de este dependen sus características y propiedades. Por el porcentaje de carbono los aceros se clasifican en:

- aceros de bajo contenido de carbono

- aceros de medio contenido de carbono
- aceros de alto contenido de carbono

2.2.11.2. Ladrillos refractarios

Los ladrillos refractarios son materiales cerámicos especialmente diseñados para resistir altas temperaturas, choques térmicos y ambientes corrosivos propios de las cámaras de combustión y hornos industriales. Estos ladrillos se utilizan para revestir el interior de quemadores y calderas, optimizando la eficiencia térmica, protegiendo las estructuras metálicas y asegurando la durabilidad y seguridad en la operación del sistema (Promart, 2008; Thermal Combustion, 2022; Nitron SAC, 2018).

a) Composición y Propiedades del Ladrillo Refractario Nitron

El ladrillo refractario de la marca Nitron está fabricado principalmente con arcilla natural y óxidos no metálicos de alta pureza, que le confieren un punto de fusión elevado y resistencia térmica superior a 1,400 °C. Además, presenta baja dilatación térmica y alta resistencia al desconchamiento y a la agresión química de gases y cenizas provenientes de la combustión (Nitron SAC, 2018; Promart, 2008).

Este ladrillo ofrece una conductividad térmica controlada, lo que permite mantener el calor dentro de la cámara de combustión y reducir las pérdidas energéticas. También su porosidad influye en su resistencia a la degradación causada por atmósferas inflamables (Nitron SAC, 2018; Universidad de Burgos, 2013).

b) Dimensiones y aplicación de ladrillos para quemadores

En la construcción del quemador a biomasa, se emplean ladrillos refractarios Nitron con espesores de 3/4 pulgadas y 2 pulgadas, dimensiones estándar que proporcionan un adecuado aislamiento térmico y resistencia mecánica. El ladrillo de 3/4 pulgadas se recomienda para zonas donde se prioriza el aislamiento térmico, mientras que el de 2 pulgadas está destinado a áreas expuestas a mayores cargas térmicas y desgaste, asegurando la durabilidad del sistema (Aventura Creaciones, 2023; Nitron SAC, 2018).

Estas dimensiones facilitan la instalación y ajuste en el diseño del quemador, asegurando un balance efectivo entre aislamiento térmico y robustez estructural (Promart, 2008; Ruz, 2017).

2.2.11.3. Cemento refractario

El cemento refractario es un material especialmente diseñado para resistir altas temperaturas sin perder sus propiedades físicas ni estructurales. Su composición incluye cementos de aluminato de calcio y agregados como sílice y alúmina, que le otorgan una alta resistencia térmica y mecánica, así como resistencia al choque térmico y la corrosión química (Schemin, 2023; PSI Concreto, 2024).

El mortero refractario actúa como pegamento para los ladrillos aislantes, garantizando una unión sólida y duradera que mantiene la integridad estructural del quemador y asegura un buen aislamiento térmico (Schemin, 2023; Zeramik, 2024). Además, posee baja conductividad térmica, minimizando las pérdidas de calor en sistemas expuestos a altas temperaturas como quemadores de biomasa (Zeramik, 2024).

La marca Rivera, reconocida por su calidad y durabilidad, ofrece un cemento refractario adecuado para aplicaciones industriales que requieren resistencia a temperaturas superiores a 1000 °C y exposiciones continuas a ambientes agresivos (Schemin, 2023).

2.2.11.4. Lana de Vidrio

La lana de vidrio es un material aislante compuesto por finos filamentos de vidrio entrelazados que retienen aire atrapado, creando una barrera eficaz que reduce significativamente la transferencia de calor (Impimur, 2024). Esta estructura fibrosa le permite ofrecer una alta eficiencia térmica, lo que ayuda a mantener la temperatura en el interior del quemador y mejorar la eficiencia energética del sistema.

Entre sus ventajas, la lana de vidrio destaca por ser incombustible, resistente al paso del tiempo sin pérdida de propiedades aislantes, y además proporciona aislamiento acústico, lo que contribuye a un ambiente más confortable y seguro en aplicaciones industriales (Impimur, 2024; Metalúrgica Solución, 2024).

2.2.12. Baterías de Agua en Quemadores de Biomasa

La batería de agua o chaqueta de agua en quemadores consiste en un sistema de conductos o recubrimiento en los laterales del quemador donde circula agua, permitiendo absorber el calor generado durante la combustión. Este sistema funciona como intercambiador de calor, protegiendo las paredes del quemador del sobrecalentamiento y extendiendo la vida útil de los materiales al evitar daños térmicos (Natural Fire, 2024; CaloryFrio, 2021).

El agua circulante dentro de la chaqueta absorbe el calor, que posteriormente puede ser aprovechado para procesos térmicos o para alimentar circuitos de calefacción, sirviendo tanto

para protección térmica como para optimizar la eficiencia energética del sistema (Lasian, 2024; CaloryFrio, 2021).

Este método es especialmente útil en quemadores con geometría rectangular donde los lados largos requieren un control eficaz de temperatura para evitar deformaciones o fallas prematuras por fatiga térmica, contribuyendo a la estabilidad y seguridad del sistema de combustión (ATTSU, 2024).

2.2.13. Diseño

La terminología de "diseño" puede tener distintos significados dependiendo del contexto en el que se utilice. En forma general, el diseño se refiere al proceso de concebir, planificar, crear y organizar elementos con el objetivo de lograr un resultado específico, ya sea resolver un problema, satisfacer una necesidad o simplemente expresar una idea creativa. Además, el diseño a menudo implica la consideración de factores prácticos, estéticos, ergonómicos y tecnológicos para lograr soluciones efectivas y atractivas (Ridge, 2023).

Tipos de diseño:

- **Diseño como proceso creativo:** En un sentido amplificado, el diseño es el proceso creativo de concebir y planificar la creación de algo, ya sea un objeto tangible, un sistema, una experiencia o un concepto abstracto (Ridge, 2023).
- **Diseño gráfico:** En el contexto de comunicación visual, el diseño se refiere a la creación de elementos visuales para transmitir un mensaje o información. Esto puede englobar el diseño de logotipos, carteles, sitios web, folletos, entre otros. (Ridge, 2023)

- **Diseño de interiores:** Este tipo de diseño se ocupa de planificar y organizar el espacio interior de edificios y estructuras para mejorar la función, la estética y la comodidad (Ridge, 2023).
- **Diseño de experiencia de usuario (UX):** Se refiere al diseño de interacciones entre usuarios y productos o servicios, con el objetivo de mejorar la satisfacción del usuario y facilitar la eficacia de la interacción (Ridge, 2023).
- **Diseño de moda:** Implica la creación de prendas de vestir y accesorios, considerando tanto la estética principalmente y como la funcionalidad (Ridge, 2023).
- **Diseño arquitectónico:** En este caso, el diseño se centra en la planificación y creación de edificios y estructuras, teniendo en cuenta aspectos estéticos, funcionales y estructurales (Ridge, 2023).
- **Diseño industrial:** El diseño industrial se centra en la creación y desarrollo de productos, sistemas y dispositivos que son totalmente funcionales, estéticos y eficientes (Ridge, 2023).

El diseño industrial es una disciplina creativa y técnica que se centra en la creación y desarrollo de productos y sistemas que son funcionales, estéticos y eficientes. Los diseñadores industriales buscan juntar aspectos prácticos y estéticos para crear soluciones innovadoras que mejoren la calidad de vida de los usuarios y, generalmente, también consideran factores económicos y medioambientales (Ridge, 2023).

2.2.13.1. Herramientas del Diseño Industrial

- **Software de diseño asistido por computadora (CAD):** Herramientas como AutoCAD, SolidWorks, Inventor, Rhino y CATIA permiten a los diseñadores industriales crear modelos 3D detallados y realizar simulaciones digitales para evaluar la viabilidad y funcionalidad de sus diseños.
- **Software de renderizado:** Aplicaciones como KeyShot, V-Ray o Blender ayudan a los diseñadores a crear representaciones visuales realistas de sus modelos 3D, permitiendo una mejor comunicación de las ideas de diseño.
- **Prototipado rápido:** Impresoras 3D y máquinas de prototipado rápido permiten la creación rápida de modelos físicos de los diseños. Esto facilita la evaluación de la forma, la ergonomía y la funcionalidad del producto.
- **Herramientas de visualización y animación:** El uso de software de visualización y animación, como Adobe After Effects o Cinema 4D, permite a los diseñadores crear presentaciones visuales dinámicas para comunicar sus ideas de manera efectiva.
- **Bocetos y dibujos a mano:** Aunque la tecnología digital es predominante, los bocetos y dibujos a mano siguen siendo herramientas valiosas para expresar ideas de manera rápida y explorar conceptos en las etapas iniciales del diseño.
- **Modelado físico:** Además de la impresión 3D, los diseñadores pueden utilizar técnicas tradicionales de modelado físico, como maquetas y prototipos hechos a mano, para explorar y comunicar ideas de diseño.
- **Análisis de elementos finitos (FEA):** Herramientas como ANSYS permiten a los diseñadores simular y analizar el comportamiento estructural y térmico de los componentes del producto.

- **Herramientas de gestión de proyectos:** Software como Microsoft Project o Asana ayuda a los equipos de diseño a planificar y gestionar eficientemente el desarrollo de proyectos, estableciendo hitos y asignando tareas.
- **Investigación de mercado y tendencias:** Herramientas de investigación de mercado, encuestas y análisis de tendencias ayudan a los diseñadores a comprender las necesidades y preferencias del usuario, así como las influencias culturales y sociales.
- **Software de colaboración:** Plataformas como Slack o Microsoft Teams facilitan la comunicación y colaboración entre los miembros del equipo de diseño, especialmente si trabajan de forma remota o en equipos distribuidos.

2.2.13.2. Autodesk Inventor

Autodesk Inventor es un software de diseño asistido por computadora más conocido por las siglas CAD desarrollado por Autodesk, Inc. Este programa está específicamente diseñado para el diseño mecánico en 3D, la simulación de productos y la creación de prototipos digitales (Ridge, 2023). Dentro del programa tenemos:

- **Diseño Tridimensional (3D):** Autodesk Inventor permite a los diseñadores crear modelos tridimensionales de sus productos. Utilizando herramientas como extrusión, revolución y barrido, los usuarios pueden construir componentes detallados en un entorno tridimensional.
- **Modelado Paramétrico:** El software utiliza un enfoque paramétrico, lo que significa que los modelos se crean con parámetros y restricciones que definen sus dimensiones y relaciones. Esto facilita la modificación del diseño de manera rápida y eficiente, ya que los cambios se propagan automáticamente a través del modelo.

- **Asambleas:** Autodesk Inventor permite la creación de conjuntos o ensamblajes, donde múltiples componentes se combinan para formar un producto completo. Los diseñadores pueden ensamblar, posicionar y analizar la interacción entre diferentes partes.
- **Simulación y Análisis:** El software proporciona herramientas para realizar simulaciones de fuerzas, tensiones, movimientos y otros aspectos del rendimiento del diseño. Esto ayuda a evaluar la viabilidad y el comportamiento del producto antes de la fabricación.
- **Renderizado y Visualización:** Inventor ofrece capacidades de renderizado para crear representaciones visuales realistas de los modelos. Esto es útil para presentaciones de diseño y comunicación visual efectiva de las ideas.
- **Creación de Prototipos Digitales:** Autodesk Inventor es una herramienta valiosa para la creación de prototipos digitales. Los diseñadores pueden evaluar la forma, la función y el rendimiento de un producto antes de que se produzca físicamente.
- **Documentación:** El software permite la creación de dibujos detallados y documentación técnica asociada a los modelos. Estos documentos son esenciales para la fabricación y la comunicación de detalles de diseño.
- **Colaboración:** Autodesk Inventor facilita la colaboración en equipos de diseño. Los archivos del programa son compatibles con otras herramientas de Autodesk, y la plataforma Autodesk Fusion 360 permite la colaboración en línea en tiempo real.
- **Integración con Otros Software:** Autodesk Inventor se integra con otros productos de Autodesk y puede interoperar con software de terceros, facilitando la inclusión de diseños en flujos de trabajo más amplios.

CAPÍTULO III

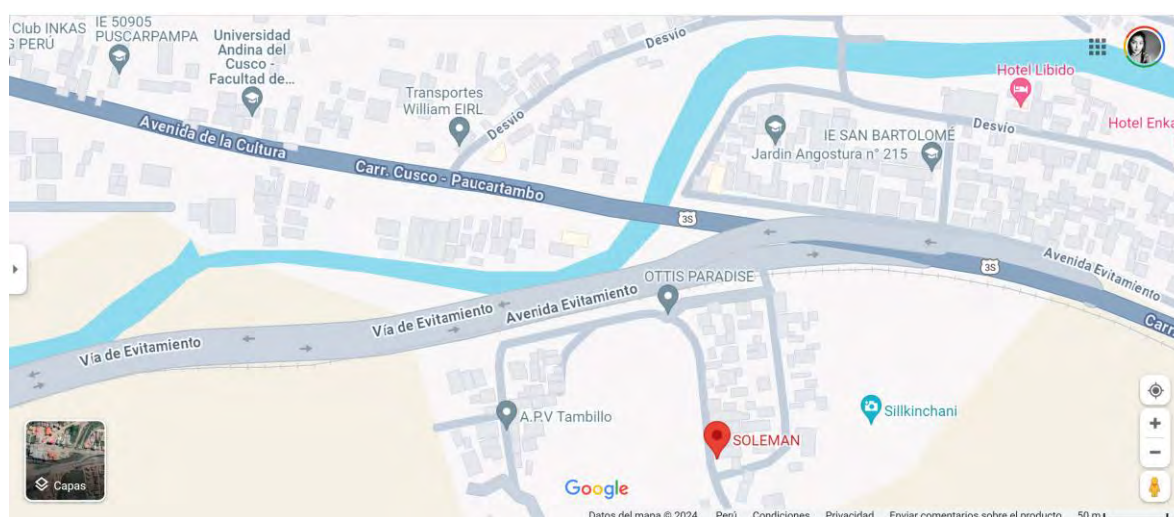
METODOLOGIA

3.1. Ámbito de Estudio

El ámbito de este estudio se define dentro de la ingeniería energética industrial, enfocada al diseño, construcción y prueba de tecnologías de combustión sostenibles que permitan reemplazar o complementar el actual uso de combustibles fósiles en la región Cusco. (FAO, 2021; Ministerio de Energía y Minas, 2024; UNE-EN ISO/IEC 17025, 2021). El contexto industrial de Cusco demanda alternativas energéticas confiables, rentables y ajustadas a las particularidades ambientales y logísticas de la zona (García & Sánchez, 2018; González & Quispe, 2019).

El presente estudio se llevó a cabo en la empresa Soleman S.R.L., ubicada en la ciudad del Cusco, dedicada al diseño y fabricación de calderas industriales. El propósito fue diseñar y evaluar un quemador a biomasa para una caldera pirotubular horizontal de 100 BHP, con el fin de disminuir costos operativos.

El ámbito técnico se circunscribió a la región del Cusco, donde las condiciones atmosféricas de altitud influyen en el rendimiento térmico de los equipos industriales. El trabajo se centró en la sustitución parcial del uso de combustibles fósiles por biomasa de eucalipto, aprovechando los recursos locales y reduciendo el impacto ambiental (FAO, 2023).

Figura 3*Mapa Geográfica Empresa SOLEMAN*

Nota. Google maps.

3.2. Enfoque de la investigación

3.2.1. Naturaleza y Alcance

La investigación es tecnológica-aplicada, enfocada en resolver un problema industrial: los altos costos energéticos derivados del uso de GLP y diésel. El estudio integra diseño, simulación y validación del quemador a biomasa, aplicando el método científico propuesto por Hernández-Sampieri et al. (2022).

La investigación tecnológica-aplicada, persigue la optimización del rendimiento energético y económico de calderas industriales con biomasa, tomando como referencia recomendaciones de la FAO (2021) sobre caracterización y manejo de energía renovable en procesos térmicos (narrativa). El alcance se extiende desde la caracterización físico-química de la biomasa hasta la evaluación comparativa del sistema tradicional versus el sistema

propuesto, producto de la integración de numerosos estudios sobre combustión eficiente y gestión industrial sostenible (Creswell, 2020; García & Sánchez, 2018; González & Quispe, 2019).

3.2.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es exploratorios, descriptivo y explicativo, ya que describe relaciones causa-efecto entre la potencia térmica, el flujo de aire y la eficiencia del sistema. Como señala Creswell (2020), un enfoque metodológico integral incorpora los niveles exploratorios, descriptivo, en la solución de problemas industriales complejos. En este sentido, el presente estudio explora límites operativos y estructurales de la caldera, describe las propiedades de la biomasa y los materiales utilizados. (ASME BPVC, 2022; FAO, 2021).

3.2.3. Tipo de Investigación

El estudio se clasifica como investigación tecnológica aplicada con enfoque cuantitativo. Se aplicaron herramientas de ingeniería y métodos para evaluar los resultados térmicos, garantizando la reproducibilidad y trazabilidad científica (ASME, 2021; ISO, 2023).

