

ESTUFA DE GASIFICACIÓN TIPO COHETE

JUAN CAMILO CARDENAS RUBIO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2020

ESTUFA DE GASIFICACIÓN TIPO COHETE

JUAN CAMILO CARDENAS RUBIO

Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico

Director

JABID EDUARDO QUIROGA MENDEZ

Ingeniero mecánico, PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

A Dios, porque está siempre a mi lado bendiciéndome, amándome y motivándome a seguir en su camino, por las personas que pusiste para dejar en mí una huella y que ayudaron en mi crecimiento personal.

A mi madre NUBIA RUBIO, por ser mi modelo de esfuerzo y dedicación, por siempre confiar en mi e impulsarme a cumplir mis sueños, por decirme siempre lo que necesito escuchar y por guiarme a ser la persona que soy hoy.

A mi padre BERNARDO CARDENAS, por ser ese hombre ejemplar y comprometido con su familia, por enseñarme el valor de la responsabilidad y la importancia de entregarnos a Dios frente a cualquier situación de la vida.

A mi hermana ADRIANA CARDENAS, por ser ese apoyo incondicional en la distancia, por los mensajes que me inspiraron a seguir luchando y así culminar mi formación profesional.

A mis amigos OSCAR MANTILLA y ANDREA PAREDES, a quienes hoy puedo llamar como hermanos y que con su presencia, hicieron de este un camino más divertido y valioso.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por haberme permitido pertenecer a esta alma mater y ofrecerme una excelente formación académica. Doy gracias a mis profesores que con su dedicación y esfuerzo, transmitieron los conocimientos necesarios para culminar esta etapa.

Expreso agradecimiento al profesor Jabid Eduardo Quiroga Mendez ingeniero mecánico y director del proyecto de grado, por su asesoría y ayuda prestada durante el desarrollo de este trabajo.

A los compañeros y amigos por su apoyo incondicional, y aquellas otras personas que de una u otra forma contribuyeron al cumplimiento de este proceso.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. MARCO TEORICO	22
4.1 PROCESO DE GASIFICACIÓN	22
4.2 COMBUSTIÓN DE BIOMASA	23
4.3 ESTUFAS GASIFICADORAS.....	24
4.3.1 Estufa tipo cohete	25
5. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA ESTUFA	27
5.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD (QFD)	27
5.1.1 Requerimientos del consumidor.....	27
5.1.2 Requerimientos técnicos.....	28
5.2 MATRIZ DE CALIDAD	29
5.3 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.....	30

5.3.1 Alternativa A.....	30
5.3.2 Alternativa B.....	31
5.3.3 Alternativa C	32
5.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	33
6. DISEÑO DE DETALLE	35
6.1 DISEÑO ESTRUCTURA DE LA ESTUFA	35
6.2 DISEÑO DE LA CHIMENEA	36
6.3 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	39
6.3.1 Generación de la malla	39
6.3.2 Criterio de calidad del mallado.....	42
6.3.3 Configuración de la simulación	44
6.3.4 Resultados y análisis	47
6.3.4.1 Comportamiento dinámico de los humos	47
6.3.4.2 Variación de la temperatura de los gases.....	49
6.4 SISTEMA DE AISLAMIENTO TÉRMICO.....	50
7. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	56
7.1 CONSTRUCCIÓN DEL HOGAR.....	56
7.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS DUCTOS	58
7.3 CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA	59
7.4 CONSTRUCCIÓN DEL CUBRIMIENTO DEL AISLATE	59
7.5 ENSAMBLE DE LA ESTUFA DE GASIFICACIÓN TIPO COHETE	61
8. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO WBT	62

8.1 ANALISIS DE RESULTADOS.....	64
9. MANUALES	66
9.1 MANUAL DE ENSAMBLE.....	66
9.2 MANUAL DE OPERACIÓN.....	67
9.3 MANUAL DE MANTENIMIENTO	68
10. PRESUPUESTO	69
11. CONCLUSIONES.....	70
12. RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS.....	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Combustión de biomasa.	24
Figura 2. Características básicas de un gasificador TLUD.	25
Figura 3. Estufa tipo cohete diseñada por Larry Winiarski.....	26
Figura 4. Estufa de gasificación tipo cohete con una entrada de alimentación de biomasa.	30
Figura 5. Estufa de gasificación tipo cohete con dos entradas de alimentación con cámaras de combustión separadas.	31
Figura 6. Estufa de gasificación tipo cohete con entrada de alimentación dual y una cámara de combustión central.	32
Figura 7. Ensamble de la estufa de gasificación tipo cohete.	35
Figura 8. Longitud en milímetros de las secciones de la chimenea.	38
Figura 9. Mallado automático de ANSYS.....	40
Figura 10. Número de elementos y nodos en el mallado automático de ANSYS. .	40
Figura 11. Mallado ajustado con la herramienta “ <i>body sizing</i> ”.	41
Figura 12. Número de elementos y nodos en el mallado ajustado.	41
Figura 13. Criterios de calidad de mallado recomendados por ANSYS.....	42
Figura 14. Gráfica estadística del factor de asimetría de los elementos del mallado.	43
Figura 15. Grafica estadística de la calidad ortogonal de los elementos del mallado.	44
Figura 16. Descripción general de los métodos de solución basados en la presión.	46
Figura 17. Velocidad de los humos a través de la estufa de gasificación tipo cohete.	48
Figura 18. Vista lateral del comportamiento dinámico de los gases.	48

Figura 19. Distribución de temperaturas de los humos a través de la estufa de gasificación tipo cohete.....	49
Figura 20. Temperatura de los humos a la salida de la chimenea.....	50
Figura 21. Zona de cálculos para el dimensionamiento del aislante.....	52
Figura 22. Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor.....	54
Figura 23. Cortes para la obtención de los segmentos del hogar.....	56
Figura 24. Segmentos que conforman el hogar.....	57
Figura 25. Soldadura para la unión de los segmentos que hacen parte del hogar.	57
Figura 26. Corte de las hornillas en los ductos.	58
Figura 27. Alineación de los ductos de las hornillas para ser soldados.....	58
Figura 28. Doblado de lámina para la obtención de la chimenea.	59
Figura 29. Lamina cortada lista para ser doblada.....	59
Figura 30. Obtención del protector del aislante en una maquina dobladora.....	60
Figura 31. Instalación del aislante alrededor de los ductos.	60
Figura 32. Ensamble de las diferentes partes que conforman la estufa.	61
Figura 33. Puesta en marcha para observar la existencia de posibles fugas.	61
Figura 34. Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición.	63
Figura 35. Indicadores de desempeño encontrados en el protocolo WBT.....	64
Figura 36. Ensamble de los ductos sobre el soporte y el hogar.....	66
Figura 37. Unión de los ductos con el hogar por medio de tornillos y tuercas.	67
Figura 38. Unión de la chimenea con los ductos de las hornillas.....	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados de la implementación del método de gestión de calidad QFD.	29
Tabla 2. Criterios de mayor relevancia en el método de gestión de calidad de una estufa de gasificación tipo cohete.....	33
Tabla 3. Evaluación de alternativas bajo los criterios más relevantes elegidos en la gestión de calidad (QFD).....	33
Tabla 4. Presupuesto.....	69

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Hoja de cálculo del protocolo WBT.	76
Anexo B. Propiedades térmicas de algunas aleaciones.	78
Anexo C. Propiedades del aire a 1 atm.	79
Anexo D. Planos de la estufa de gasificación tipo cohete.	80

RESUMEN

TITULO: ESTUFA DE GASIFICACIÓN TIPO COHETE*

AUTOR: JUAN CAMILO CARDENAS RUBIO**

PALABRAS CLAVE: BIOMASA, COMBUSTIÓN, ESTUFA TIPO COHETE, PROTOCOLO WBT.