El diseño tecnológico aplicado, combina con el modelado asistido por computadora para optimizar el flujo térmico y la combustión de biomasa (González & Quispe, 2019). Este enfoque asegura que la solución desarrollada pueda ser replicada y escalada a otros entornos industriales del país, cumpliendo estándares internacionales de calidad y trazabilidad (FAO, 2021; García & Sánchez, 2018).

3.3. Diseño Metodológico

3.3.1 Método General de Investigación

Se aplicó el método tecnológico, que combina análisis teórico y verificación empírica. Este enfoque permite contrastar los resultados obtenidos mediante cálculos energéticos con los valores reales observados en las pruebas (Hernández-Sampieri et al., 2022).

Como lo describe la American Society of Mechanical Engineers (ASME BPVC, 2022), el método tecnológico es adecuado para validar soluciones ingenieriles en ambientes reales, sometiéndolas a evaluaciones de desempeño y seguridad. El trabajo se estructura en etapas que incluyen: selección de biomasa, fabricación, pruebas y evaluación económica, en consonancia con procedimientos recomendados por la FAO (2021) y el Ministerio de Energía y Minas (2024).

3.3.2 Etapas del Proceso Metodológico

- a) **Selección y caracterización de biomasa:** Como establece la FAO (2021), la biomasa debe caracterizarse mediante análisis mecánico y físico-químico (narrativa). Se consideran poder calorífico (17 MJ/kg), humedad (20%), y densidad (600 kg/m^3) de la leña eucalipto (FAO, 2021; González & Quispe, 2019).
- b) **Diseño conceptual y mecánico del quemador:** Tal como señala ASME BPVC (2022), el diseño debe incorporar criterios de seguridad, optimización volumétrica y compatibilidad estructural, apoyándose en simulaciones CAD para garantizar una correcta distribución de aire y gases de combustión. El

material estructural es acero A36, cuyas propiedades mecánicas y térmicas han sido documentadas por MaxAcero (2023) y Panel y Acanalados (2025).

- c) **Cálculo térmico y balance energético:** García y Sánchez (2018) recomiendan usar la ecuación: $Q=m \times c \times \Delta T$, para calcular la energía útil requerida, ajustando acorde a la eficiencia operativa observada (80%). González y Quispe (2019) comparan el consumo de biomasa, GLP y diésel bajo condiciones reales (parentética).
- d) **Validación del diseño:** Como menciona García & Sánchez (2019), se valida el diseño, cumpliendo recomendaciones técnicas contemporáneas y manuales internacionales.
- e) **Construcción de prototipo experimental:** Según Creswell (2020), la fabricación debe ser documentada en fases estructuradas: corte CNC, ensamblado, preparación refractaria, instalación de accesorios y pruebas de calidad, incluyendo test hidrostático y ensayos no destructivos (FAO, 2021; ASME BPVC, 2022).
- f) **Análisis de resultados y comparación con combustibles fósiles:** Como se observa en González y Quispe (2019), la biomasa reduce el costo hasta en 70% frente a GLP y diésel, manteniendo eficiencia térmica y menores emisiones (parentética).

3.4. Población y Muestra

3.4.1 Población

La población está integrada por sistemas térmicos industriales activos en Cusco, representativos del sector alimentario, manufacturero y servicios que tienen alta demanda energética y potencial de conversión a biomasa.

3.4.2 Muestra

Caldera pirotubular de 100 BHP en la empresa Soleman, por representatividad en capacidad, carga térmica y tipo de proceso, además de condiciones locales de operación (altitud, humedad ambiente, presión de trabajo). Por sus características de operación, accesibilidad para medición y potencial impacto económico-ambiental (FAO, 2021; Ministerio de Energía y Minas, 2024).

3.4.3 Justificación

Los criterios seleccionados consideran la posibilidad de extrapolación de resultados y la replicabilidad en otras industrias regionales, siguiendo recomendaciones de la literatura sobre muestreo experimental en ingeniería energética (Creswell, 2020).

3.5. Procedimiento de Construcción y Diseño

El proceso de construcción diseñado por González y Quispe (2019) abarca desde la modelación, corte y ensamblaje especializados, armado de componentes refractarios y tuberías, hasta la instalación de accesorios y calibración de sensores. García y Sánchez (2018) sugieren que cada etapa debe ser debidamente documentada y validada mediante pruebas de

calidad estructural e hidrostática, asegurando la funcionalidad y seguridad del equipo conforme a normas ASME BPVC (2022).

3.6. Instrumentos de Recolección de Datos

3.6.1 Instrumentos

García y Sánchez (2018) recomiendan el uso de termómetro para medir temperatura, además de balanza, detector digital de humedad, tintes penetrantes, balde prueba hidrostática.

3.7. Validación Tecnológica y Evaluación Económica

La validación tecnológica y económica propuesta por González y Quispe (2019) integra criterios de eficiencia energética mínima del 80%, seguridad operacional, compatibilidad ambiental y ahorro real en consumo. Como destaca Creswell (2020), el análisis económico requiere comparar de manera porcentual el costo energético (PEN/kWh) antes y después de la intervención, usando datos de campo y fuentes referenciadas (FAO, 2021; García & Sánchez, 2018).

CAPITULO IV

DISEÑO Y EVALUACION DEL QUEMADOR A BIOMASA

4.1. Propuesta de Alternativas de Solución

La alternativa de solución es el combustible a biomasa, en comparación con datos obtenidos por estudios previos ya existentes y cálculo de consumo de gas GLP y petróleo D2, así mismo se tiene la Tabla 6 con la comparación de costos para la selección del combustible.

Tabla 8

Comparación de Alternativas de Solución

Factores	Quemador a biomasa	Quemador a gas	Quemador a petróleo	Referencia
Fuente de energía	Leña eucalipto	Gas GLP	Petróleo D2	
Consumo energético	Alto	Alto	Alto	
Tipo de maniobra	Manual/automática	Manual/automática	Manual/automática	
Costo de mantenimiento	Medio	Alto	Alto	
Eficiencia térmica	Muy buena	Excelente	Alto	FAO, (2021)
Impacto ambiental	Alto/medio	Alto	Alto	FAO, (2023)
Costo de inversión	Medio	Alto	Alto	

Nota: Elaboración propia.

4.2. Selección del Material de Construcción del Quemador

El acero A36, comúnmente llamado acero negro o al carbono, puede soportar cargas mecánicas y térmicas típicas en la operación de quemadores, sin deformaciones permanentes ni fallas estructurales, aparte de la disponibilidad en el mercado cusqueño, estas propiedades se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Propiedades Mecánicas del Acero A36 Aplicables al Diseño de Quemadores

Propiedad	Valor típico	Referencia
Resistencia a la tracción	400 – 550 MPa	MaxAcero (2023), Panel y Acanalados (2025)
Límite elástico	250 MPa	MaxAcero (2023), Acerostorices (2024)
Alargamiento	20 – 23% (en probeta de 200 mm)	Panel y Acanalados (2025)
Dureza Brinell	119 – 162 HBW	MaxAcero (2023), Aceromafe (2022)
Módulo de elasticidad	200 GPa	MaxAcero (2023), Compraco (2024)

Nota: Elaboración propia.

4.3. Características del Quemador a Biomasa

Las características generales del quemador a biomasa se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10*Características del Quemador*

Características del quemador a leña	
1. Metal de casco y quemador 5/8"	ASTM A 36
2. Metal de forro 1mm	AISI A 304
3. Tubo de intercambio diámetro 2"	A 53 SCH40
4. Configuración interna del quemador.	Ladrillo refractario y cámara de agua
5. Tipo de combustible.	Leña eucalipto
6. Localización.	Debajo de caldera

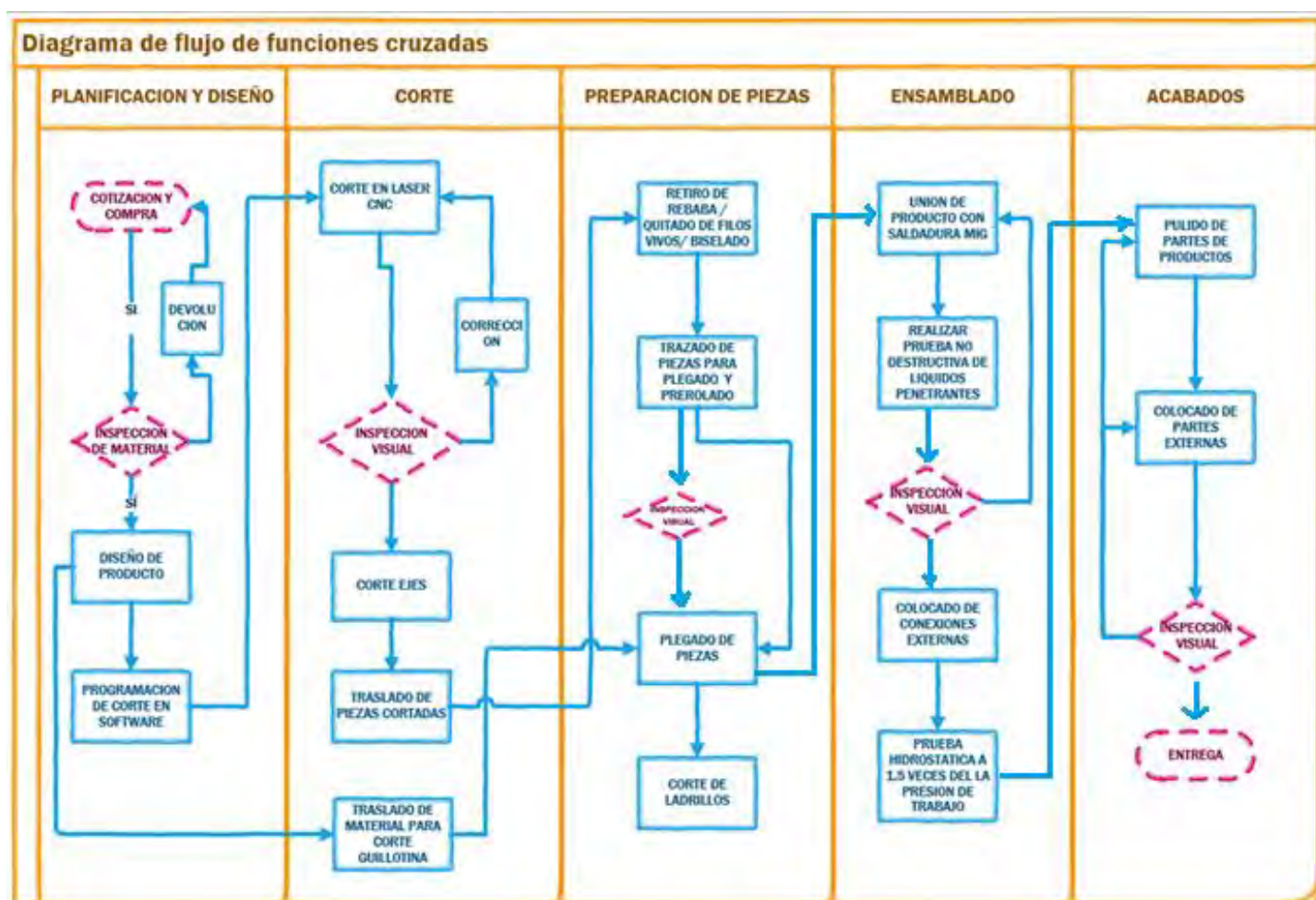
Nota: Elaboración propia.

4.4. Proceso Productivo Para el Quemador a Biomasa

- a) **Diseño y programación de corte del quemador.** Se procede a desarrollar el diseño detallado y realizar el metrado de todos los materiales necesarios para la producción, asegurando que se cumplan las especificaciones del proyecto. Este proceso incluye cálculos matemáticos para hallar las dimensiones del quemador y diseño en el software de diseño asistido por computadora Inventor Autodesk.

Figura 4

Esquema del Proceso Productivo de un Quemador a Biomasa



Proceso



Decisión



Inicio o finalización

Nota: Elaboración propia.

- b) **Corte de piezas de quemador.** Se lleva a cabo el corte de todas las piezas según los diseños en plano, utilizando tecnología de láser CNC para asegurar

exactitud. En el caso de componentes como ejes, tubos o perfiles en H, el corte se realiza con plasma manual o sierra vaivén, seleccionando la herramienta más adecuada según las necesidades del proyecto y la comodidad del operador para garantizar precisión y calidad en cada componente.

- c) **Preparación de piezas.** Que incluye la limpieza de los filos vivos, biselado, seguida del plegado y armado de las mismas, dejándolas listas para el proceso de soldadura. Simultáneamente, se prepara el ladrillo refractario y se realizan los cortes y roscados necesarios en la tubería de entrada y salida de agua. Finalmente, se procede a colocar el marco y la puerta, asegurándolos con refuerzos de cemento refractario para garantizar la durabilidad y resistencia.

d) **Proceso de Ensamblado y Soldadura:**

La precisión en este proceso es crucial, ya que una soldadura de alta calidad garantiza la integridad estructural del quemador. Las uniones soldadas deben ser capaces de resistir las condiciones operativas a las que el quemador estará expuesto, manteniendo la seguridad y el rendimiento esperados.

e) **Pruebas de calidad**

- ***Pruebas Hidrostáticas***

Posterior a la soldadura, el quemador ensamblado es sometido a pruebas hidrostáticas, un método de evaluación que involucra la aplicación de presión interna con un fluido, agua, para verificar la estanqueidad y la resistencia estructural de las uniones soldadas. Estas pruebas son esenciales para asegurar que no existan fugas ni fallas que puedan comprometer la seguridad durante la operación del quemador. La validación exitosa a través de estas pruebas certifica la preparación del quemador para su uso en condiciones reales de operación.

- ***Pruebas No Destructivas por Tintes Penetrantes***

Además de las pruebas hidrostáticas, se llevan a cabo pruebas no destructivas por tintes penetrantes como parte del control de calidad de la soldadura. Este método permite detectar discontinuidades superficiales, como grietas o porosidades, que podrían haber pasado desapercibidas durante la inspección visual. El procedimiento consiste en aplicar un tinte penetrante sobre la superficie soldada, seguido de un revelador que resalta cualquier defecto. Esta técnica es crucial para asegurar que las uniones soldadas cumplan con los estándares de calidad y seguridad necesarios antes de que el quemador sea puesto en operación.

- f) **Forrado y Aislamiento de quemador con caldera incluida.** Una vez que el quemador ha pasado todas las pruebas de integridad, se procede al forrado de la caldera junto al quemador. Este paso implica el aislamiento térmico utilizando lana mineral, que es conocida por su excelente capacidad de resistir altas temperaturas y su eficacia en la reducción de la pérdida de calor. El aislamiento se completa con la colocación de una chaqueta de acero inoxidable, que no solo protege el aislamiento, sino que también ofrece una barrera adicional contra la corrosión y contribuye a la estética y durabilidad del equipo. Este forrado es fundamental para mantener la eficiencia energética del quemador y garantizar su operación segura y duradera.
- g) **Acabados Superficiales y Pintado.** Posteriormente, se lleva a cabo un pulido detallado de las superficies externas, especialmente en las puertas del quemador. Este pulido es esencial para preparar la superficie antes de la aplicación de la pintura de alta temperatura, la cual es resistente a las condiciones extremas de calor que experimentará el quemador durante su

funcionamiento. La pintura aplicada no solo protege contra la corrosión y el desgaste, sino que también proporciona un acabado visualmente atractivo y duradero, contribuyendo a la integridad del equipo.

- h) **Instalación de Accesorios:** Con los acabados superficiales completados, se procede a la instalación de los accesorios esenciales del quemador en la caldera. Estos incluyen el visor de nivel de agua, que permite la monitorización del nivel de agua en la caldera; el termostato, que controlan la temperatura del sistema; y el manómetro, encargado de medir la presión interna; válvula de seguridad. Adicionalmente, se instala la electrobomba de agua para garantizar un flujo constante y controlado, así como la chimenea, que facilita la correcta evacuación de gases de combustión, se coloca la caja eléctrica para automatizar la caldera con su quemador. Finalmente, se coloca el ventilador del quemador.

4.5. Cuadro Base Para el diseño del Quemador a Biomasa

Se hace un diseño para una caldera pirotubular de 100 BHP horizontal teniendo en cuenta que, "Boiler Horsepower" (BHP) o caballo de fuerza de caldera es una unidad que mide la capacidad de una caldera para producir vapor. Se define como la cantidad de energía necesaria para evaporar 34,5 libras que fue establecida por el American Society of Mechanical Engineers (ASME), todas las variables serán calculadas considerando referencias técnicas y experiencias previas en calderas de biomasa industriales, tomando 1 hora como una variable fija de tiempo para todos los cálculos, considerando 3400 msnm, Tabla 11 vemos los parámetros.