DESCRIPCIÓN:

El uso de estufas tradicionales con deficientes sistemas de extracción de humos acarrear serios problemas de salud, tales como, EPOC (Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica), enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón. Se han realizado estudios por décadas para obtener estufas mejoradas que solucionen este problema.

Este trabajo tiene como objetivo diseñar y construir una estufa de combustión de biomasa de cuatro hornillas, que sea económica y segura para sus usuarios. Para garantizar su funcionamiento previo a la construcción, se realizó una simulación fluidodinámica de los gases al interior de la estufa, donde se recreó las condiciones ambientales, se consideraron las pérdidas de calor y se evidenció una correcta evacuación de los gases producto de la combustión a través de la chimenea, además, se calculó el espesor necesario del aislante para evitar quemaduras de los usuarios durante la operación. Posterior a esto, se ejecutó una prueba de ebullición de agua o protocolo WBT (por sus siglas en inglés) para determinar su potencia térmica y su eficiencia, y con esto, poder compararlos con otros diseños de estufas eficientes, permitiendo establecer si el modelo construido alcanza a ser considerado como una estufa mejorada. Para brindar una mayor seguridad al producto final, también se elaboró un manual de ensamble, operación y mantenimiento, con el fin de describir al operario las labores que debe seguir para garantizar un funcionamiento correcto.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez, Ingeniero mecánico PhD.

ABSTRACT

TITLE: ROCKET GASIFICATION STOVE*

AUTHOR: JUAN CAMILO CARDENAS RUBIO**

KEYWORDS: BIOMASS, COMBUSTION, ROCKET STOVE, WBT PROTOCOL.

DESCRIPTION:

The use of traditional stoves with poor smoke extraction systems lead to serious health problems, such as COPD (Chronic Obstructive Pulmonary Disease), cardiovascular diseases and lung cancer. Studies have been conducted for decades to obtain improved stoves that solve these problems.

This thesis aims to design and build a four-burner biomass combustion stove that is economical and safe for its users. To study its operation prior to construction, a fluid-dynamic simulation of the gases was carried out inside the stove, where the environmental conditions were recreated, the heat losses were considered and a proper evacuation of the gases produced from the combustion through the chimney was evidenced, in addition, the necessary thickness of the insulation layer was calculated to avoid skin burns from users during operation. After this, a water boiling test or WBT protocol was executed to determine its thermal power and its efficiency, and with this, be able to compare them with other efficient stove designs, allowing to establish if the model built can be considered as an improved stove. To provide greater safety to the final product, an assembly, operation and maintenance manual was also prepared, in order to describe to the operator the tasks that must be followed to guarantee correct operation.

*Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez, Ingeniero mecánico PhD.

INTRODUCCIÓN

Se estima que fue en torno al año 500.000 A.C. cuando se descubrió por primera vez el fuego, en el sentido de que se consiguió “domesticarlo” para mantenerlo y conservarlo¹; pero fue solo hasta en el siglo XVIII que se inventó la estufa propiamente, cuando Benjamín Franklin construyó a partir de hierro fundido una estufa que podía ser ubicada en el centro del hogar para suministrar calor a sus alrededores, aunque este dispositivo tenía un gran inconveniente, al ofrecer tanto calor, aumentaba el peligro de incendios. Fue hasta en un siglo más tarde que se solucionó este problema, al diseñar chimeneas más seguras que podían evacuar los humos de una forma más eficiente.²

Se han realizado estudios por décadas para obtener estufas de leña mejoradas, ofreciendo en la actualidad una gran variedad de opciones válidas. Muchas de ellas carecen de practicidad al poseer únicamente una hornilla, esto no resulta útil para la mayoría de hogares al momento de cocinar los alimentos, porque demandaría una gran cantidad de tiempo para hacerlo. Otras ofertas que ofrece el mercado con tamaños de estufa más adecuados para una familia promedio, presentan elevados costos de adquisición, por este motivo no resultan ser opciones viables para muchas personas y terminan adquiriendo estufas de leña tradicionales a pesar de no garantizar una operación segura y adecuada, ya que presentan problemas en la evacuación de los gases de combustión, acarreando serios problemas de salud a largo plazo.

¹ DPM ESPECIALIDADES. Historia de las cocinas de leña. [En línea]. (Recuperado el 25 de agosto de 2020). Disponible en: <http://dpmespecialidades.es/historia-de-las-cocinas-de-leña/>.

² CARBEL. Historia de la chimenea. [En línea]. (Recuperado el 25 de agosto de 2020). Disponible en: <https://carbel.net/historia-la-chimenea/>.

Con el fin de generar una mejor calidad de vida en muchos hogares colombianos que dependen de la quema de biomasa para la preparación de sus alimentos, se aporta desde la ingeniería mecánica con este proyecto, una alternativa de estufa de leña que sea económicamente viable, practica y de uso seguro para los usuarios.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, cerca de 3000 millones de personas usan combustibles sólidos como base para el funcionamiento de sistemas de calefacción y cocción de alimentos; esto se debe en gran medida, a los altos costos relacionados con el uso de fuentes energéticas alternativas y la difícil consecución de las mismas.³

Según un informe del Ministerio de Minas realizado en agosto del año anterior, el 11% de los hogares colombianos utilizan leña como fuente de energía para estufas, hornos y chimeneas⁴; lo que nos indica que el uso de este combustible continúa siendo una alternativa viable, soportándose en su costo reducido, fácil obtención, costumbres arraigadas y preservación cultural.

El uso de fogones de leña tradicionales que no cuentan con un diseño adecuado en la extracción de humos, puede aumentar la concentración del material particulado hasta niveles superiores a los recomendados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; generando así, graves problemas en la salud de las personas expuestas, tales como, EPOC (Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica), infecciones respiratorias agudas, enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón.⁵

³ Organización Mundial de la Salud. Contaminación del aire de interiores y salud. 08 de mayo 2018. [En línea]. (Recuperado el 04 de octubre de 2019). Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.

⁴ C. R. Hayes, P. C. Rey, M. Lucia, and T. Giraldo, "Memorias al Congreso de la República, Ministerio de Minas y Energía," 2019.

⁵ J. R. Pérez Padilla, J. Regalado Pineda, and A. O. Morán Mendoza. La inhalación doméstica del humo de leña y otros materiales biológicos. Un riesgo para el desarrollo de enfermedades respiratorias. Vol. 135, no. 1, pp. 20-25, 1999.

La combustión producida en el interior de las estufas de leña convencionales, se presenta con mucha frecuencia de manera incompleta; esto se debe, al pobre mecanismo de admisión de comburente (oxígeno) que estos sistemas equipan. Esta combustión incompleta se traduce en una disminución considerable en la eficiencia de la estufa, implicando que el combustible (leña) no sea aprovechado en su totalidad y permitiendo la formación de gases indeseables como el Monóxido de Carbono (CO), Óxido de Nitrógeno (N₂O), entre otros.

Con el fin de contrarrestar estas problemáticas, surge la necesidad de diseñar y construir un sistema que sea superior en términos de eficiencia y seguridad, permitiendo así, un ahorro considerable en combustible y un entorno más limpio en las viviendas campestres.

2. JUSTIFICACIÓN

Las estufas de leña tradicionales no proporcionan un ambiente de operación adecuado para las personas, debido a que la exposición prolongada a los gases derivados produce enfermedades respiratorias severas. Según estudios realizados por investigadores de la Asociación Médica Brasileira, el 26% de un grupo de 160 mujeres expuestas por más de 10 años a estufas de leña con diseños deficientes de extracción de humos de combustión, fueron diagnosticadas con EPOC, las 117 mujeres restantes, presentaron algunos síntomas característicos de las etapas tempranas de esta enfermedad, como tos crónica, jadeo y esputo.⁶

Una estufa de gasificación tipo cohete funciona de forma eficiente debido a que su combustión es casi completa, disminuyendo así, en un 46% las emisiones de material particulado (hollín, carbón negro y polución de aire). Además, aprovecha una gran cantidad de gases formados por la madera en el proceso de combustión, que permite aumentar el rendimiento y reduciendo el consumo de combustible en un 33%, en la emisión de monóxido de carbono (CO) en 75% y del Óxido de Nitrógeno (N₂O) hasta un 90%.⁷

El diseño tipo cohete presenta varias ventajas en comparación con las estufas de leña convencionales, donde se logra destacar la simplicidad de su operación, fundamentada en un sistema de alimentación automático de leña durante la

⁶ M. Auxiliadora, C. Moreira, M. A. Barbosa, J. R. Jardim, M. C. C. A. M. Queiroz, and L. U. Inácio, "Original article Chronic obstructive pulmonary disease in women exposed to wood stove smoke q Maria Auxiliadora Carmo Moreira a, Maria Alves Barbosa b, José R. Jardim c," *Rev Assoc Med Bras*, vol. 59, no. 6, pp. 607–613, 2013.

⁷ Delgado-García, R., Velasco-Roldáb, L., Onofa-Cuichán, E. & Armas-Figueroa, E. Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomásas de reducido poder calorífico. *DYNA* 83 (199) pp. 183-190.

combustión, donde el leño desciende por gravedad a través de un conducto al momento de consumirse, permitiendo garantizar un flujo continuo durante la operación prolongada de la estufa.

Durante el desarrollo de este trabajo se busca realizar el proceso de diseño y construcción de una estufa de gasificación tipo cohete que dé respuesta a la necesidad de muchos campesinos colombianos, cumpliendo con las correspondientes medidas de seguridad, así como con las normas referentes al desarrollo de un equipo de uso doméstico, y que sirva como suplente confiable para las estufas de leña convencionales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con el desarrollo de la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander aplicando los conocimientos adquiridos en el diseño y construcción de una estufa de gasificación tipo cohete.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una estufa de gasificación tipo cohete con sus respectivos planos de construcción y de ensamble, teniendo en cuenta:
 - Dimensiones que garanticen estabilidad.
 - Selección de materiales adecuados para su construcción.
 - Cálculos de esfuerzos de compresión mecánica y de expansión térmica usando la teoría de resistencia de materiales.
 - Determinación del sistema de aislamiento térmico más conveniente basado en una relación costo-beneficio.

- Evaluar y comparar la influencia del uso de una y dos entradas de biomasa en el flujo de gases, comprobando su correcta evacuación a través de los ductos y la chimenea, para esto se trabajará como si fuera aire caliente sin tener en cuenta el proceso de combustión en un programa de simulación dinámica computacional de fluidos (CFD).

- Construir una estufa de gasificación tipo cohete de cuatro hornillas de tamaños estandarizados con puertos de alimentación que garanticen un

funcionamiento continuo y que permita una buena distribución de la energía entre las hornillas.

- Evaluar experimentalmente el desempeño de la estufa de gasificación tipo cohete observando posibles pérdidas de energía, correcta evacuación de gases de combustión, dimensionamiento apropiado de los ductos de alimentación, observación del color y tamaño de la llama en el hogar, y finalmente determinar su potencia térmica en cada una de las hornillas usando la prueba de ebullición de agua o protocolo WBT (por sus siglas en inglés).
- Elaboración del manual de ensamble, operación y mantenimiento correspondiente de la estufa de gasificación tipo cohete propuesta.

4. MARCO TEORICO

4.1 PROCESO DE GASIFICACIÓN

Es un proceso termoquímico que convierte la biomasa solida (madera, carbón, residuos de agricultura, entre otros) en una mezcla de gases combustibles bajo condiciones de alta temperatura y en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua, etc.).⁸

Dependiendo del tipo de gasificante, los gasificadores pueden ser:

- Gasificador con aire: este tipo de gasificador genera un gas pobre con un poder calorífico no mayor del 25% del poder que tiene el gas natural.
- Gasificador con oxígeno: El gas de síntesis tiene mayor calidad que el formado en el caso anterior, su poder calorífico se encuentre en el 25% y el 40% del poder calorífico del gas natural.
- Gasificador con vapor de agua: el gas formado se encuentra enriquecido en hidrógeno y en monóxido de carbono, y se destina fundamentalmente para la síntesis de compuestos, como el amoníaco y el metanol.
- Gasificador con hidrógeno: el gas generado tiene un poder calorífico importante y se puede destinar a las mismas aplicaciones que el gas natural.

⁸ CEUPE. ¿Qué es la gasificación? [En línea]. (Recuperado el 24 de agosto de 2020). Disponible en: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-gasificacion.html#:~:text=La%20gasificaci%C3%B3n%20es%20un%20proceso,unos%20niveles%20de%20ox%C3%ADgeno%20restringidos>.

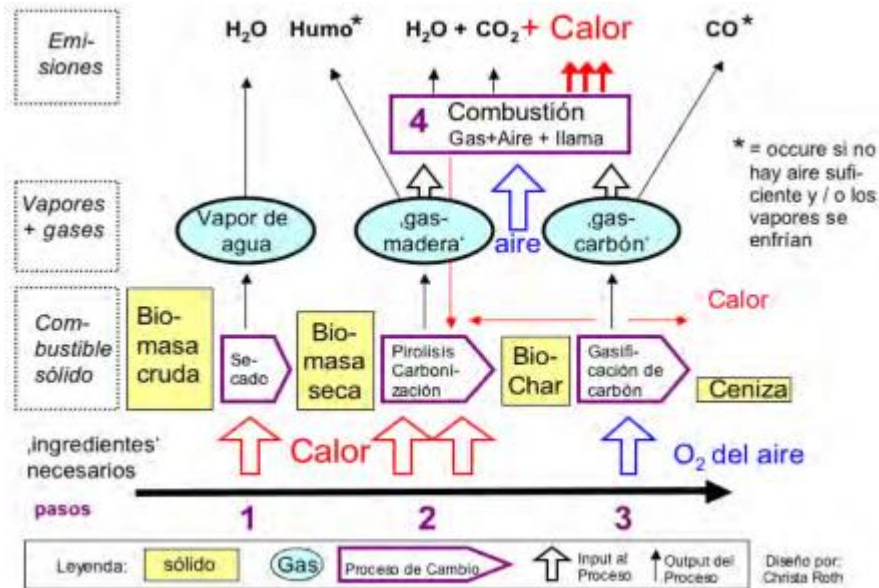
4.2 COMBUSTIÓN DE BIOMASA

Las etapas que sigue la biomasa para su combustión son las siguientes:

- Secado: El primer cambio ocurre durante el secado del combustible, la humedad de este determina la cantidad de energía necesaria para evaporar todo su contenido de agua.
- Pirolisis o carbonización: Las temperaturas elevadas y el calor absorbido causan una descomposición total de la biomasa que se divide en gases y vapores volátiles, dejando atrás carbón sólido. La pirolisis puede ocurrir en la ausencia total de oxígeno, el factor de regulación es el calor.
- Gasificación de carbón: Los átomos de carbono se convierten en gases oxidados (monóxido de carbono y dióxido de carbono) dejando atrás la parte sólida, lo que llamamos ceniza. Este paso solo ocurre en la presencia de oxígeno siempre y cuando el carbón esté caliente.
- Combustión del gas: La etapa final sucede cuando los gases son quemados y la mayor parte de calor útil es liberada, la cual puede ser utilizada para calentar un recinto o para cocinar. El principal factor regulador de la combustión es la cantidad de oxígeno mezclado con los vapores y gases calientes.