Datos importantes a considerar:

- Poder calorífico inferior (PCI) del petróleo Diesel D 2, 43.1 MJ/kg según global composites.
- Poder calorífico del gas GLP, 46 MJ/kg según (Energypedia, 2020).
- Poder calorífico del agua, 4184 J/kg°C, Sistema internacional de unidades.
- $1\text{BHP} \cong 34,5\text{lb/h}$
- $100\text{BHP} \cong \frac{3450\text{lb}}{\text{h}}$
- $1\text{lb} \cong 0.454\text{kg}$
- $3450\text{lb/h} \cong 1566\text{kg/h}$

Tabla 11

Variables base Para el Diseño del Quemador a Biomasa para una Caldera Pirotubular de 100 BHP

Parámetro	Valor típico / Diseño	Unidad	Observaciones y referencias
Potencia caldera	100 BHP (≈ 75 kW)	BHP / kW	Potencia térmica nominal
Generación de vapor	3450 / ≈ 1566	lb/h / kg/h	Vapor generado por hora
Poder calorífico inferior (PCI) leña	17	MJ/kg	Leña eucalipto, 20% humedad
Eficiencia estimada sistema	80	%	Calderas pirotubulares típicas
Generación de vapor	1 lb ($\approx 0.454\text{kg}$)	Lb/ kg	
Humedad de trabajo	20	%	Leña eucalipto
Presión de trabajo de caldera	150	PSI	

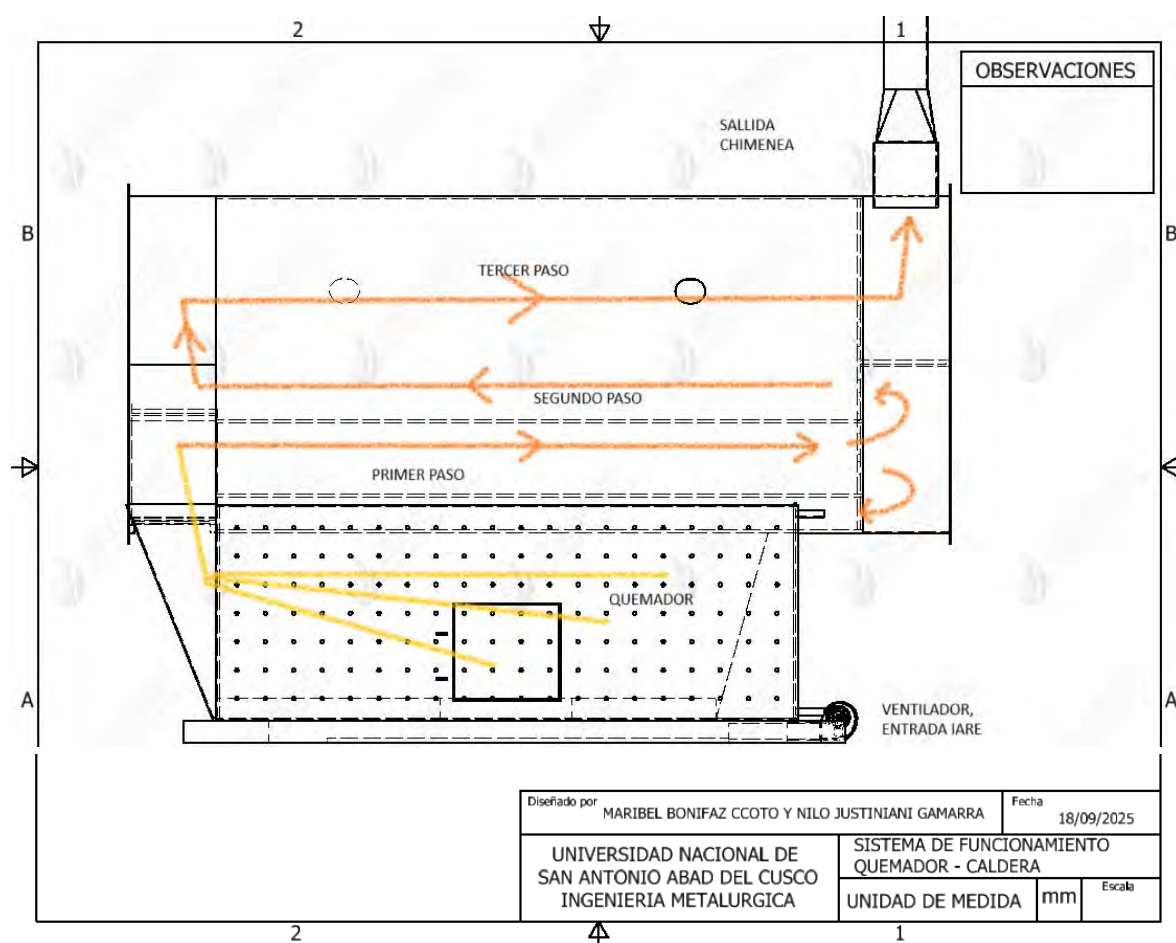
Nota: elaboración propia.

En la Figura 5 se puede apreciar un poco del sistema de calentamiento de la caldera con el quemador a biomasa, con los 3 pasos:

Primer paso: Los gases de la combustión salen de la cámara de combustión y se dirigen al primer conjunto de tubos o canales. Luego los gases se desvían hacia un segundo conjunto de tubos, recorriendo nuevamente el interior de la caldera y transfiriendo calor llamado Segundo paso. Finalmente, antes de salir por la chimenea, los gases atraviesan una tercera sección que extrae el calor residual como tercer paso.

Figura 5

Recorrido de Gases en Caldera Piro-tubular Horizontal de 100 BHP – Tres Pasos



Nota: elaboración propia.

4.6. Diseño de Detalle

4.6.1. Cálculo de Energía Total Requerida

Sabemos de la Tabla 11 que para una caldera de 100 BHP se necesita vaporizar 1566 kg de agua, entonces:

Para este cálculo usamos la ecuación 11.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Donde:

m es la masa de agua = 1566kg

c la capacidad calorífica del agua (J/kg°C) = 4184 J/kg°C

ΔT la variación de temperatura = $T_{\text{inicial}} 100^{\circ}\text{C}$ y $T_{\text{final}} 180^{\circ}\text{C} = 80^{\circ}\text{C}$

Reemplazando en la ecuación:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q = 1566Kg \cdot \frac{4184J}{kg^{\circ}C} \cdot 80^{\circ}C$$

$$Q = 524171.52J \cong 524.17MJ$$

Ajustar por eficiencia (80%)

$$Q_{\text{combustible}} = Q_{\text{total}}/0.8$$

$$Q_{\text{combustible}} = 524.17MJ/0.8$$

$$Q_{\text{combustible}} = 655.21MJ$$

4.6.2. Cálculo de la Cantidad de Leña Necesaria

$$Leña (kg) = Q_{combustible}/c$$

Donde:

c es el poder calorífico inferior de la leña = 17 MJ/kg de la Tabla 9

$$Leña (kg) = \frac{655.21MJ}{17MJ/kg}$$

$$m_{total} = Leña (kg) = 38.54kg$$

4.6.3. Cálculo de la Cantidad de Petróleo D2

$$Petroleo (kg) = Q_{combustible}/c$$

Donde:

c es el poder calorífico inferior del petroleo = 43.1 MJ/kg

$$Petroleo (kg) = 655.21/c$$

$$Petroleo (kg) = \frac{655.21MJ}{43.1MJ/kg}$$

$$Petroleo (kg) = 15.20kg$$

4.6.4. Cálculo de la Cantidad del Gas GLP

$$GLP (kg) = Q_{combustible}/c$$

Donde:

c es el poder calorífico del GLP = 46 MJ/kg

$$GLP (kg) = 655.21/c$$

$$GLP (kg) = \frac{655.21MJ}{46MJ/kg}$$

$$GLP (kg) = 14.24kg$$

4.6.5. Masa Seca del Combustible Leña Eucalipto

Reemplazamos en la Ecuación 5.

$$m_{seca} = m_{total} \times (1 - \text{humedad})$$

Donde masa total = leña = 38.54kg

Humedad al 20%

$$m_{seca} = 38.54 \times (1 - 0.20)$$

$$m_{seca} = 30.83kg$$

4.6.6. Cálculo del Oxígeno Requerido

Para una combustión completa cada mol de carbono requiere un mol de oxígeno, usamos para datos necesarios la Ecuación 1.

El número de moles de oxígeno (nO_2) necesario para quemar una masa m de combustible es:

$$n_{O_2} = \frac{m \times xC}{M_C} + \frac{m \times xH}{4MH}$$

Donde:

- $M_C = 12 \text{ g/mol} = 0.012 \text{ kg/mol}$
- $M_H = 1 \text{ g/mol} = 0.001 \text{ kg/mol}$
- $xC = 44.05\% = 0.445$
- $yH = 5.24\% = 0.0524$

Reemplazando para una masa seca de 30.83kg

$$n_{O_2} = \frac{30.83 \times 0.4405}{0.012} + \frac{30.83 \times 0.0524}{4 \times 0.001}$$

$$n_{O_2} = 1131.72 + 403.87$$

$$n_{O_2} = 1535.59 \text{ mol}$$

4.6.7. Conversión de Moles de O_2 a Masa

Según la Ecuación 9, El peso molecular del oxígeno es $MO_2 = 32 \text{ g/mol} = 0.032 \text{ kg/mol}$, por lo que la masa de oxígeno requerida es:

$$m_{O_2} = n_{O_2} \times MO_2$$

$$m_{O_2} = 1535.59 \text{ mol} \times 0.032 \text{ kg/mol}$$

$$m_{O_2} = 49.14 \text{ kg}$$

4.6.8. Cálculo de la Masa y Volumen de Aire Requerido

El aire contiene aproximadamente 23.2% de oxígeno en masa, entonces la masa total de aire necesaria es:

$$m_{aire} = \frac{m_{O_2}}{0.232}$$

$$m_{aire} = \frac{49.14kg}{0.232}$$

$$m_{aire} = 211.81kg$$

Para convertir a volumen, debe considerarse la densidad del aire ρ , que varía con la altitud y la temperatura. Y a 3400 metros sobre el nivel del mar, la densidad disminuye a aproximadamente $\rho_{3400} \approx 0.84 \text{ kg/m}^3$ (Omni Calculator, 2025).

Entonces el volumen necesario de aire es:

$$V_{aire} = \frac{m_{aire}}{\rho_{3400}}$$

$$V_{aire} = \frac{211.81kg}{0.84 \text{ kg/m}^3}$$

$$V_{aire} = 252.15\text{m}^3$$

4.6.9. Cálculo del Caudal Volumétrico de Aire

El caudal volumétrico de aire (Q) necesario para la combustión está relacionado con el volumen total de aire requerido (V_{aire}) y el tiempo de combustión (t) según la ecuación 10:

$$Q = \frac{V_{aire}}{t}$$

Donde:

- Q es el caudal volumétrico en m^3/s m^3/s o m^3/h m^3/h ,
- V_{aire} es el volumen total de aire requerido (m^3),
- t es el tiempo durante el cual se proveerá ese volumen (s o h).

Por ejemplo, para un proceso que demanda 252.15 m^3 de aire en 1 hora:

$$Q = \frac{252.15 \text{ m}^3}{1\text{h}}$$

$$Q = \frac{252.15\text{m}^3}{\text{h}} = 252.15 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0.07\text{m}^3/\text{s}$$

4.6.10. Dimensionamiento del Quemador de Biomasa

La velocidad debe estar dentro del rango recomendado para aire de combustión en quemadores de biomasa (2 a 5 m/s) que favorece la mezcla eficiente y estabilidad de la llama (García y Sánchez, 2018; Manual de Calderas, Univ. Burgos, 2013).

a) Área y velocidad real de entrada de aire

Área de la entrada de aire del quemador es 150mm por 150mm (0.15m):

$$A_{\text{entrada}} = 0.15\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.0225\text{m}^2$$

Con un caudal volumétrico de aire de $252.15 \text{ m}^3/\text{h} = 0.07 \text{ m}^3/\text{s}$, la velocidad del aire en ese conducto es:

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{0.07\text{m}^3/\text{s}}{0.0225\text{m}^2}$$

$$v = 3.11 \text{ m/s}$$

Esta velocidad está dentro del rango recomendado para aire de combustión en quemadores de biomasa (2 a 5 m/s) que favorece la mezcla eficiente y estabilidad de la llama (García y Sánchez, 2018; Univ. Burgos, 2013).

Entonces el dimensionamiento final del quemador con un área de entrada de aire de 0.0225 m^2 cumple con los requisitos de área para caudal de aire necesario que favorece la velocidad adecuada y mezcla dentro del quemador.

b) Área y volumen del quemador rectangular

El trabajo del Laboratorio de Tecnología de la Madera de la UNCP y UNALM señala que la madera de eucalipto en plantaciones peruanas es utilizada en trozas con longitudes prácticas cercanas a 0.33 m para garantizar un buen proceso de combustión y manipulación (Mendoza Tovar, 2021). Sección transversal: con dimensiones aproximadas de 10 a 15 cm de ancho y espesor.

Volumen de leña:

$$V_{leña} = \frac{\text{masa (kg)}}{\text{densidad } (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}$$

Donde:

- Densidad seca de leña de eucalipto: entre 500 y 750 kg/m³ según la edad y especie (FAO; Banks, 1954 citado en FAO). Para cálculo conservador, usaremos 600 kg/m³.

- Masa leña eucalipto 38.54kg

$$V_{leña} = \frac{38.54kg}{600Kg/m^3}$$

$$V_{leña} = 0.064m^3$$

c) Estimación del área transversal ocupada por la leña

Si consideramos la leña trozada en piezas de 0.33 m de largo, el área transversal efectiva para ese volumen es:

$$A_{leña} = \frac{V_{leña} (m^3)}{longitud (m)}$$

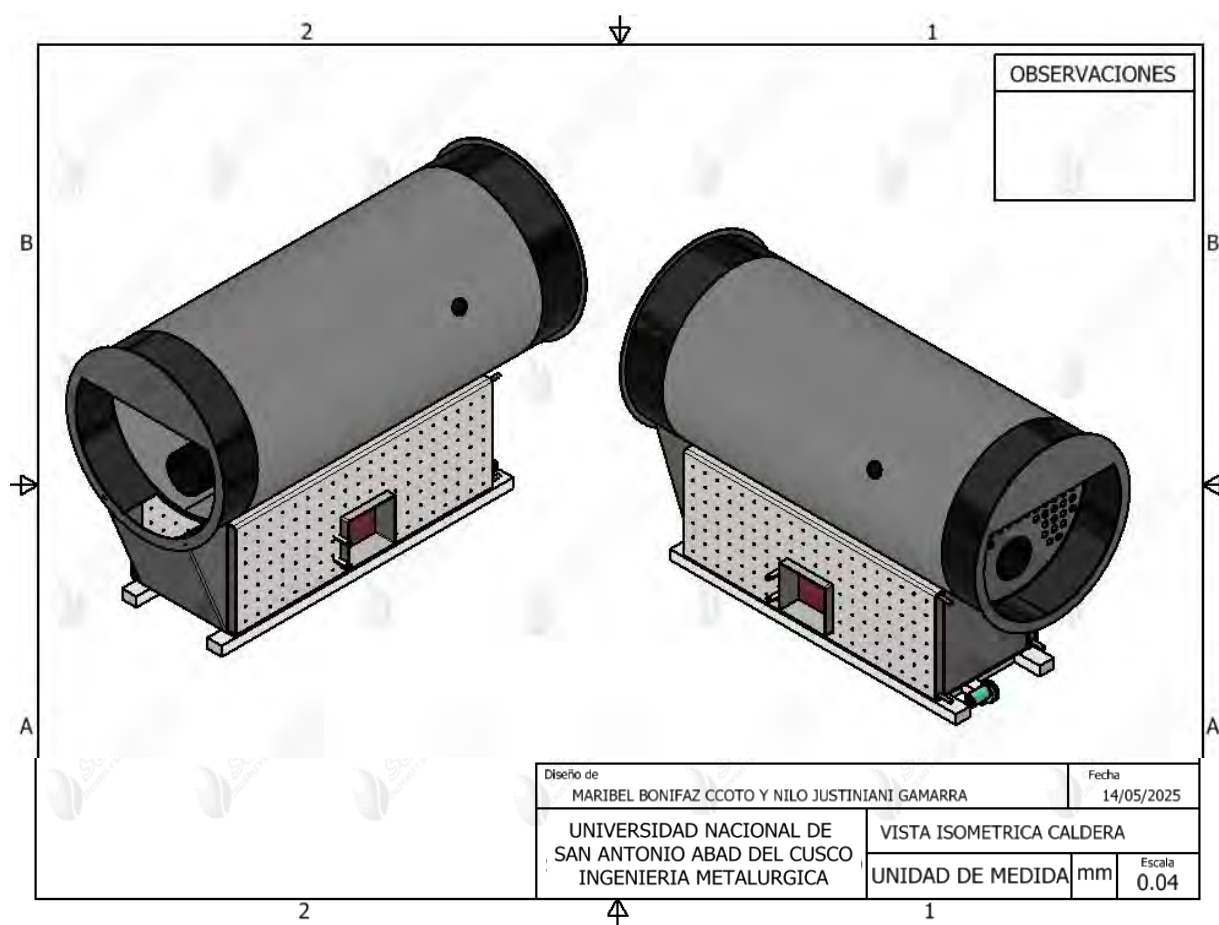
$$A_{leña} = \frac{0.064 (m^3)}{0.33 (m)}$$

$$A_{leña} = 0.194m^2$$

En las siguientes figuras podemos apreciar las diferentes vistas y el diseño por computador de quemador a biomasa según los datos obtenidos, dentro de ellos tenemos: la vista isométrica del quemador a biomasa integrado en la caldera pirotubular de 100 BHP, vista del recorrido interno de gases calientes en caldera pirotubular de tres pasos, la entrada de aire frío y aire caliente en el sistema de combustión del quemador y la vista del refractario y ubicación del ventilador del quemador a biomasa.

Figura 6

Vista Isométrica del Quemador a Biomasa Integrado en la Caldera Piro-tubular de 100 BHP



Nota: elaboracion propia

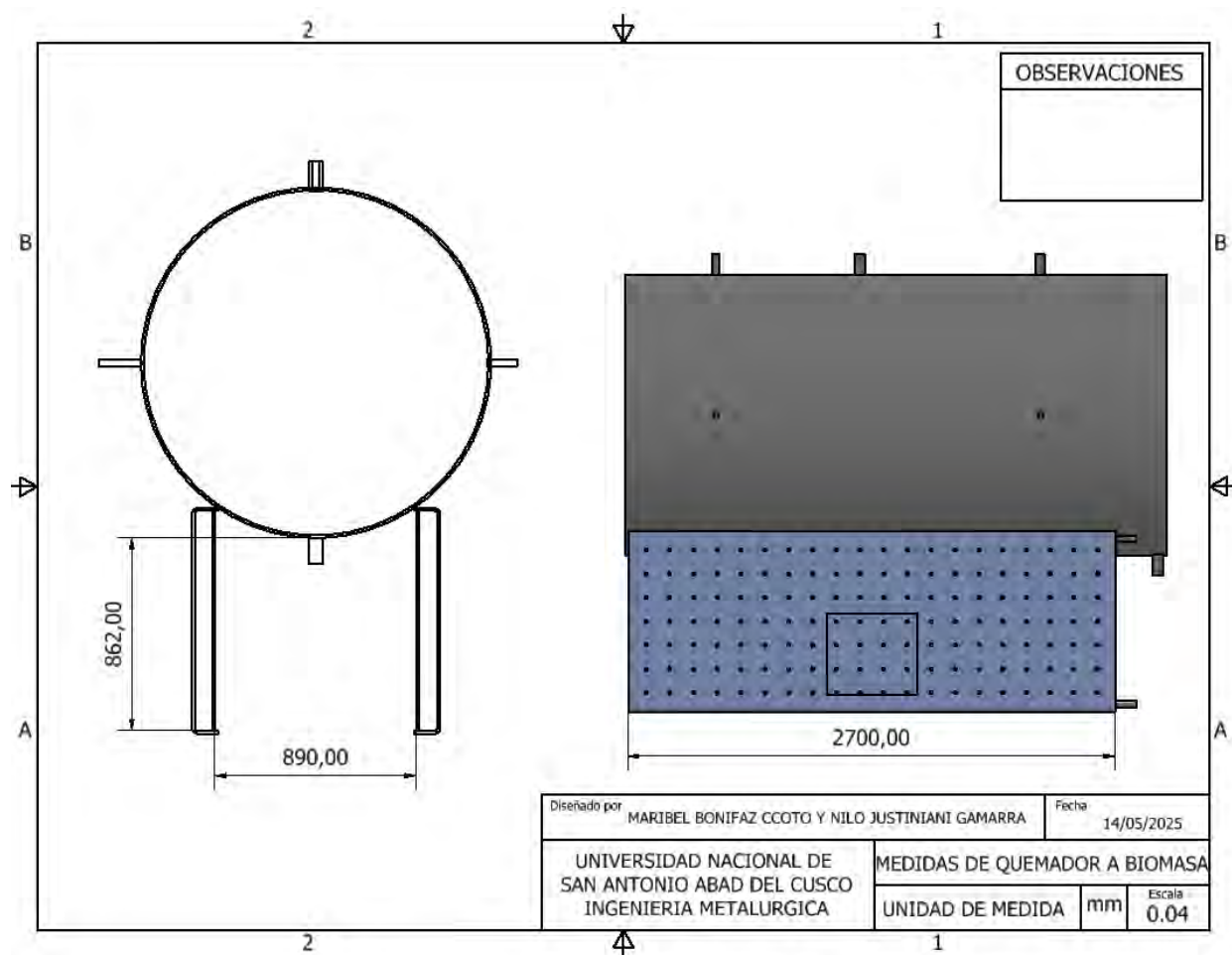
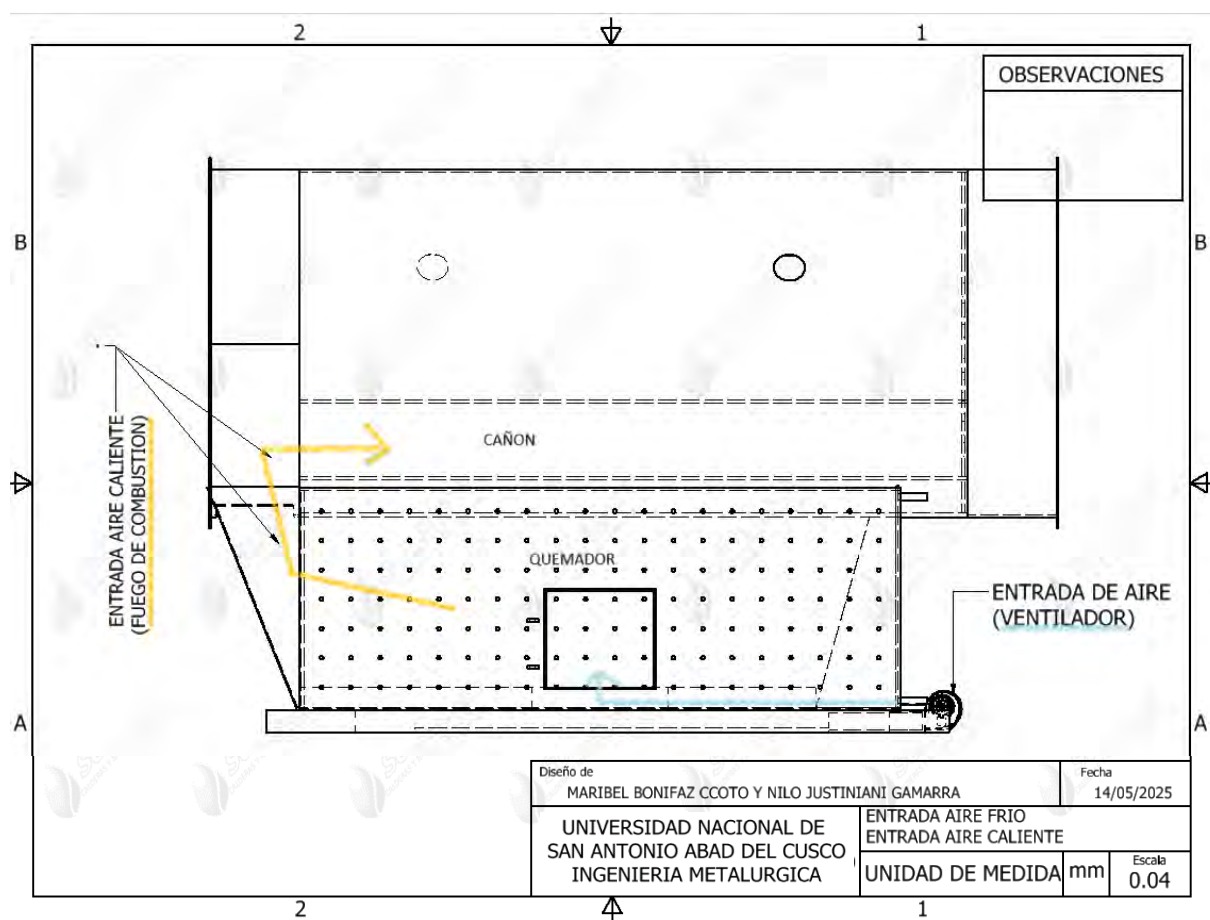
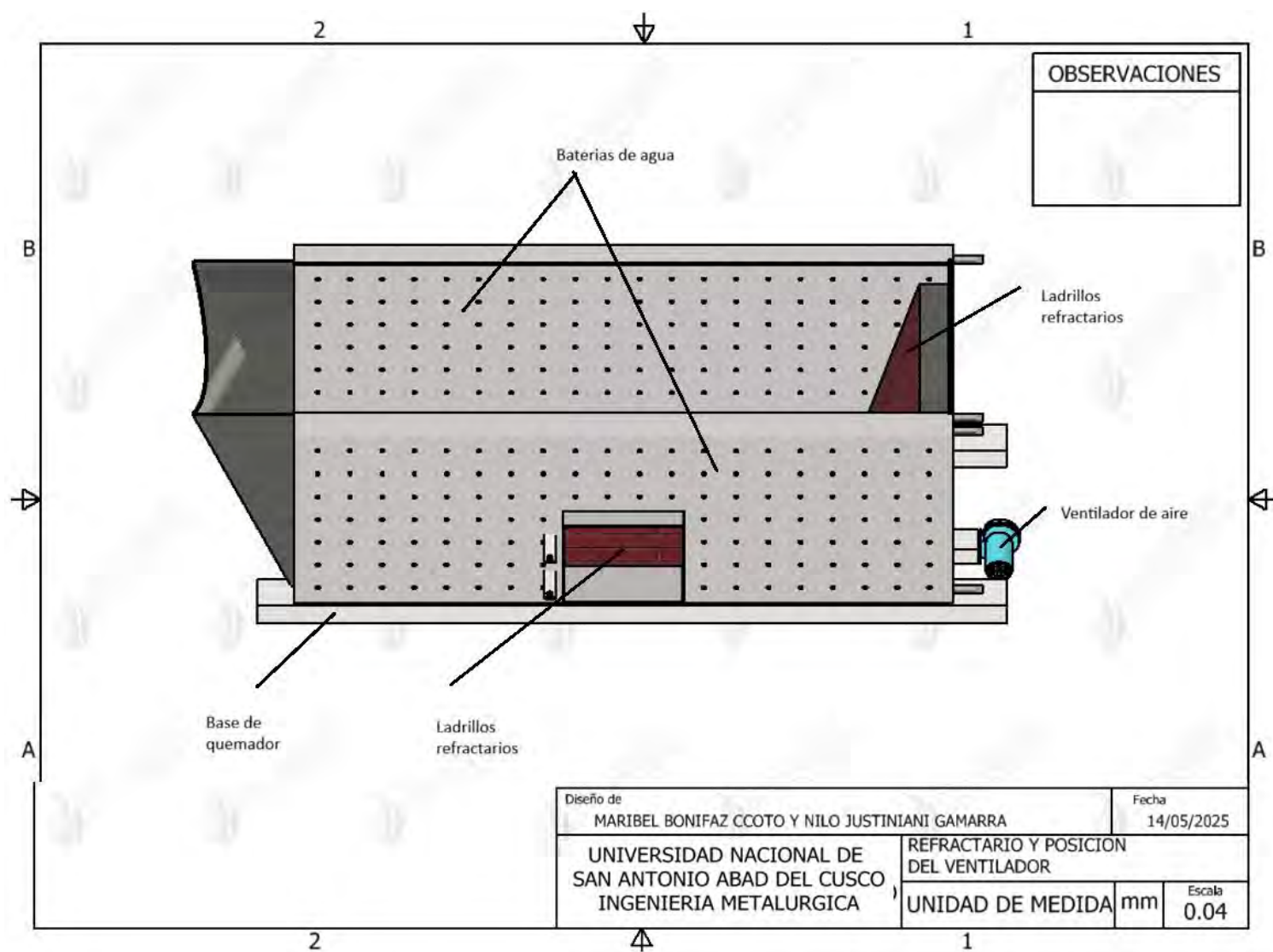
Figura 7*Vista de la Estructura Interna del Quemador Rectángulo**Nota: elaboracion propia*

Figura 8

Entrada de Aire Frío y Aire Caliente en el Sistema de Combustión del Quemador



Nota: elaboracion propia

Figura 9*Vista del Refractario y Ubicación del Ventilador del Quemador a Biomasa**Nota:* elaboracion propia

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados

Los resultados obtenidos a partir del diseño y evaluación del quemador a biomasa (eucalipto) para una caldera pirotubular, enfocados en los objetivos específicos de la investigación. En primer lugar, se lograron definir las dimensiones óptimas del quemador, asegurando su funcionalidad para el sistema de combustión y facilitando la extracción de cenizas y buen ingreso de aire. Asimismo, se determinó la cantidad necesaria de biomasa para generar el calor suficiente para el funcionamiento eficiente de la caldera, así como el volumen de aire requerido para lograr una combustión completa y uniforme.

La importancia de los resultados radica en su contribución práctica y económica, proporcionando una solución sostenible que no solo supera los costos de combustible en un rango del 20% al 30%, sino que también promueve el uso de recursos renovables. Este avance representa un impacto directo en la optimización de procesos industriales, alineándose con principios de sostenibilidad y eficiencia energética, lo que consolida la viabilidad del proyecto y su aplicabilidad en otros contextos industriales.

5.1.1. Dimensiones del Quemador

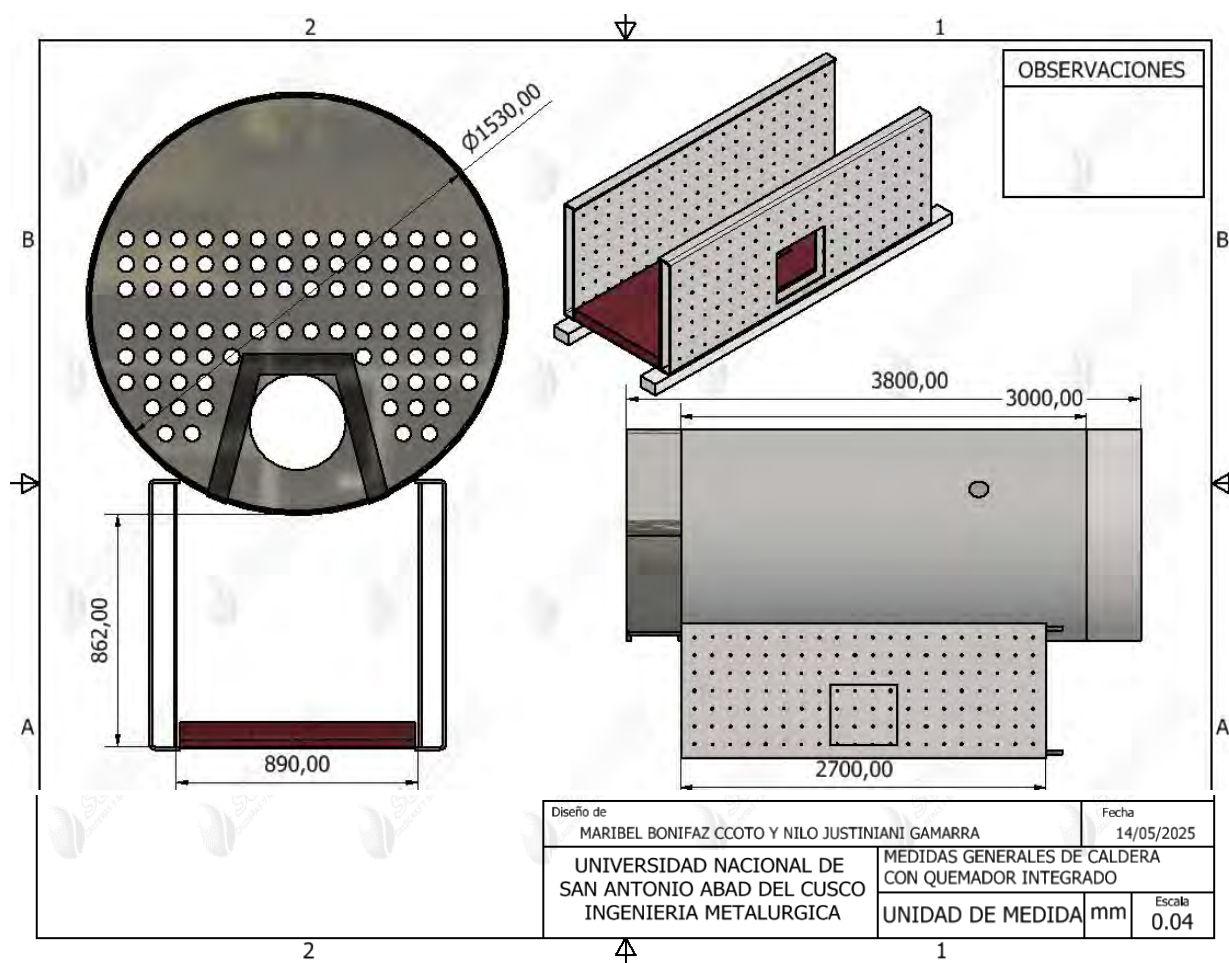
El diseño final del quemador a biomasa para una caldera pirotubular presenta las siguientes dimensiones y características principales:

- **Largo:** 2700 mm (2.7m)
- **Ancho:** 890 mm (0.89m)

- **Altura:** 862 mm (0.862m)
- **Área de entrada de aire del ventilador:** 22500mm^2 (0.0225m^2)
- **Diámetro interno del casco de caldera:** 1530 mm (1.53m)

El volumen total estimado para el quemador es 2.071 m^3 , Siendo un rectángulo y aprovechando la parte inferior de la caldera las medidas son de 0.89m de ancho, altura de 0.862m y largo de 2.7m, tal como se muestra en la Figura 10, del diseño hecho por el programa Inventor.