En la figura 1 se describe el proceso completo de la combustión de biomasa.

Figura 1. Combustión de biomasa.



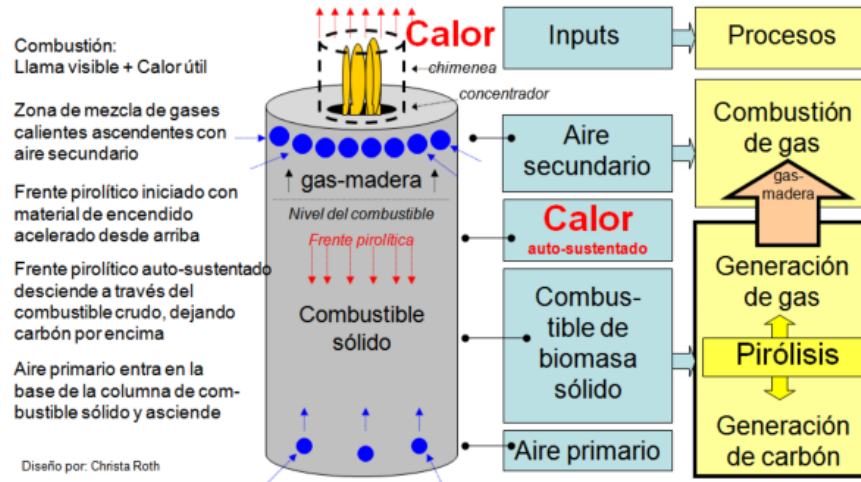
Fuente: Roth, 2011.

4.3 ESTUFAS GASIFICADORAS

Son gasificadores lo suficientemente pequeños como para ser utilizados en un hogar. En 1985 el Dr. Thomas B. Reed conceptualizó en los EE. UU el proceso de micro-gasificación como encendido por arriba con tiro natural hacia arriba (top-lit up-draft = TLUD). Estos gasificadores pueden crear biocarbón con un frente pirolítico y un suministro restringido de aire, el carbón creado se acumula ya que su conversión en ceniza es imposible por la falta de oxígeno⁹, este puede ser usado para fines térmicos o fines agrícolas, ya que es utilizado como abono para mejorar las condiciones del suelo. En la figura 2 se describe el funcionamiento de una estufa TLUD.

⁹ Roth C. Micro-gasificación: Cocinar con gas procedente de la biomasa sólida y seca. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.pp 10-20, 2011.

Figura 2. Características básicas de un gasificador TLUD.



Fuente: Roth, 2011.

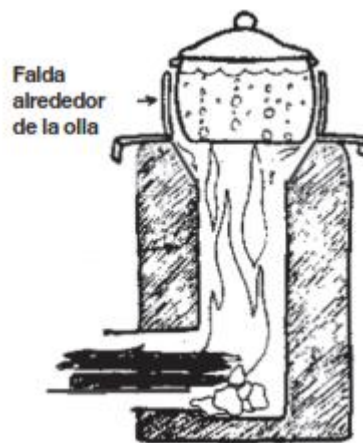
Los microgasificadores ofrecen excelentes ventajas para el uso como estufa y/o para la calefacción doméstica, ya que son capaces de quemar el gas sin producir humos a diferencia de la quema convencional de combustible sólido, además, utiliza una amplia variedad de biomasa sólida y proporciona una llama caliente y constante poco después del encendido (no hay que esperar, como ocurre con el carbón vegetal).

4.3.1 Estufa tipo cohete

El Dr. Larry Winiarski comenzó el desarrollo de la estufa cohete en 1980 basado en una estufa de VITA, diseñado por Sam Baldwin; su propósito es obtener la mayor cantidad de energía posible del combustible convertido en calor útil. No está destinada a producir carbón vegetal o biocarbón. Los diseños de este tipo de

gasificadores consideran tanto la eficiencia de combustión como la eficiencia de transferencia de calor. Una característica clave de estas estufas es que el combustible se dosifica fácilmente de modo que solo se calienta la superficie necesaria para la producción de energía, esto significa que solo los extremos de la biomasa se gasifican y se queman en la cámara de combustión vertical.¹⁰

Figura 3. Estufa tipo cohete diseñada por Larry Winiarski.



Fuente: https://issuu.com/ecoaldeas/docs/construyendo_cocinas_eficientes/8.

¹⁰ WINIARSKI, Larry. Combustion and heat transfer in a rocket stove system. [En línea]. (Recuperado el 24 de agosto de 2020). Disponible en: http://ethoscon.com/pdf/ETHOS/ETHOS2012/SatAM/Winiarski_HeatTransfer_RocketStoveSystem.pdf.

5. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA ESTUFA

Para darle solución al problema, se recopiló información para hallar los factores más relevantes que se presentan en la actualidad, para así dar inicio al diseño y construcción de una estufa de gasificación tipo cohete.

5.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD (QFD)

5.1.1 Requerimientos del consumidor

Los requerimientos que tienen los clientes son:

- Tamaño moderado
- Bajo consumo de energía
- Facilidad de operación
- Fácil mantenimiento
- Larga vida
- Buena extracción de humos
- Repuestos económicos
- Seguridad
- Cantidad de hornillas
- Movilidad
- Bajo precio del producto
- Soporte técnico
- Fácil extracción de cenizas
- Fácil alimentación
- Baja producción de material particulado

5.1.2 Requerimientos técnicos

Los requerimientos técnicos planteados fueron:

- Capacidad
- Tamaño
- Potencia térmica
- Mantenibilidad
- Precio
- Sistema de extracción de humos
- Materiales de construcción
- Seguridad
- Mecanismo de combustión
- Vida útil
- Sistema de aislamiento térmico
- Manufactura
- Repuestos
- Cantidad de hornillas
- Estética

5.2 MATRIZ DE CALIDAD

Tabla 1. Resultados de la implementación del método de gestión de calidad QFD.