El volumen de 0.194 m^3 , representa el área transversal sólida ocupada por la leña dentro del quemador para una tasa de alimentación de 38.54 kg/h. Ocupando un 25.29% del volumen total del quemador 2.071 m^3 , dejando espacio suficiente para la circulación del aire necesario para la combustión.

Figura 10*Características del Diseño**Nota:* elaboración propia.**5.1.2. Cantidad de Biomasa Utilizada****Tabla 12***Consumo de Biomasa*

Condición de Operación	Biomasa Consumida (kg)	Volumen de Agua Calentada (L)	Presión Generada (PSI)	Duración (h)
Biomasa (Humedad 20%)	38.54	1566	150	1

Nota: elaboración propia.

La Tabla 12 muestra el consumo de biomasa en una caldera que opera con leña de eucalipto con un contenido de humedad del 20%. El consumo registrado es de 38,54 kg, con capacidad para vaporizar un volumen de 1566 litros de agua a una presión de 150 PSI en el transcurso de una hora.

Además, se observa que la humedad de la biomasa afecta significativamente en la eficiencia del proceso. Biomasa con menor contenido de humedad resulta más eficiente energéticamente, lo que se traduce en una reducción de los costos operativos. Por tanto, el control y manejo adecuado del contenido de humedad es crucial para optimizar el rendimiento de la caldera.

5.1.3. Volumen de Aire Requerido

Tabla 13

Caudal y Volumen de Aire para una Combustión Completa

Condición de Operación	Caudal de Aire (m³/h)	Volumen de Aire (m³)
Biomasa (Humedad 20%)	252.15	252.15

Nota: elaboración propia.

La Tabla 13 muestra el caudal de aire necesario para una combustión completa. lo que garantiza un suministro adecuado de oxígeno para mantener una combustión completa de 38.54 kg de leña de eucalipto con un contenido de humedad del 20%, considerando además la influencia de la altitud a 3400 metros sobre el nivel del mar (msnm), factor que afecta directamente la densidad del aire y por ende el volumen necesario para proveer el oxígeno requerido, en la Tabla 14 se puede ver un resumen del consumo de leña y volumen requerido.

Este análisis destaca la importancia de calibrar el sistema de aire del quemador para adaptarse a las variaciones en el consumo de biomasa y las condiciones operativas, maximizando así la eficiencia térmica del sistema y reduciendo emisiones contaminantes y la elección del ventilador correcto.

Tabla 14

Resumen del Consumo de Leña y Volumen Requerido

Parámetro	Valor	Unidad	Comentario
Consumo leña total	38.54	kg/h	Contenido húmedo 20%
Masa leña seca	30.83	kg/h	Leña sin humedad
Aire estequiométrico requerido	169.6	m ³ /h	Aire mínimo para combustión
Aire total con exceso (20%)	203.5	m ³ /h	Aire para garantizar combustión completa
Aire suministrado	252.15	m ³ /h	Aire real disponible, sobre exceso considerable
Relación aire/biomasa (vol.)	6.54	m ³ aire / kg biomasa	Relación aire / biomasa volumétrica real

Nota: elaboración propia.

5.1.4. Reducción de Costos de Combustible

Análisis económico

Tabla 15*Comparación de Costos entre Biomasa y Combustibles Tradicionales*

Combustible	Peso/Volumen (unidad)	Precio unitario (S/)	Costo total (S/)	Reducción de costo/ Leña (%)
Biomasa (Leña)	38.54 kg	0.50	19	
Gas GLP	14.24 kg	4.7	66	71.21
Petróleo D2	15.20 Kg	4.85	73.72	74.22

Nota: elaboración propia, recopilación de la Tabla 6 de precios y resultados del peso para cada combustible.

Para el gas GLP, la reducción es $\frac{66-19}{66} \times 100 \% = 71.21\%$

Para el petróleo D2, la reducción es $\frac{73.72-19}{73.72} \times 100 \% = 74.22\%$

La Tabla 15 presenta una comparación de costos entre la biomasa y combustibles tradicionales como el gas GLP y el petróleo D2, destacando la significativa diferencia en costos operativos. El uso de biomasa de 38.54 kg implica un costo total de S/ 19.00, gracias a su bajo precio unitario de S/ 0.50 por kg. En contraste, el gas, con un costo unitario de S/ 4.70 por kg, alcanza un costo total de S/ 66.00, mientras que el petróleo, con un precio de S/ 4.85.00 por kg, asciende a S/ 73.72. Esta comparación demuestra que la biomasa es considerablemente más económica, reduciendo los costos operativos en un 71,21% frente al gas, aunque el gas suele ofrecer ventajas en limpieza y facilidad de manejo, su elevado precio puede repercutir en mayores costos operativos; y un 74.22% frente al petróleo. Por otro lado, el gas y el petróleo, aunque con mayor concentración energética y menor volumen de almacenamiento, imponen costos que pueden limitar su uso en sectores industriales sensibles o que buscan reducción de costos y huella de carbono.

La biomasa, en este caso representada por leña de eucalipto, no solo aporta significativos ahorros económicos en función de su bajo precio unitario, sino que además es considerada una fuente renovable y de menor emisión de gases contaminantes cuando se maneja adecuadamente. Su uso puede fortalecer economías locales y promover cadenas productivas sustentables (Palencia-González, 2016; Gonzales & Verastegui, 2024).

5.2. Discusión

5.1. Interpretación de los Resultados Más Significativos

Los resultados alcanzados evidencian que el quemador a biomasa para caldera pirotubular que se ha diseñado y evaluado responde eficazmente al objetivo principal de reducción de costos energéticos y mejora de la eficiencia térmica en la empresa Soleman, región Cusco. Se observa que la eficiencia térmica del sistema alcanza el 80%, lo que sitúa al equipo dentro del rango óptimo reportado por antecedentes nacionales e internacionales, superando los umbrales mínimos establecidos por la FAO (2021) y estudios regionales como el de Aguilar (2023).

La reducción en el costo operativo –S/ 19.00 para biomasa frente a S/ 66.00 con gas GLP y S/ 73.72 con diésel– representa un ahorro directo de entre 71.21% y 74.22%, valor que coincide con los beneficios económicos reportados en investigaciones sobre transición energética en contextos industriales peruanos y asiáticos (Kahandawa Arachchilage, 2011; Palencia-González, 2016).

El diseño ha demostrado una gestión eficiente del volumen de aire para combustión, alcanzando 252.15 m³/h de caudal y asegurando la estabilidad operativa bajo las variables climáticas y altitudinales propias de la región andina. Estos parámetros se corroboran como parámetros de operación óptima del quemador a biomasa:

- Eficiencia térmica: 80 %
- Aire de combustión: 252.15 m³/h
- Consumo biomasa: 38,54 kg/h
- Humedad biomasa: 20 %
- Reducción de costo: 71.21– 74.22 %

5.2. Respuesta a las Preguntas de Investigación

A partir de los resultados, se responde que la conversión de calderas industriales a biomasa utilizando leña eucalipto es viable técnica y económicamente, permitiendo operar con niveles de eficiencia propios de sistemas modernos y con un impacto ambiental reducido. La reducción de la dependencia de combustibles fósiles y el mejor aprovechamiento de los recursos renovables redundan en beneficios operativos y sociales, tal como lo sugieren las estrategias de sostenibilidad energética del Ministerio de Energía y Minas (2024). Los datos recopilados permiten inferir que la sustitución de GLP y diésel por biomasa representa una alternativa aplicable a otros contextos industriales de la región, siempre que se mantenga el control sobre la humedad del combustible y la configuración del sistema de aireación.

Los resultados agregan evidencia cuantitativa precisa al cuerpo de estudios nacionales e internacionales, consolidando la relevancia de la biomasa como solución energética

competitiva y alineada con principios de circularidad y desarrollo local (Aguilar, 2023; FAO, 2021; Moral Salas, 2024).

5.3. Discusión de Limitaciones del Estudio

Si bien se ha demostrado que el quemador es funcional y económico, la investigación presenta algunas limitaciones relevantes. La principal corresponde al control de la humedad de la biomasa: valores superiores al 20% en leña eucalipto generan disminuciones notorias en la eficiencia térmica y aumentan la producción de residuos sólidos y gases contaminantes, ratificando la importancia del pretratamiento y el almacenamiento adecuado del combustible (FAO, 2021).

Asimismo, la heterogeneidad física de la biomasa –frecuencia en tamaño de las piezas y presencia de corteza– incide negativamente en la estabilidad de la llama y la uniformidad de la combustión. Mientras que estudios internacionales realizados con pellets y biocombustibles industriales uniformes minimizan este problema (Moral Salas, 2024), en la práctica regional se constata la necesidad de homogenización y procesamiento adicional del eucalipto.

Otra limitación significativa se relaciona con los requerimientos de monitoreo automatizado de la relación aire-combustible en función de la altitud y las fluctuaciones ambientales. El sistema analizado, aunque eficiente, requiere intervención técnica continua para adaptar el volumen y presión del aire en cada estación y rango de humedad relativa, lo que supone desafíos para la operatoria en industrias donde la automatización aún es parcial (Mendoza Tovar, 2021).

5.4. Contraste con Antecedentes Nacionales e Internacionales

Al contrastar los resultados obtenidos con los antecedentes referidos, se constata una coincidencia robusta en cuanto a la viabilidad técnica y económica de la biomasa como fuente de energía industrial para calderas. Aguilar (2023) reporta en el sur andino del Perú eficiencias térmicas superiores al 80% en sistemas adaptados a combustibles renovables, corroborando la evidencia local observada. De igual forma, Kahandawa Arachchilage (2011) demuestra en Sri Lanka que la conversión a biomasa con materiales de baja humedad permite ahorros superiores al 60% y periodos de retorno inferiores a seis meses, lo que coincide con los márgenes económicos aquí alcanzados.

A nivel internacional, Moral Salas (2024) y FAO (2021) refuerzan el impacto de la uniformidad y el procesamiento del combustible en la eficiencia y estabilidad de las operaciones. La comparación directa entre los sistemas locales y los europeos o asiáticos permite identificar los principales retos y oportunidades de mejora, especialmente en el manejo logístico y la automatización de los sistemas de combustión [FAO, 2021].

Por otra parte, los hallazgos en cuanto a la influencia de variables ambientales (altitud, humedad atmosférica) y el manejo del aire comburente constituyen una aportación sustancial al conocimiento técnico sobre la adaptación de tecnologías energéticas a regiones altoandinas, aspecto poco descrito en la literatura internacional y nacional.

5.5. Otras Observaciones Relevantes y Resultados No Esperados

Se identifica como resultado no esperado la sensibilidad extrema de la combustión a las variaciones de tamaño y composición de la biomasa, lo que genera fluctuaciones

importantes en la eficiencia bajo condiciones de suministro variable. Mientras que en contextos con pellets uniformes –como en España y Suecia– este factor es menos relevante, en Cusco se observa la necesidad de mayor control sobre la cadena logística del combustible para replicar los máximos rendimientos reportados en estudios internacionales (Moral Salas, 2024; FAO, 2021).

Asimismo, el análisis de la estabilidad térmica y la baja emisión de contaminantes confirma la pertinencia de emplear ladrillos refractarios y materiales como el acero A36, cuya durabilidad y capacidad de aislamiento contribuyen directamente a la prolongada vida útil y seguridad operativa del quemador, tal como demuestra la literatura internacional y los registros operativos locales (MaxAcero, 2023; Nitron SAC, 2018).

5.6. Implicaciones y Recomendaciones

Los resultados sustentan la recomendación de expandir el uso de quemadores a biomasa en industrias regionales y nacionales, sujetando la selección del combustible a estándares de calidad y homogeneidad. Se propone mejorar la infraestructura de almacenamiento y pretratamiento de biomasa, así como invertir en tecnologías de monitoreo continuo del aire y el combustible a fin de asegurar la eficiencia sostenida.

Desde un enfoque ambiental, se recomienda promover políticas públicas y privadas orientadas a la reforestación y producción sostenible de eucalipto y otras biomásas, desarrollando cadenas productivas y capacidades técnicas locales para fortalecer la actividad económica.

En el ámbito técnico, se sugiere avanzar hacia la automatización parcial o total del sistema de aireación, adoptando sensores y controles inteligentes que reduzcan la necesidad de intervención humana y aseguren la adaptabilidad del sistema ante variaciones ambientales.

Por último, la capacitación continua del personal operativo y el establecimiento de protocolos de mantenimiento regular resultan indispensables para garantizar la durabilidad y confiabilidad de los quemadores en entornos industriales exigentes, como señalan los manuales de operación contemporáneos (Ministerio de Energía y Minas, 2024; ASME BPVC, 2022).

Tabla 16

Recomendaciones Técnicas para Optimizar el Sistema de Biomasa

Área	Recomendaciones
Suministro biomasa	Registro de humedad y homogeneidad
Combustión	Monitoreo automatizado del aire
Materiales	Uso de ladrillo refractario y acero A36
Operación	Capacitación y protocolos de mantenimiento
Sostenibilidad	Reforestación y cadena local productiva

Nota: Elaboración propia sobre hallazgos y antecedentes.

5.7. Reflexión Final Sobre la Importancia de los Hallazgos

La importancia de los hallazgos radica en la demostración práctica de que la biomasa es una alternativa energética económicamente viable y ambientalmente sustentable, con capacidad para transformar la matriz energética de las empresas industriales cusqueñas y peruanas. El sistema analizado no sólo reduce costos y emisiones, sino que impulsa el desarrollo de cadenas productivas renovables, integrando a la comunidad y mejorando la resiliencia de la industria frente a fluctuaciones de precios y disponibilidad de combustibles fósiles.

La investigación confirma y amplía el alcance de los antecedentes nacionales e internacionales, revelando el potencial de la biomasa en regiones con condiciones ambientales demandantes y población dedicada al sector agroindustrial. Así, el estudio no sólo aporta evidencia para decisiones técnicas y de inversión, sino que también orienta políticas públicas y estrategias empresariales hacia la transición energética, la sostenibilidad y la inclusión social.

CONCLUSIONES

1. El diseño, construcción y evaluación del quemador a biomasa en caldera pirotubular cumplieron satisfactoriamente los requerimientos técnicos, estructurales y operativos, validando la biomasa como una alternativa económicamente viable y ambientalmente sostenible para la industria regional. La aplicación permitió reducir entre un 71,21% y un 74.22% los costos operativos respecto a combustibles fósiles como el Petróleo D2 y el Gas GLP, superando las expectativas iniciales y demostrando la pertinencia del sistema para promover procesos industriales más eficientes y sostenibles.
2. Las dimensiones finales del quemador (2700 mm de largo, 890 mm de ancho, 862 mm de altura, área de entrada de aire de 22,500 mm² y diámetro interno de caldera de 1530 mm) resultaron óptimas para facilitar la entrada de aire, la extracción de cenizas y la operación estable. Esta configuración estructural, además de maximizar la eficiencia térmica y garantizar la durabilidad del sistema, facilitó su mantenimiento y aseguró una distribución homogénea y eficiente del aire comburente.
3. El análisis cuantitativo evidenció que el quemador operó eficientemente con un consumo promedio de 38,54 kg de leña eucalipto por hora y un caudal de aire de 252.15 m³/h, logrando una combustión uniforme, completa y con generación mínima de residuos. El control de la humedad de la biomasa y la precisión en la dosificación del aire fueron determinantes para alcanzar un rendimiento térmico del 80%, lo que permitió satisfacer de manera consistente la demanda energética industrial y disminuir los impactos ambientales.

4. La adopción del sistema de biomasa es plenamente replicable y adaptable a la industria local, siempre que se garantice la calidad y homogeneidad del combustible, se mantenga el monitoreo técnico-operativo y se fortalezca la capacitación del personal involucrado. Las limitaciones detectadas, principalmente la variabilidad en la biomasa y la necesidad de ajustes periódicos ante condiciones ambientales, pueden ser superadas mediante la mejora continua de procedimientos y la integración de tecnologías de control automatizado y cadena logística de biomasa.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario que las empresas industriales implementen el quemador a biomasa diseñado en sus procesos operativos como alternativa eficiente y sostenible, para disminuir costos energéticos y alinear la producción con los principios de sostenibilidad ambiental y uso responsable de recursos renovables.
2. Es fundamental establecer protocolos rigurosos de evaluación y aseguramiento de la calidad de la biomasa, incluyendo la determinación de la humedad y la homogeneidad dimensional, así como procedimientos estandarizados para el almacenamiento y secado. Esto garantizará el máximo rendimiento térmico y la reducción de emisiones contaminantes, contribuyendo a la viabilidad a largo plazo de la tecnología.
3. Es esencial implementar programas de mantenimiento preventivo y correctivo del quemador y caldera, que incluyan la limpieza regular de los conductos, la inspección periódica de componentes estructurales y refractarios, y la verificación constante de la distribución del aire comburente, con el fin de evitar fallas operativas, maximizar la vida útil del equipo y asegurar la operación en condiciones óptimas y seguras.
4. Se exhorta capacitar de manera continua al personal encargado tanto en la gestión del quemador como de la biomasa, reforzando sus competencias en el control de la relación aire–combustible, la extracción de cenizas, el mantenimiento integral y la identificación y solución de contingencias, para maximizar el aprovechamiento energético y garantizar la seguridad industrial.
5. Se sugiere adoptar sistemas de monitoreo continuo y control automatizado para el seguimiento de las variables críticas del proceso de combustión, lo cual permitirá evaluar y optimizar el desempeño térmico en tiempo real, realizar ajustes oportunos a

los parámetros operativos y anticipar posibles desviaciones que afecten la eficiencia energética del sistema.

6. Se deben impulsar políticas y alianzas que fortalezcan la cadena de valor de la biomasa y promuevan la reforestación, incentivando la colaboración entre empresas, instituciones y comunidades, así como la investigación aplicada para adaptar el sistema a diversos tipos de biomasa y contextos industriales. Todo ello permitirá consolidar el modelo en la matriz energética nacional y avanzar hacia una economía circular, sostenible e inclusiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

20 minutos (2018). Estudio de poder calorífico para tipos de madera en clima adaptado.

Acerostorices. (2024). Acero A36: *Tipos y Usos*. Recuperado de <https://acerostorices.com/blog/acero-a36-tipos-y-usos/>

ACHS. (2020). *Agua de alimentación de calderas*. Asociación Chilena de Seguridad. Recuperado de https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-fichas/trabajadores/agua-de-alimentacion-de-calderas.pdf?sfvrsn=5d93dcf2_0

Aguilar Vizcarra, D. L. (2023). *Diseño de una caldera piroacuotubular (mixta) para la reducción de emisiones de gases de combustión mediante la generación simultánea de agua caliente y vapor de agua* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Federico Villarreal].

Aguilar, A. (2023). *Diseño de un prototipo de caldera que usa como combustible biomasa (hueso de aceituna, hueso de palta y cascara de almendras) aplicado a un sistema de calefacción, para el puesto de salud imata en la región altoandina de Arequipa* [Tesis].

American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7th ed.). <https://apastyle.apa.org>

American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2021). *Power Test Code PTC 4.1: Fired Steam Generators*. ASME International. <https://doi.org/10.1115/PTC4.1>

Análisis teórico de la combustión de biomasa residual proveniente de cultivos tradicionales. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/84108499.pdf>

- Antay, M., & Pfuro, B. (2022). *Diseño y construcción de un horno de crisol basculante para la fusión de aluminio para el laboratorio de fundición y moldeo de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Arnijos, N., & Morales, L. (2012). *Diseño y construcción de un sistema de calentamiento de agua para la curtiduría cueros y cueros* [tesis de grado]. oilitecnica de chimborazo.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). (2022). American Society of Mechanical Engineers.
- Aventura Creaciones. (2023). Ladrillo refractario de 3/4 pulgadas.
<https://aventuracreaciones.com/products/ladrillo-refractario-de-3-4>
- Betancurt, J., & Ospina, J. (2010). *Diseño y construcción de un prototipo de caldera que usa como combustible cáscara de jatropha curca* [Tesis].
- Burra, R., & Gupta, R. (2019). *Determinación del potencial energético de la biomasa residual*. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18090/1/UPS-CT008600.pdf>
- Caiza, P., & Ojeda, D. (2010). *Tratamiento de agua para calderas de vapor*. SCRIBD. Recuperado 8 de noviembre de 2023, de <https://es.scribd.com/doc/30715747/Las-Agua-de-Caldero-y-Sus-Problemas>.
- Chiquitó, E. (2016). *Diseño, montaje e instalación de una caldera de biomasa en la planta de subproductos de frigoríficos S. A.* [Tesis].
- Compañía General de Aceros (CGA). (2025). Lámina A36 – *Características y Aplicaciones*. Recuperado de <https://www.cga.com.co/producto/lamina-a36/>

Creswell, J. W. (2020). Research design: *Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage Publications.

DiCYT (2018). *Certifican el uso energético del eucalipto urograndis* (16,74 MJ/kg).

DSpace UPS (2023). *Optimización eficiencia energética de la leña (Eucalyptus spp.): poder calorífico inferior ajustado a humedades*.

EOI, (2015). Documento *Combustión directa de la biomasa*.

Fiteferra (2023, 28 septiembre). Altitud y calderas: *Cómo la altura afecta el rendimiento de las calderas*. Aerothermia y autoconsumo Valencia. <https://fiterria.es/caldera-valencia/altitud-en-el-rendimiento-de-caldaltitud-en-el-rendimiento-de-calderas-eras/>

Food and Agriculture Organization (FAO, 2021). *Manual de caracterización de biomasa sólida*. <https://www.fao.org/3/i2809s/i2809s.pdf>

Food and Agriculture Organization (FAO, 2023). *Wood Energy and Biomass Resources in Latin America*. FAO Forestry Paper. <https://doi.org/10.4060/cb7846en>

Fundación Descubre / Universidad de Huelva (2018). *El eucalipto urograndis tiene un poder calorífico de 16,74 MJ/kg, similar a la encina y pino* (iDescubre).

García et al. (2020). *Sistema de Control de una Caldera*. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-de-san-martin-de-porres/instrumentacion-y-control-industrial/grupo-7-trabajo-final-instrumentación/55352041>

García, M. (2022). Tratamiento de agua de alimentación a calderas y agua de calderas. *Arveng Training & Engineering*. <https://arvengtraining.com/tratamiento-de-agua-de->

alimentacion-a-calderas-y-agua-de-
calderas/#:~:text=Se%20denomina%20%E2%80%9Cagua%20de%20alimentaci%C3
%B3n,retorno%20de%20condensado%2C%20al%20mismo

García, M., & Sánchez, D. (2018). *Manual de calderas industriales*. Universidad de Burgos.

González, Y., & Quispe, I. (2019). *Combustion and emissions of Peruvian eucalypt wood*. *Biomass & Bioenergy*, 122, 105415. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105415>

Grillcorp. (2024). *Leña de Eucalipto de 4kg - Braza*.

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2022). *Metodología de la investigación* (7.^a ed.). McGraw-Hill.

Impimur, Lana de vidrio aislante térmico: ¿Es efectiva?, 2024. <https://impimur.com/blog/lana-de-vidrio-aislante-termico/>

Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2024). *Manual de calibración de equipos de medición térmica*. Ministerio de la Producción, Lima.

International Energy Agency (IEA). (2022). *Renewable Heat Policies in Industry 2022*. <https://doi.org/10.1787/renewheat-2022-en>

International Organization for Standardization (ISO). (2023). ISO 13577-1: *Industrial furnaces and associated processing equipment — Safety — Part 1*. <https://www.iso.org/standard/85174.html>

J. et al., *Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones*, Fedepalma, 2020.

Kahandawa Arachchilage, C. G. S. (2011). *Conversion of Furnace Oil Fired Boiler to Biomass (Gliricidia) Fired (External/Internal) Furnace Boiler* [Tesis de maestría, Royal Institute

of Technology]. Universidad Real de Tecnología, Departamento de Tecnología Energética. Suecia.

Kloeckner Metals. (2025). Acero A36: *Una inmersión profunda en la chapa A36*. Recuperado de <https://www.kloecknermetals.com/es/blog/a36-steel-a-deep-dive-into-a36-plate/>

La Carbonera Grill. (2023). Leña de Eucalipto.

Lenntech. (2024). *Agua de alimentación de caldera*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/boiler-feed-water.htm>

López et al. (2021). *Impurezas, dureza y efectos*. <https://es.scribd.com/document/504505037/Impurezas-dureza-y-efectos-diana-eduardo-getsemani-carlos-8b2>

Marco Teórico (1) Edt | PDF | *Biomasa | Energía renovable* - Scribd. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/432619894/Marco-Teorico-1-Edt>

MaxAcero. (2023). *¿Qué es el Acero A36? Usos, Componentes y Propiedades*. Recuperado de <https://maxacero.mx/blog/que-es-el-acero-a36-usos-y-propiedades/>

MaxAcero. (2023). *Catálogo de metales industriales*.

Mendoza Tovar, R. (2021). *Determinación de las características anatómicas y propiedades físico-mecánicas de madera de Eucalyptus torreliana F.* Repositorio UNCP.

Metalúrgica Solución, "Lana de Vidrio como Aislante Térmico", 2024. <https://metalurgicalasolucion.com.py/lana-de-vidrio-como-aislante-termico/>

Metinvest Holding. (2025). Acero ASTM A36: *características, propiedades, análogos*. Recuperado de <https://metinvestholding.com/es/products/steel-grades/astma36>

Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2023). *Estrategia nacional de eficiencia energética 2023–2030*. Lima: Gobierno del Perú.

Ministerio de Energía y Minas. (2024). *Manual técnico de calderas industriales*.
<https://www.minem.gob.pe>

Moral Salas, R. (2024). *Diseño y cálculo de una caldera pirotubular de vapor de 750 kW, para una producción de 1000 kilos de vapor/hora a 8 bares, como condiciones de trabajo* (Trabajo de fin de grado). Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Jaén, Jaén, España.

Moscoso, F. (2014). *Automatización del sistema de alimentación de agua hacia calderas usando un control PID*, con una alternativa en control fuzzy en el entorno grafico labview [tesis]. Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales Programa Profesional de Ingeniería Electrónica.

Navarrete Rodríguez, L. F., García Medina, J. A., & Montoya Rengifo, D. L. (2022). *Biomasa de Eucalyptus globulus como materia prima en la obtención de biocombustible líquido*.
 Revista Biotecnología en el Sector

Nitron SAC. (2018). *Ladrillos refractarios Nitron: características y aplicaciones*.
<http://refractariosnitronsac.blogspot.com>

Núñez, J. (2012). *Caracterización físico-química de biomasa residual*.

Panel y Acanalados Monterrey. (2025). *Acero A36: Propiedades y Usos*. Recuperado de
<https://panelyacanalados.com/blog/acero-a-36-propiedades-y-usos/>

Panel y Acanalados. (2025). *Manual técnico de acero laminado*.

- Pérez, J., & Molina, E. (2022). *Evaluación energética de calderas pirotubulares con combustibles alternativos en zonas altoandinas*. *Revista Energía y Tecnología*, 18(3), 45–58. <https://doi.org/10.18800/energiatec.2022.003>
- Pradhan, S., Mahajani, S., & Arora, R. (s.f.). *Estudio y comparativa de la biomasa como combustible*. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es/bitstreams/976d957b-388b-4f85-966d-09a553e2e332/download>
- Promart. (2008). *Ladrillos refractarios: propiedades y usos*. <https://www.promart.pe/ladrillos-refractarios>
- PSI Concreto, "Ventajas del Concreto Refractario", 2024.
- Quintero González, J. R., & Quintero González, L. E. (2015). *Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano*. *Gestión y Ambiente*, 18(1), 179-188.
- Quispe, A. (2018). *Diseño hidraulico de instalación de gas natural para caldera pirotubular de 400 BHP, en planta industrial Molitalia - 2018* [Tesis].
- R. Paredes, *Caracterización de biomasa mediante uso y análisis*, UPM, 2019.
- Redactor. (2018, 22 junio). *Biomasa: calefacción para comunidad de vecinos - Notipascua. ultimas noticias al día*. Notipascua. Ultimas Noticias al día. <https://notipascua.com/biomasa-calefaccion-comunidad-vecinos/>
- Repositorio UNLP. (2019). *Quemador de biomasa con flujo de aire indirecto*. Universidad Nacional de La Plata.

- Revista IMASI / Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú (2021). *Caracterización energética de biomasa de eucalipto: hasta 19.58 MJ/kg.*
- Ridge, B. (2023, 7 octubre). *La Distinción Entre Marketing y Diseño Gráfico: Una Comparación Detallada.* Medium Multimedia. Recuperado 25 de enero de 2024, de <https://www.mediummultimedia.com/disenocual-es-la-diferencia-de-marketing-y-disenografico/>
- Rodríguez, J. (2006). *Desarrollo de un Sistema de Control Avanzado de la Presión del Vapor en una Caldera de Tubos de Fuego – 2006* [Tesis de maestría].
- Ruz, A. (2017). *Diseño, construcción y pruebas de un quemador de gas para horno rotatorio piloto (Tesis de pregrado).* Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103287>
- Ruz, J. (2017). *Diseño y optimización de quemadores a biomasa para calderas.* Universidad de Burgos.
- Schemin, "Cemento Refractario: Características y Aplicaciones", 2023. <https://scheminperu.com/como-se-usa-el-cemento-refractario-2/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018, 7 de octubre). *¿Qué es la energía de biomasa?* Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-energia-de-biomasa>
- SHI. (2023, 4 diciembre). *Unidades hidráulicas de potencia adaptadas a cada cliente. SHI Servicio Hidráulico Industrial.* <https://www.bombas-hidraulicas.com.mx/unidades-hidraulicas-de-potencia/>

SINCAL (2023). *Emplazamiento y ventilación de calderas*. <https://sincal.es/emplazamiento-de-calderas/>

Textos Científicos. (2005). *Biomasa*. Textos Científicos. <https://www.textoscientificos.com/energia/biomasa>

Thermal Combustion. (2022). *La velocidad del aire en los quemadores industriales*. Recuperado de <https://thermalcombustion.com/la-velocidad-del-aire-en-los-quemadores-industriales/>

Thermal Combustion. (2022). *Manual técnico de combustión y diseño de quemadores*. Editorial Técnica.

Torres, M., Rivas, D., & Quispe, G. (2023). *Análisis comparativo del rendimiento térmico entre calderas de biomasa y calderas de GLP en la sierra sur del Perú*. Ingeniería y Ciencia Aplicada, 12(1), 71–82. <https://doi.org/10.46556/ica.2023.071>

UNAM, *Procesos de conversión de la biomasa*, 2018.

UNE-EN ISO/IEC 17025. (2021). Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración.

Universidad de Burgos. (2013). *Guía para el diseño de quemadores de biomasa*. Servicio de Publicaciones, Universidad de Burgos.

Universidad de Burgos. (2013). *Manual de calderas industriales*. Burgos, España.

Vidal, S. (2023, 29 junio). *Diagrama de Mollier* - TecnoBITS. Campus Habitat. <https://tecnobits.com/diagrama-de-mollier/>

Zeramik, "Cemento refractario para pegado de ladrillo aislante", 2024.