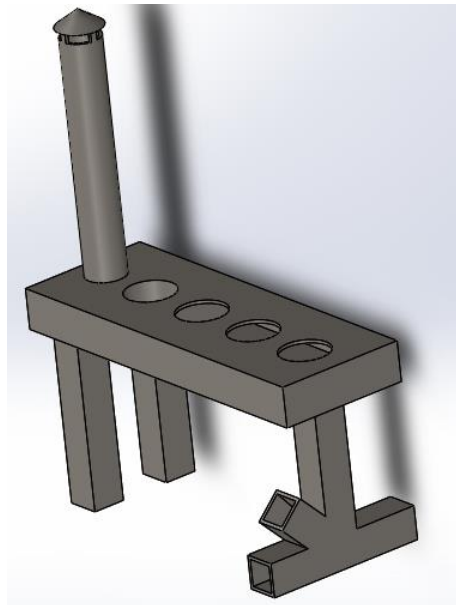
Requerimientos de clientes	Requerimientos técnicos															
	Capacidad de trabajo	Tamaño	Potencia térmica	Mantenibilidad	Precio	Sistema de extracción de humos	Materiales de construcción	Seguridad	Mecanismo de combustión	Vida útil	Sistema de aislamiento térmico	Manufactura	Repuestos	Cantidad de hornillas	Estética	
Tamaño moderado	3	3	10	1	1	3	1	1	0	0	0	3	3	0	10	3
Bajo consumo de biomasa	12	1	0	10	0	3	1	0	0	10	0	10	0	0	0	0
Facilidad de operación	10	3	1	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Fácil mantenimiento	5	0	3	0	10	1	1	0	0	0	0	3	3	0	0	0
Larga vida	8	0	0	0	3	3	0	10	0	0	10	3	1	3	0	0
Buena extracción de humos	14	0	0	0	0	3	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0
Repuestos económicos	4	0	0	0	3	0	0	1	0	0	3	3	0	10	0	0
Seguridad	7	0	0	0	0	0	3	3	10	0	0	10	0	0	3	0
Cantidad de hornillas	13	3	3	10	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	10	0
Movilidad	2	1	3	0	0	3	0	1	0	0	0	0	3	0	0	1
Bajo precio del producto	11	3	3	3	1	10	1	3	0	1	3	3	3	0	3	3
Soporte técnico	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fácil extracción de cenizas	6	0	3	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fácil alimentación	9	3	1	0	0	1	0	0	1	3	0	0	0	0	0	1
Baja producción de material particulado	15	0	0	0	0	3	3	0	10	3	0	0	0	0	10	0
	152	160	286	107	374	237	143	399	203	125	283	110	79	364	53	

Se implementó un método de gestión de calidad para el diseño de una estufa de gasificación tipo cohete, basada en una lista de requerimientos técnicos que se compararon a los planteados por los clientes, asignándoles valores entre 0 y 10, este último como valor máximo, que al multiplicarse por la relevancia que tienen suman un puntaje que permite determinar los criterios más importantes a tener en cuenta en el desarrollo del equipo.

5.3 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

5.3.1 Alternativa A

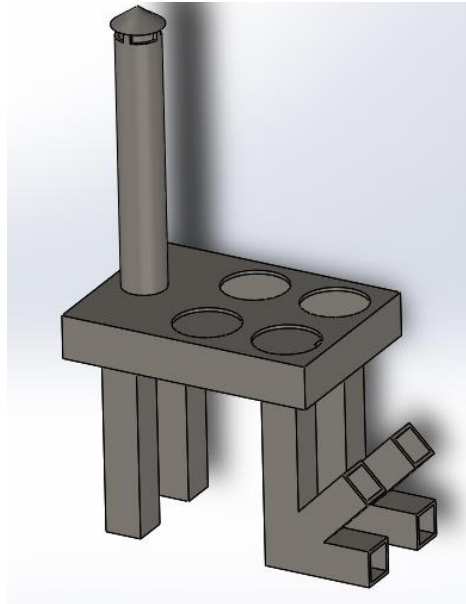
Figura 4. Estufa de gasificación tipo cohete con una entrada de alimentación de biomasa.



Estufa de gasificación tipo cohete de cuatro hornillas distribuidas en serie, cuenta con una entrada de alimentación de biomasa, una cámara de combustión donde los gases producidos pasan a través de un ducto hasta llegar a la chimenea; cada hornilla dispone de cantidades diferentes de energía para el proceso de transferencia de calor.

5.3.2 Alternativa B

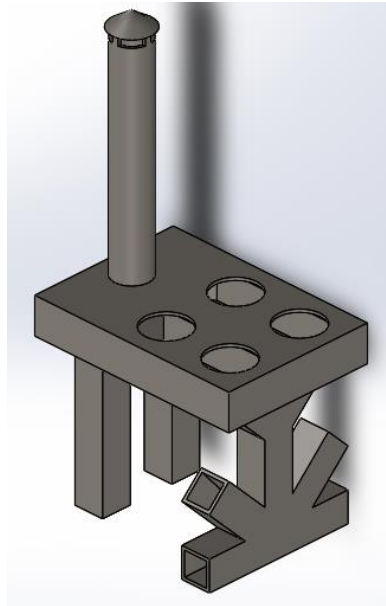
Figura 5. Estufa de gasificación tipo cohete con dos entradas de alimentación con cámaras de combustión separadas.



Estufa de gasificación tipo cohete de cuatro hornillas distribuidas en un arreglo dos por dos (2x2), la cual esta diseñada con dos líneas que trabajan en paralelo y de forma independiente en el proceso de combustión y de transferencia de calor en cada par de hornillas, cada línea cuenta con una entrada de alimentación de biomasa y ductos para los gases de combustión, los cuales son evacuados a través de la misma chimenea. La estufa dispone de un aislamiento con el fin de maximizar su eficiencia termica.

5.3.3 Alternativa C

Figura 6. Estufa de gasificación tipo cohete con entrada de alimentación dual y una cámara de combustión central.



Estufa de gasificación tipo cohete de cuatro hornillas distribuidas en un arreglo dos por dos (2x2), cuenta con una cámara de combustión con doble entrada de biomasa con el fin de aumentar su potencia térmica y su autonomía, los gases pasan a través de unos ductos que permiten la transferencia de calor en las hornillas para luego ser expulsados por medio de la chimenea; las dos primeras hornillas disponen de una mayor cantidad de energía para el intercambio de calor debido a su proximidad con la cámara de combustión. Además de esto, la estufa dispone de un aislamiento térmico que permite maximizar la eficiencia de la estufa a un bajo costo.

5.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Tabla 2. Criterios de mayor relevancia en el método de gestión de calidad de una estufa de gasificación tipo cohete.

CRITERIO	VALOR	PORCENTAJE (%)
Seguridad	399	23
Precio	374	22
Cantidad de hornillas	364	21
Potencia térmica	286	17
Sistema de aislamiento térmico	283	17
	1796	100

Se seleccionaron cinco criterios que obtuvieron mayores puntajes en el despliegue de la función calidad, asignándole un porcentaje de equivalencia sobre la importancia que tienen en la selección de una estufa de gasificación.

Tabla 3. Evaluación de alternativas bajo los criterios más relevantes elegidos en la gestión de calidad (QFD).

		Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C	
		Nota	Ponderación	Nota	Ponderación	Nota	Ponderación
Seguridad	23	3,5	0,81	4,0	0,92	4,0	0,92
Precio	22	4,5	0,99	3,5	0,77	4,0	0,88
Cantidad de hornillas	21	4,5	0,95	4,5	0,95	4,5	0,95
Potencia térmica	17	3,0	0,51	4,0	0,68	4,5	0,77
Sistema de aislamiento térmico	17	1,0	0,17	4,0	0,68	4,0	0,68
Total	100	3,42		4,00		4,19	

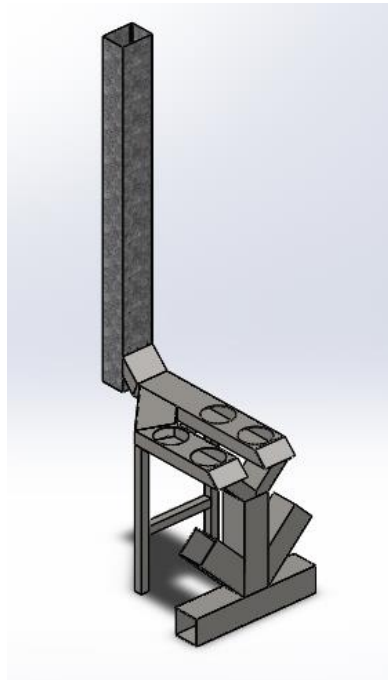
Después de hacer la respectiva evaluación de las alternativas elegidas para el desarrollo de una estufa de gasificación tipo cohete, la alternativa ganadora fue la de doble entrada de alimentación con una sola cámara de combustión, la cual hace referencia a la tercera opción planteada. Este diseño fue elegido debido a su gran versatilidad y eficiencia, al poseer una cámara de combustión con doble entrada de biomasa puede llegar a ofrecer una potencia térmica mayor en comparación a las alternativas A y B, por otro lado, la alternativa C es la opción que ofrece una mayor relación costo-beneficio, lo cual es un factor fundamental para los clientes directos del producto.