Zevallos, M. (2015). *Biomasa residual y su potencial energético*. Recuperado de <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1261/TB-Huaytalla%20B.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de Consistencia

PROBLEMA (formulación)	OBJETIVO	VARIABLE	INDICADOR DE VARIABLE	METODOLOGIA
Problema general	Objetivo general	Variable dependiente	Indicador	Tipo de investigación
¿Será posible el diseño y evaluación de un quemador a biomasa (eucalipto) para una caldera pirotubular para reducir costos de combustible en la empresa SOLEMAN - Cusco?	Diseñar y evaluar un quemador a biomasa (eucalipto) de una caldera pirotubular para la reducción de costos de combustible en la empresa SOLEMAN – Cusco.	Reducción de costos/combustible	Porcentaje costo/combustible	Tecnológica – aplicativa
			Unidad	Enfoque de investigación
			% de costos	Cuantitativo

Problema específico	Objetivo específico	Variable Independiente	Indicador	Alcance de investigación
¿Cuáles serán las dimensiones adecuadas del quemador a biomasa (eucalipto) para la evaluación de su funcionamiento en la reducción de costos de combustible?	Calcular las dimensiones del quemador de biomasa para una caldera pirotubular para la evaluación de su funcionamiento en la reducción de costos de combustible.	Dimensiones de quemador	(L*A*H) Unidad M	Descriptivo Explicativo Población Sistemas térmicos industriales activos en cusco
¿Qué cantidad de biomasa (eucalipto) se requerirá para generar el calor necesario para el funcionamiento de una caldera pirotubular?	Calcular la cantidad de biomasa requerida en un quemador para el funcionamiento de una caldera pirotubular.	Peso de biomasa	Cantidad en Kilogramos Unidad kg	Muestra Caldera pirotubular de 100 BHP Técnicas de recolección de datos Observación Revisión bibliográfica Diseño Operación Evaluación
¿Qué caudal de aire será necesario para producir una combustión completa en el quemador de una caldera pirotubular?	Calcular la cantidad de aire (comburente) requerido para una combustión completa en el quemador de una caldera pirotubular.	Volumen de aire	Cantidad en metro cúbico Unidad m ³	

ANEXO 2: Ficha de Registro

FICHA DE OBSERVACION

DATOS GENERALES:

NOMBRE Y APELLIDOS

MARIBEL BONIFAZ CCOTO
NILO JUSTINIANI GAMARRA

TESIS

: DISEÑO Y EVALUACION DE UN QUEMADOR A BIOMASA PARA UNA
CALDERA PIROTUBULAR PARA REDUCIR COSTOS DE COMBUSTIBLE EN LA
EMPRESA SOLEMAN – CUSCO

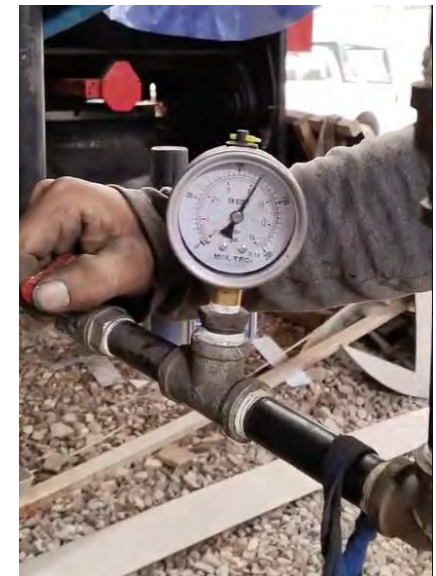
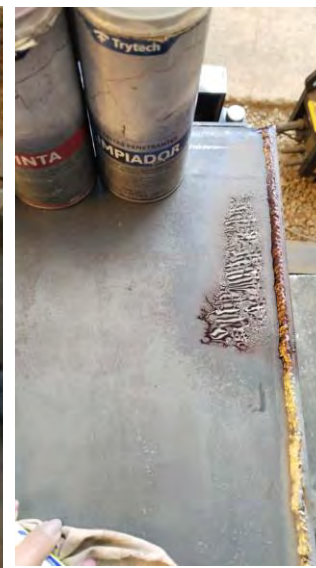
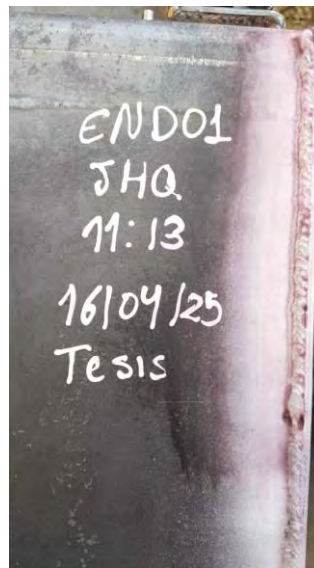
PRUEBA 1 caldera fria T AMBIENTE

LEÑA (Kg) 20% humedad	V. AIRE (m3)	AGUA (L)	PRESION (PSI)	HORA
16.5	252.15	1566	0	04:00:00 p. m.
14	252.15	1566	40	05:16:00 p. m.
12.5	252.15	1566	50	05:48:00 p. m.
14	252.15	1566	60	06:30:00 p. m.
10	252.15	1566	95	06:40:00 p. m.
TOTAL	67	252.15	150	2:40min

PRUEBA 2 caldera CALIENTE A DESDE 70°C

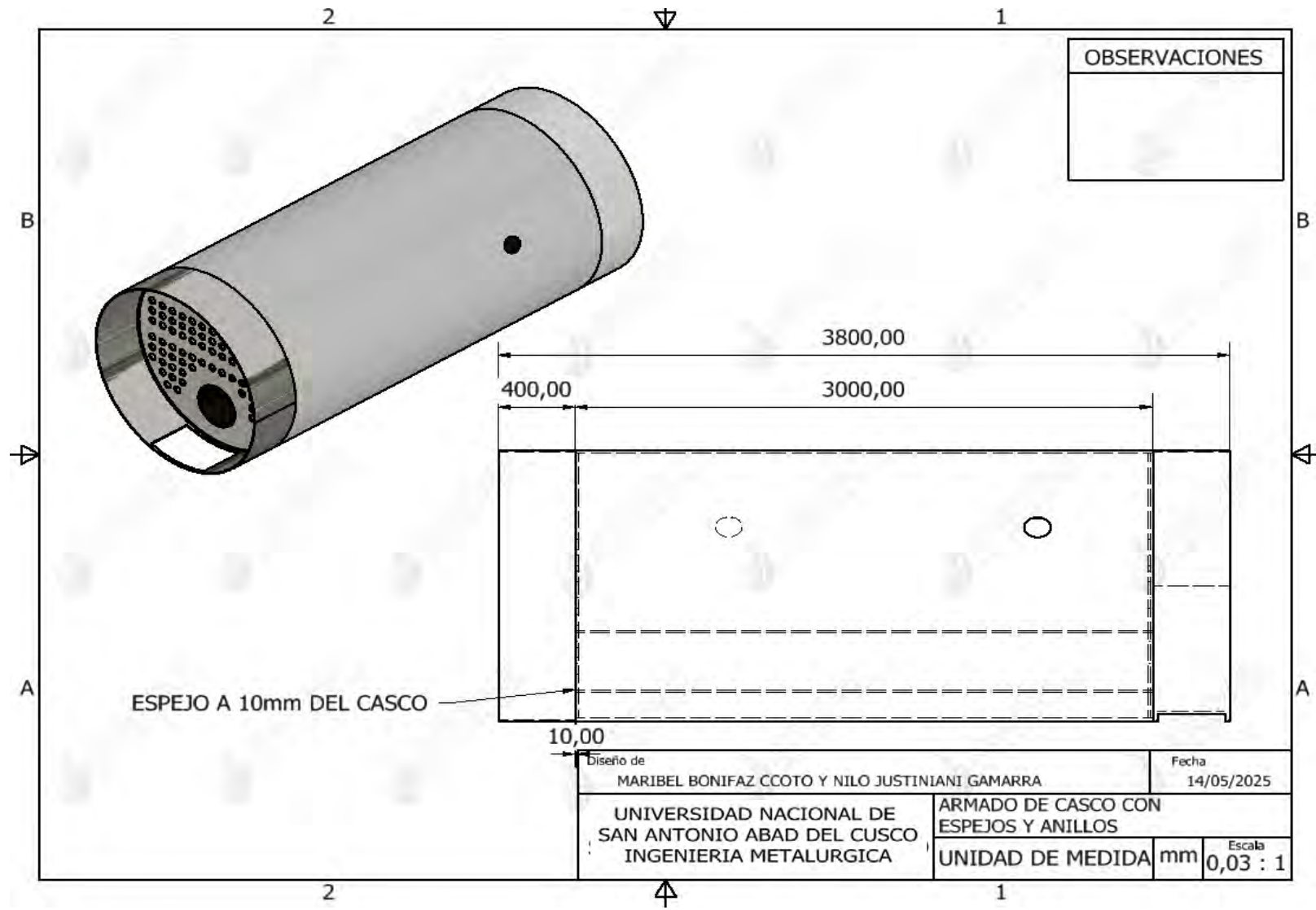
LEÑA (Kg) 20% humedad	V. AIRE	AGUA (L)	PRESION (PSI)	HORA
15.5	252.15	1566	0	11:25:00 a. m.
10	252.15	1566	40	12:10:00 p. m.
13	252.15	1566	90	12:22:00 p. m.
TOTAL	38.5	252.15	150	57 min

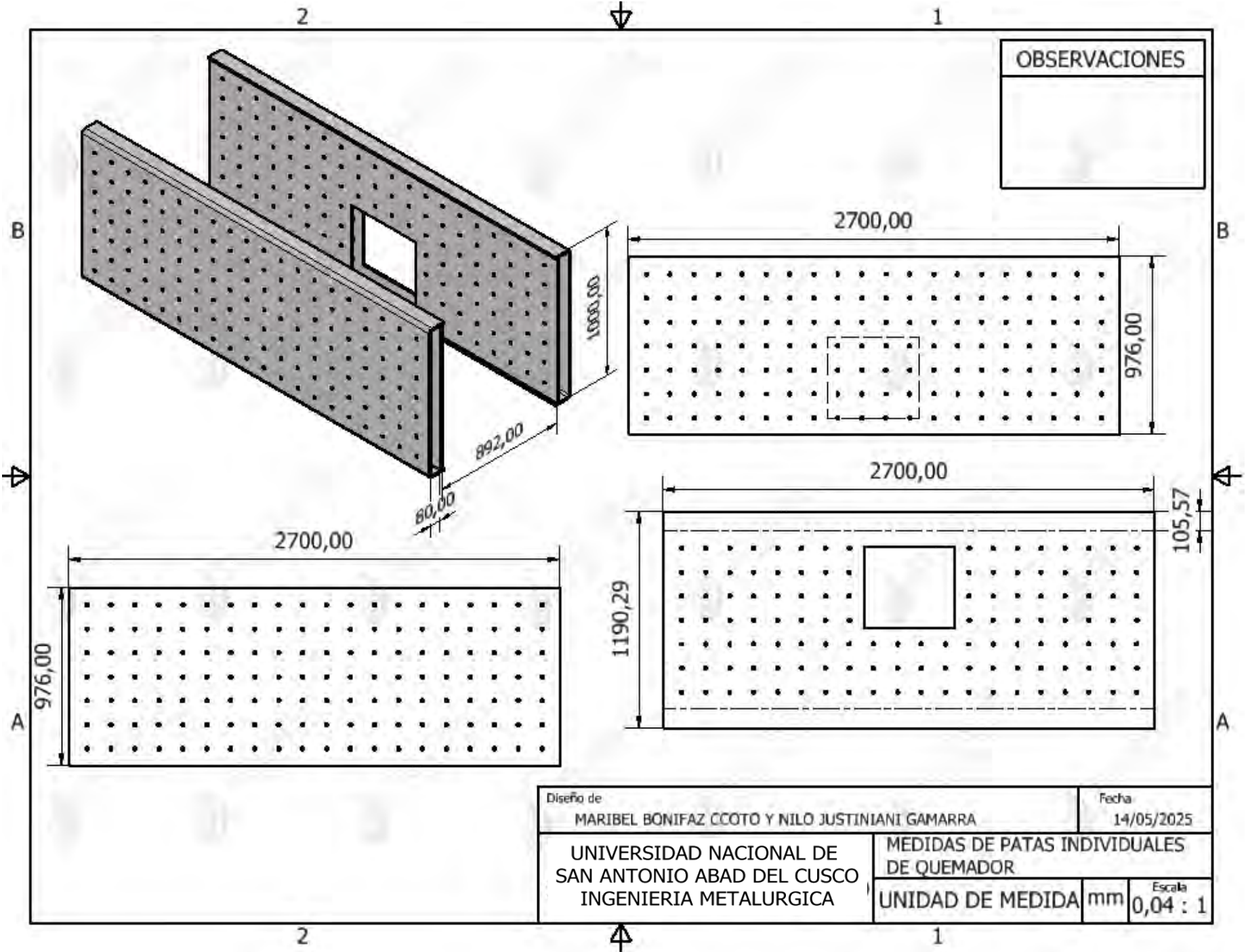
ANEXO 3: Registro Fotográfico

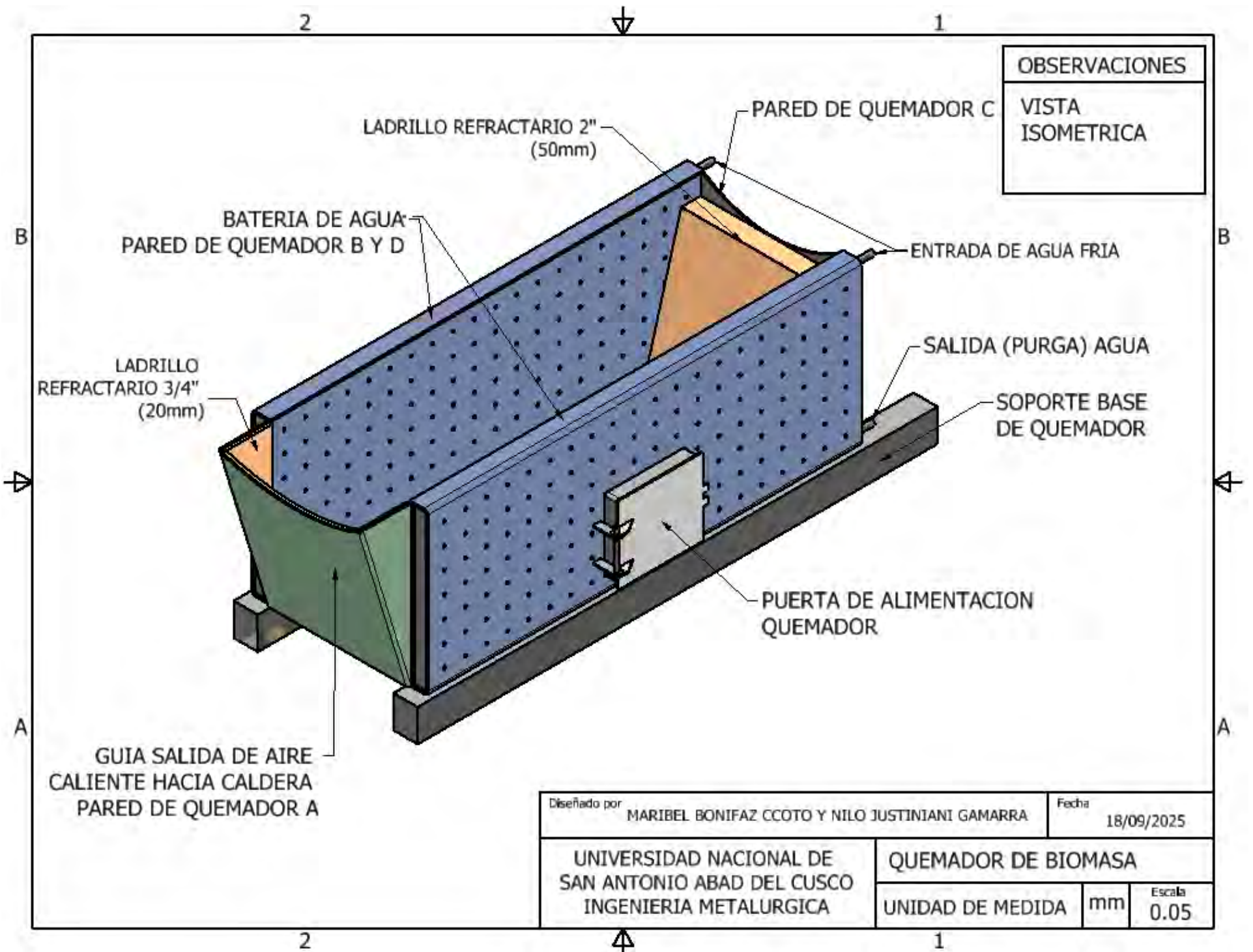




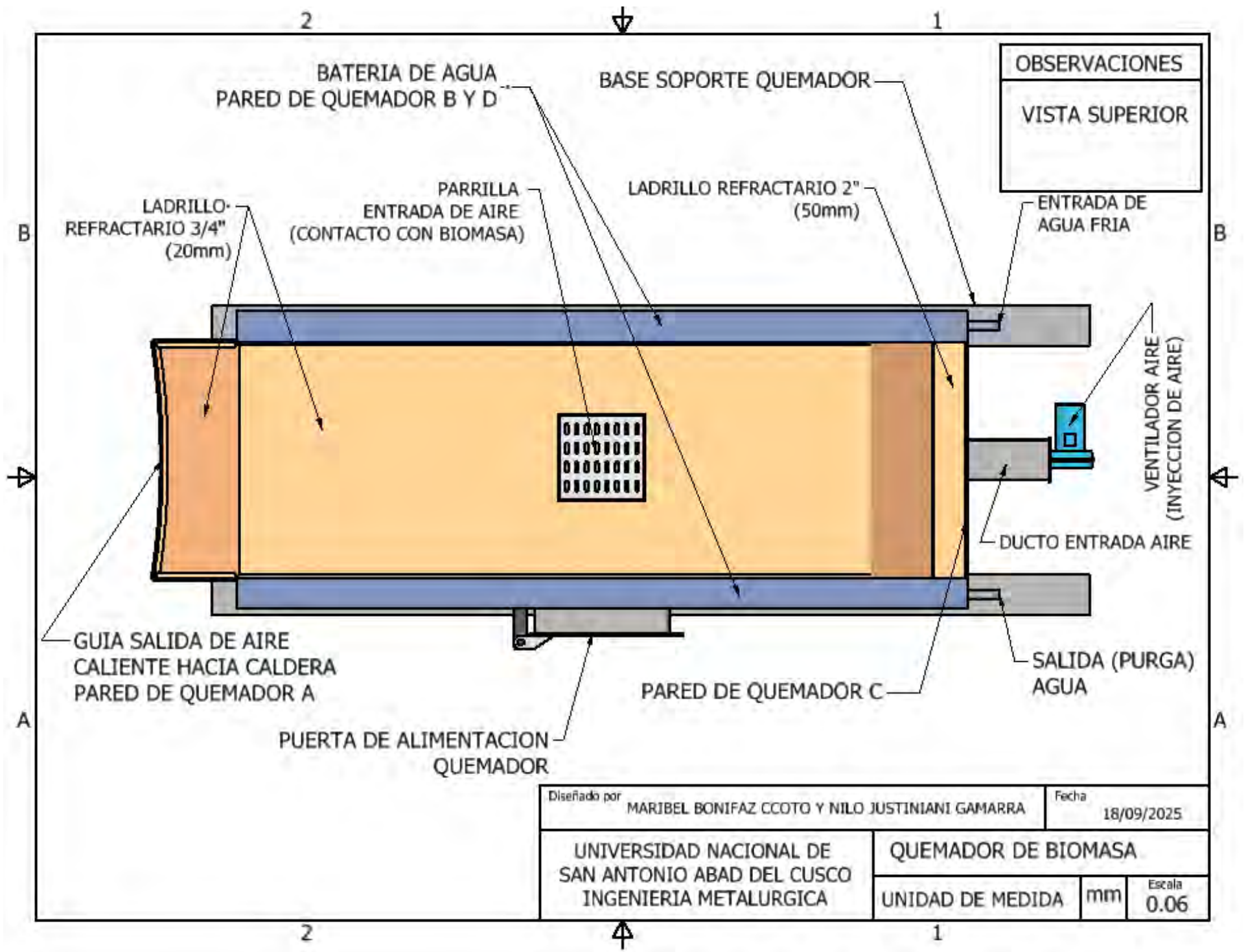
ANEXO 4: Planos de Construcción de Quemador



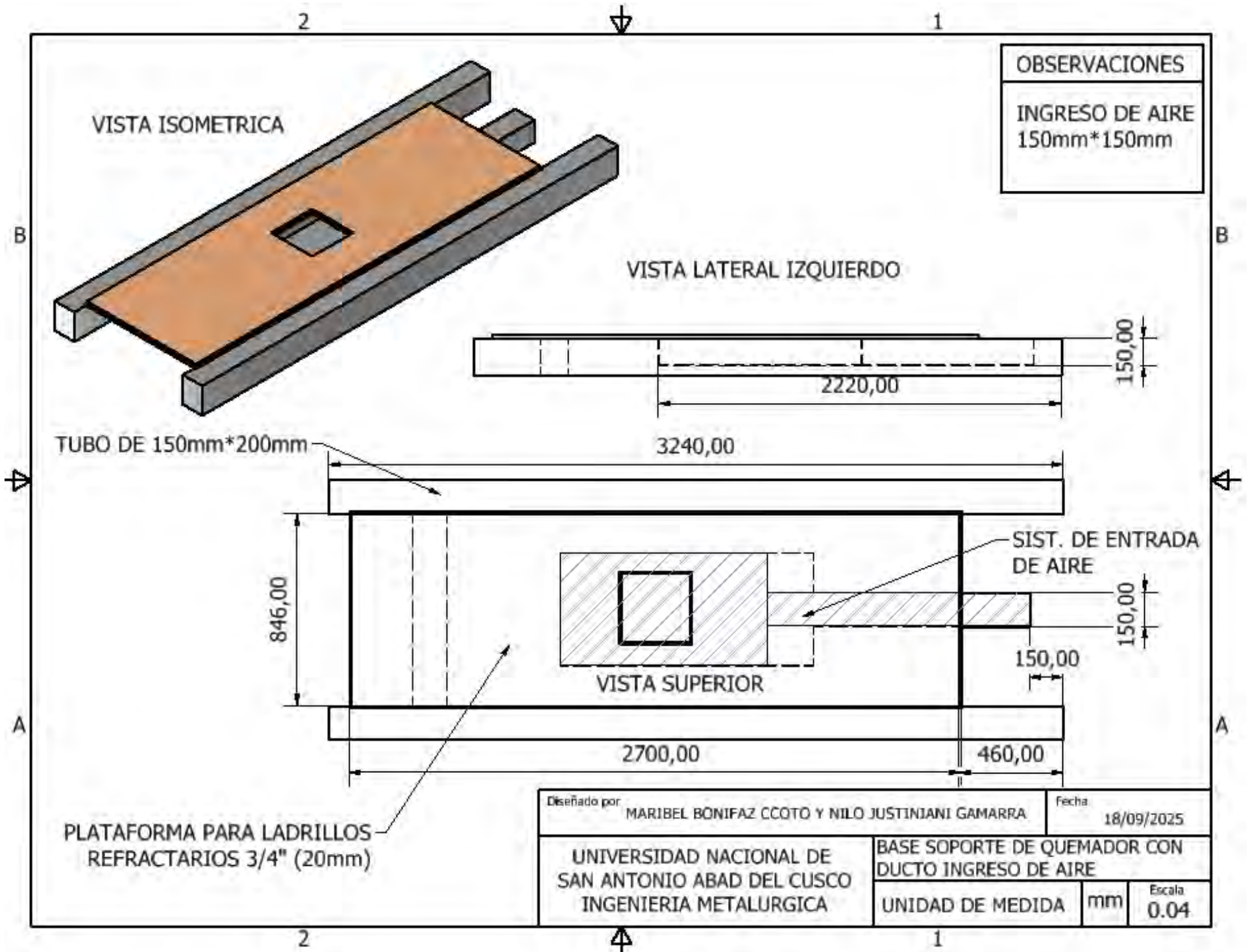


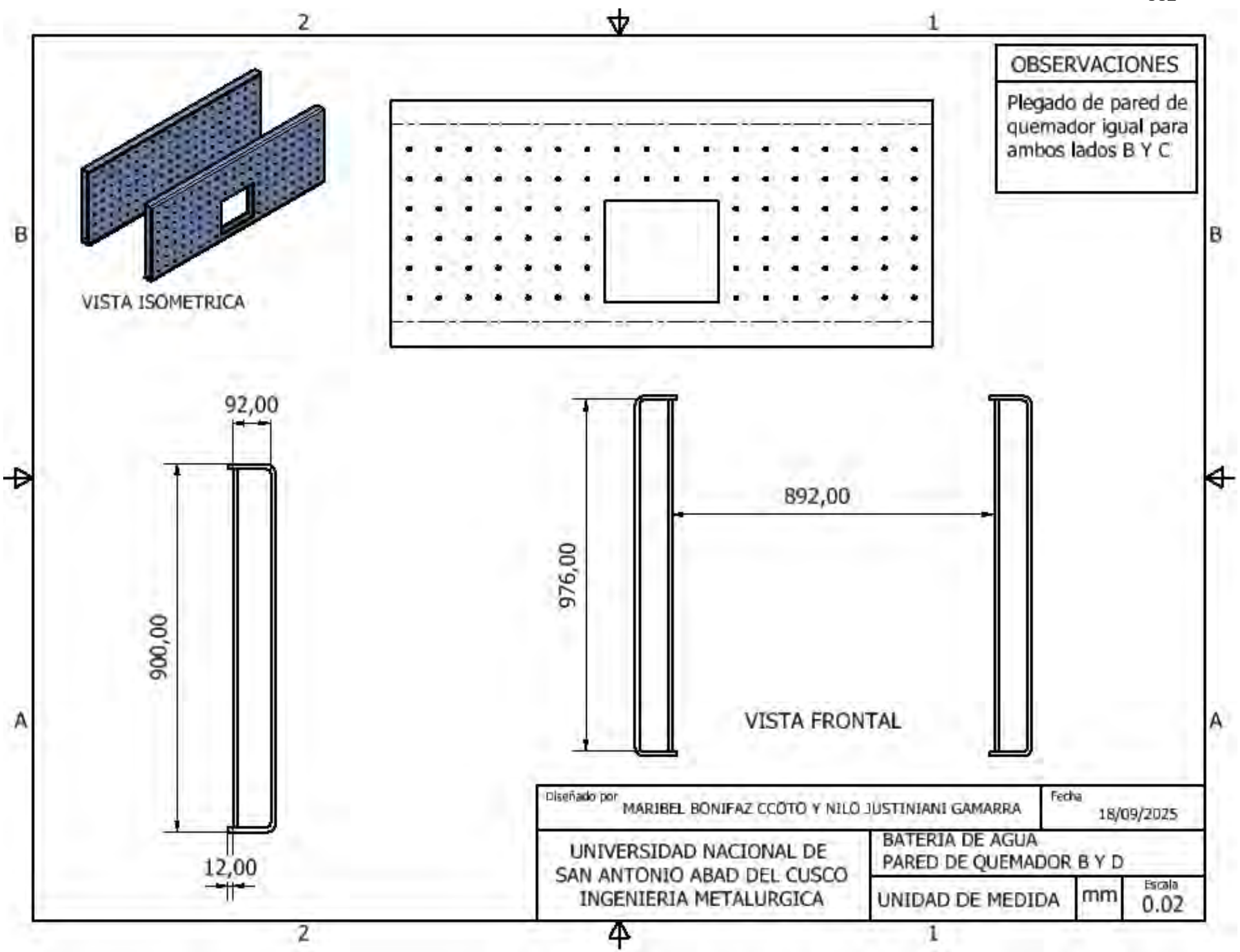


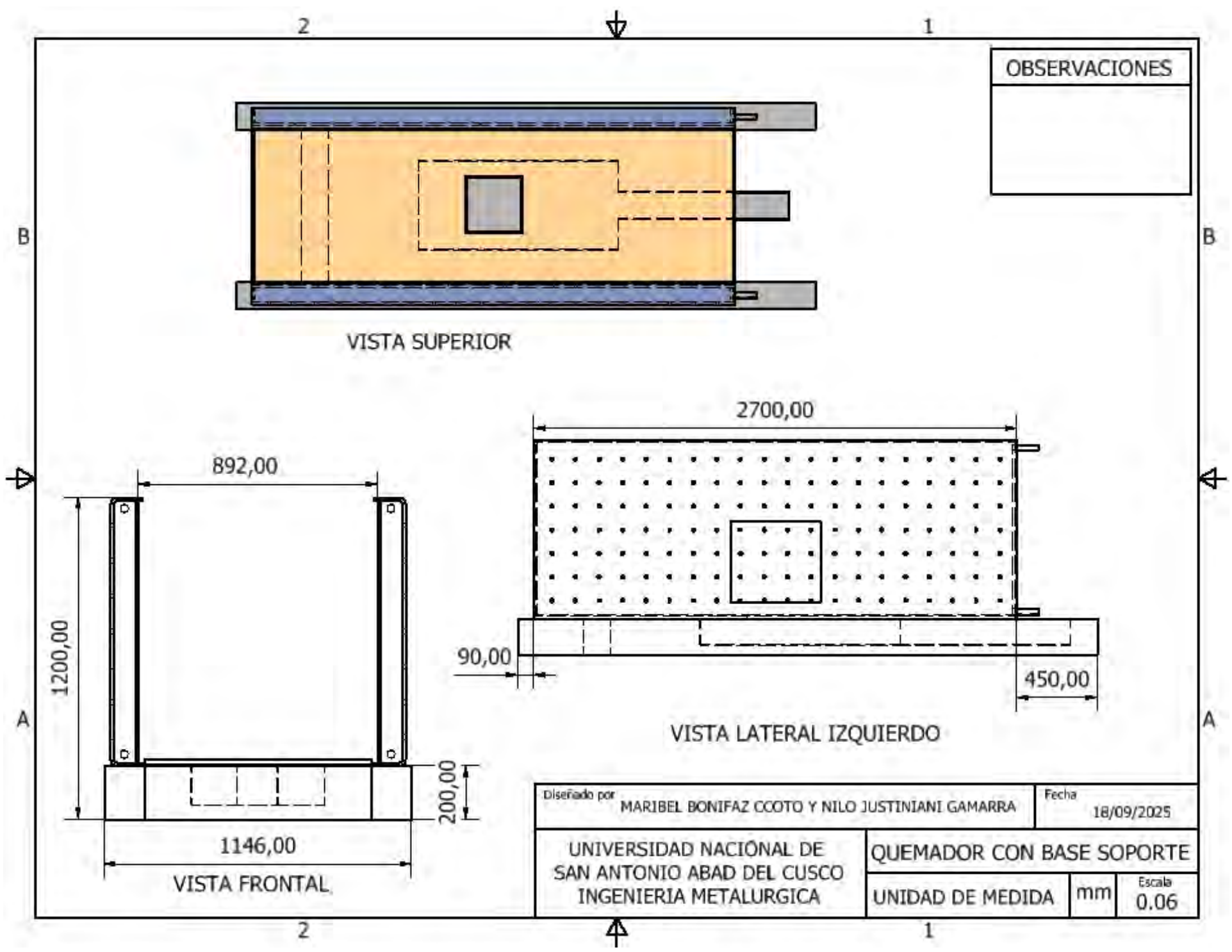
Diseñado por		MARIBEL BONIFAZ CCOTO Y NILO JUSTINIANI GAMARRA		Fecha	18/09/2025
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO			QUEMADOR DE BIOMASA		
INGENIERIA METALURGICA			UNIDAD DE MEDIDA	mm	Escala 0.05

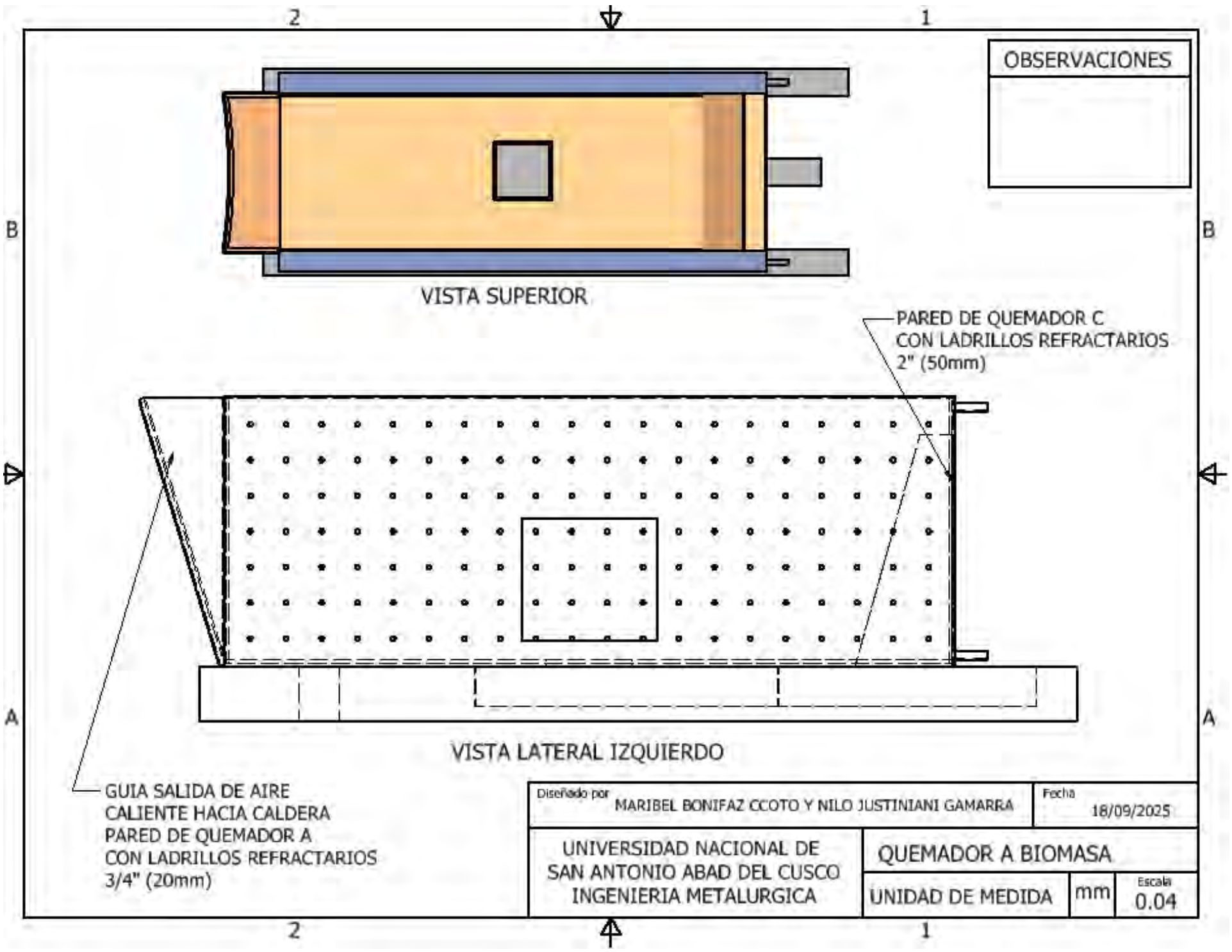


Diseñado por		MARIBEL BONIFAZ CCOTO Y NILO JUSTINIANI GAMARRA		Fecha		18/09/2025	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO INGENIERIA METALURGICA				QUEMADOR DE BIOMASA			
				UNIDAD DE MEDIDA		mm	Escala









OBSERVACIONES

GUIA SALIDA DE AIRE
CALIENTE HACIA CALDERA
PARED DE QUEMADOR A
CON LADRILLOS REFRACTARIOS
3/4" (20mm)

Diseñado por MARIBEL BONIFAZ CCOTO Y NILO JUSTINIANI GAMARRA		Fecha 18/09/2025	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO INGENIERIA METALURGICA		QUEMADOR A BIOMASA	
		UNIDAD DE MEDIDA	mm Escala 0.04