6. DISEÑO DE DETALLE

6.1 DISEÑO ESTRUCTURA DE LA ESTUFA

El prototipo de la estufa posterior a la fase de diseño se muestra en la figura 7. Luego del planteamiento de las alternativas, surgieron algunas modificaciones al modelo elegido, esto se debe a las sugerencias de diseñadores de ductos de evacuación de humos, ellos especifican que bajo ningún concepto es aconsejable dar inclinaciones superiores a 45° a los tubos por donde pasan los gases de combustión, ya que esto generaría una turbulencia indeseada y aumentaría la resistencia en el flujo, y en el peor de los casos, podría ahogar la llama en el hogar.

Figura 7. Ensamble de la estufa de gasificación tipo cohete.



Para corregir el problema del cambio en la dirección de los humos, el cual era de 90°, se hizo un corte a 45° en los ductos que están sobre el hogar, esto direccionará los humos de una forma más eficiente. Además, se acopló un conducto a 45° entre la sección de las hornillas y la chimenea, disminuyendo así las turbulencias que podrían formarse. Esto se evaluó por medio de una simulación fluidodinámica que está expuesta en una sección posterior, donde se obtuvieron excelentes resultados con la modificación planteada.

Las dimensiones de los tubos utilizados en la estructura de la estufa están sujetos a la disponibilidad que se tienen en la ciudad de Bucaramanga, los espesores de los elementos seleccionados están sobredimensionados desde el punto de vista de la resistencia de materiales, pero desde el ámbito económico es mucho más favorable usar tubos prefabricados a pesar de sus grandes espesores que construirlos a partir de una lámina de un calibre más bajo.

6.2 DISEÑO DE LA CHIMENEA

El aire necesario para la combustión en el hogar proviene de modo natural del tiro que ejerce la chimenea, este tiro se consigue aprovechando el efecto de empuje de Arquímedes que sufren los gases calientes al estar rodeados por otros más fríos; este empuje se puede calcular por la diferencia de densidades del aire exterior y de los gases de combustión, y es más intenso cuanto mayor sea la altura de la chimenea. Este elemento también tiene por misión evacuar los gases de la combustión para evitar que estos se acumulen en la vivienda, garantizando así un uso seguro de la estufa. La temperatura de salida de los humos en la chimenea debe estar sobre los 100°C, esto para garantizar una correcta evacuación y para evitar chimeneas excesivamente largas.

Para que una chimenea tire bien, la depresión de la misma debe estar en torno de 10 a 12 pascales, valor recomendado por fabricantes, y se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$t = g * H * (\rho_a - \rho_h) [Pa]$$

Donde:

t: Tiro natural

g: Fuerza de gravedad (9,81 m/s²)

H: Altura eficaz (distancia vertical entre la salida de humos del hogar y la boca de salida de la chimenea)

ρ_a : Densidad del aire exterior (kg/m³)

ρ_h : Densidad promedio de los humos (Kg/m³)

Con la ecuación anterior se procede a encontrar la altura que debe tener la chimenea para una depresión de 11 pascales, valor intermedio al recomendado, para esto tomamos una temperatura exterior de 26,85°C y una presión atmosférica de 90 kPa (presión atmosférica de Bucaramanga), y para los humos se promedió la temperatura que tienen en la salida del hogar y la salida de la chimenea, 300°C y 100°C respectivamente, obteniendo así un valor de 200°C.

Datos

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$T_{\text{aire}} = 26,85 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$P = 90 \text{ [kPa]}$$

$$T_{\text{humos}} = 200 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t = 11 \text{ [Pa]}$$

Calculos

$$\rho_a = \rho (\text{Air}_{ha}; T = T_{\text{aire}}; P = P)$$

$$\rho_h = \rho (\text{Air}_{ha}; T = T_{\text{humos}}; P = P)$$

$$t = g \cdot H \cdot [\rho_a - \rho_h]$$

Con estas condiciones se obtuvieron los siguientes resultados.

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$H = 2,932 \text{ [m]}$$

$$P = 90 \text{ [kPa]}$$

$$\rho_a = 1,045 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_h = 0,6627 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

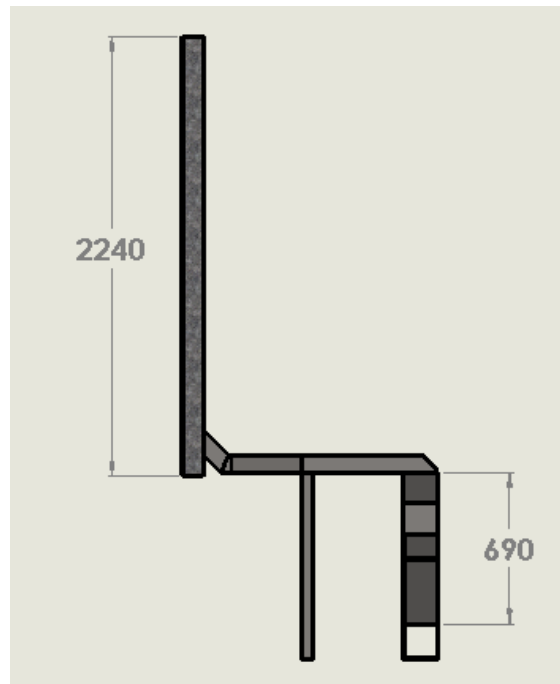
$$t = 11 \text{ [Pa]}$$

$$T_{\text{aire}} = 26,85 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{\text{humos}} = 200 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Se encontró que la altura eficaz de la chimenea debe ser de 2,93 m, la cual está distribuida en dos secciones separadas, la primera está ubicada sobre el hogar y cuenta con una longitud de 0,69 m, por consiguiente, el segmento final de la chimenea debe ser de 2,24 m.

Figura 8. Longitud en milímetros de las secciones de la chimenea.



6.3 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Con los datos recopilados y calculados anteriormente se procede con el análisis de transferencia de calor para obtener la distribución de temperaturas a lo largo de la estufa, y para observar si los humos salen de la chimenea cumpliendo con las condiciones planteadas en el diseño, es decir, si su temperatura está sobre los 100°C; para esto se tomaron en cuenta trabajos realizados con la herramienta computacional ANSYS WORKBENCH desarrollados en esta área de simulación. Se decidió el uso de este programa porque cuenta con un módulo apropiado para el estudio, Fluid Flow (Fluent), es un software de simulación líder en la industria que se utiliza para predecir el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas y otros fenómenos relacionados, además es conocido por ofrecer las soluciones más precisas de la industria.¹¹

6.3.1 Generación de la malla

Utilizando la opción de mallado automático que ofrece el programa, se obtiene una malla como la que se muestra en la figura 9.

En la figura 10 se muestra en detalle las propiedades del mallado que realiza ANSYS de forma automática, con este método se obtienen 16,450 elementos tetraédricos de 4 nodos y hexaédricos de 8 nodos compartidos por elemento y un total de 4,383 nodos.

¹¹ ANSYS. Ansys Fluent: Fluid simulation software. [En línea]. (Recuperado el 20 de agosto de 2020). Disponible en: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.

Figura 9. Mallado automático de ANSYS.

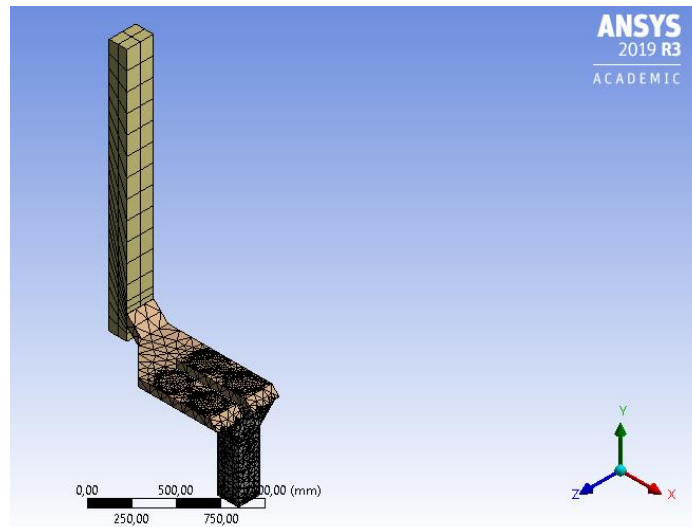
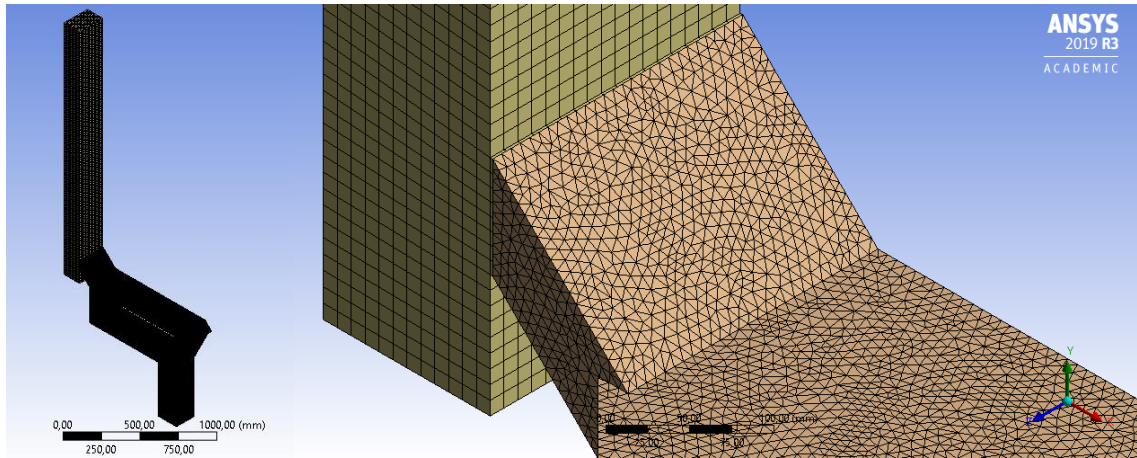


Figura 10. Número de elementos y nodos en el mallado automático de ANSYS.

Details of "Mesh"	
Straight Sided Elements	
Rigid Body Behavior	Dimensionally Red...
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Sheet Loop Removal	No
<input checked="" type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	4383
<input type="checkbox"/> Elements	16450

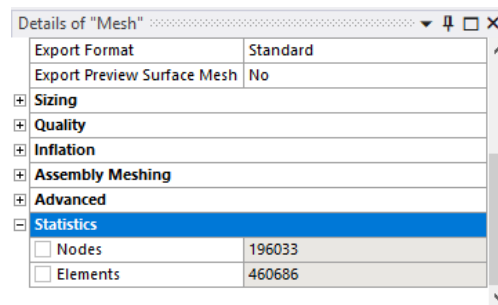
Se puede observar que el mallado contiene elementos muy grandes y poco apropiados al modelo, esto conllevaría problemas en la simulación y errores en los resultados, por este motivo es necesario realizar un ajuste en la malla para obtener una de mayor calidad.

Figura 11. Mallado ajustado con la herramienta “body sizing”.



En la figura 11 se puede apreciar el nuevo mallado que tiene la estufa de gasificación al utilizar la herramienta basada en “body sizing”, donde se limitó a 15 mm el tamaño máximo de cada elemento, obteniendo así, una mayor cantidad de estos en comparación al mallado automático de ANSYS.

Figura 12. Número de elementos y nodos en el mallado ajustado.

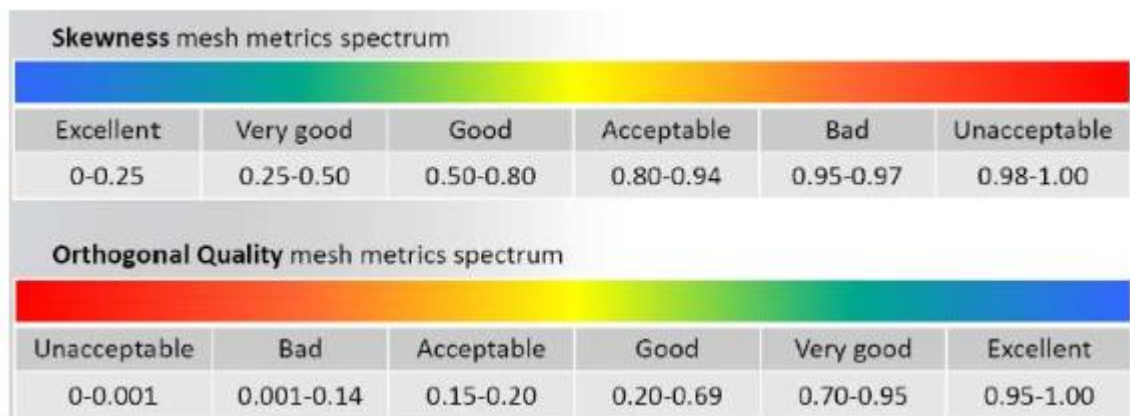


En la figura 12 se muestra en detalle las propiedades del mallado luego de hacer un refinamiento, con este método se obtienen 460,686 elementos tetraédricos de 4 nodos y hexaédricos de 8 nodos compartidos por elemento y un total de 196,033 nodos. Como se puede apreciar este ajuste resulta apropiado y presenta un buen ajuste a la geometría del modelado.

6.3.2 Criterio de calidad del mallado

Para evaluar la calidad del mallado realizado, se utilizaron los criterios de calidad recomendados por ANSYS, “*Skewness*” y “*Orthogonal Quality*”, mostrados en la figura 13.

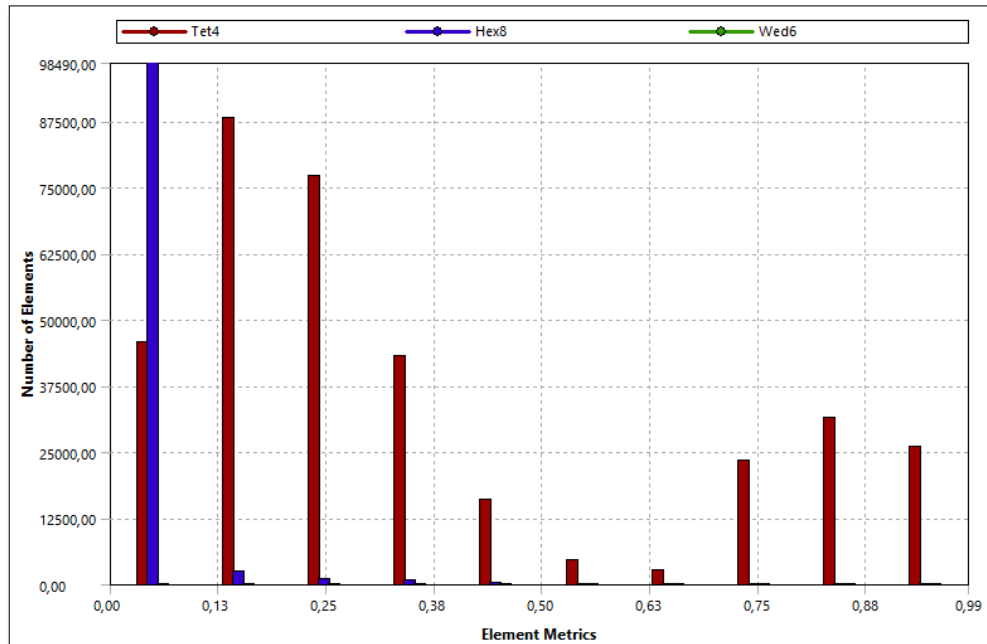
Figura 13. Criterios de calidad de mallado recomendados por ANSYS.



Fuente: ANSYS.

El criterio de calidad *Skewness* o factor de asimetría determina que tan cerca se encuentra un elemento de la malla a su forma ideal, un valor de 0 indica una celda equilátera (mejor) y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada (peor).

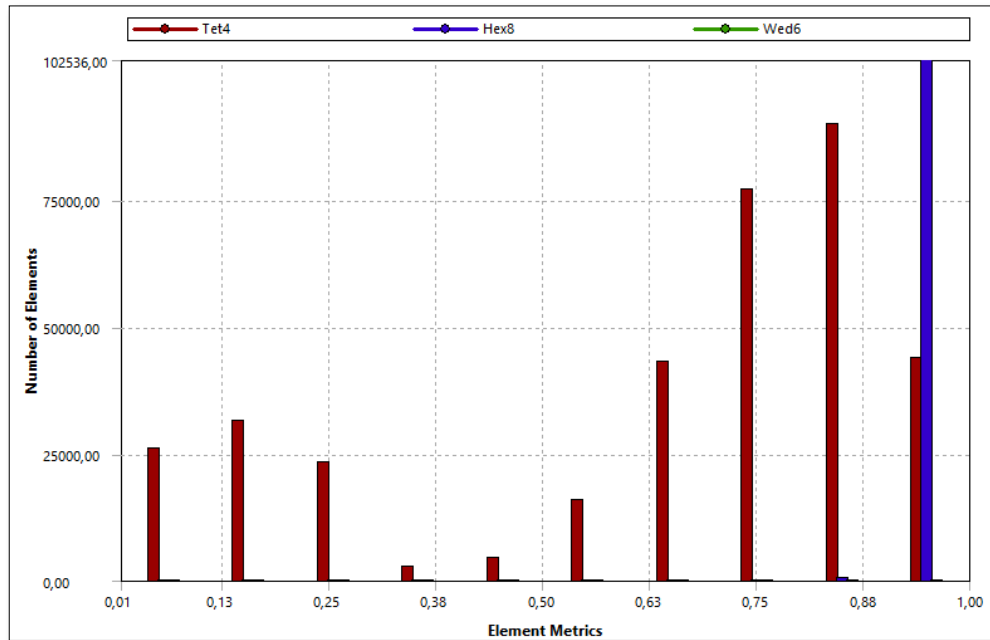
Figura 14. Gráfica estadística del factor de asimetría de los elementos del mallado.



Se puede apreciar en la figura 14 que la gran mayoría de los elementos del mallado se encuentran dentro del rango 0.00 – 0.50, lo cual hace referencia a un mallado que va desde lo muy bueno a excelente, con un factor de asimetría promedio de los elementos de 0.285, esto indica que bajo este criterio la malla es muy buena.

El criterio de calidad *Orthogonal Quality* se relaciona con la proximidad de los ángulos entre las caras de elementos adyacentes (o aristas de elementos adyacentes) en un ángulo óptimo.

Figura 15. Grafica estadística de la calidad ortogonal de los elementos del mallado.



Se puede apreciar en la gráfica 15 que la gran mayoría de los elementos del mallado se encuentran dentro del rango 0.50 – 1.00, lo cual hace referencia a un mallado que va desde lo bueno a excelente, con un valor promedio de los elementos de 0.718, esto indica que bajo este criterio la malla es muy buena.

6.3.3 Configuración de la simulación

Para el desarrollo de la simulación se ignoró el proceso de combustión presente en el hogar, se trabajó como aire caliente que entra por el primer segmento de la chimenea, se distribuye por los ductos que contienen las hornillas y finalmente se unen para salir en el segundo trayecto de la chimenea; este aire inicialmente tiene una temperatura de 600 K (326.85°C) y tiene rata de entrada de 16 m³/h, esto corresponde al comburente (oxígeno) necesario para la combustión de una estufa familiar que quema 2 kilogramos de madera por hora, se seleccionó esta

temperatura en base a literatura encontrada en procesos de combustión en estufas de leña.

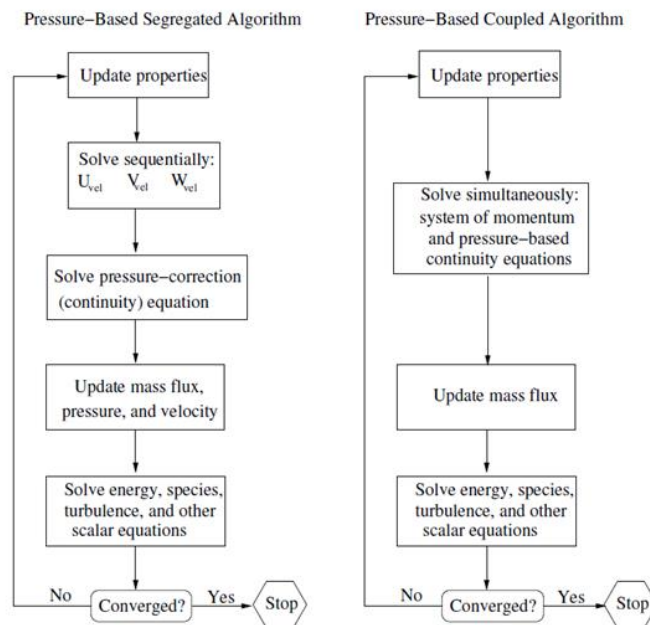
Las pérdidas de calor presentes en la estufa se deben al fenómeno de la convección natural, donde el ambiente exterior se encuentra a 300 K (26,85°C), además, hay una transferencia de calor por convección en las hornillas, las cuales también se asumieron a una temperatura de 300 K, esto representa la situación más crítica que es la puesta en marcha, donde los humos ceden la mayor cantidad de energía y pierden temperatura rápidamente, aun así, la estufa debe cumplir con los criterios de diseño, por lo tanto, los gases al momento de salir por la chimenea tendrán que estar sobre los 373.15 K (100°C).

ANSYS Fluent permite elegir entre dos métodos numéricos de solución, basado en presión y basado en densidad. Usando cualquiera de los dos métodos, el programa resolverá las ecuaciones integrales que rigen la conservación de la masa y el momento, para la energía y otros escalares como turbulencias. En ambos casos se utiliza una técnica basada en volúmenes de control discretos donde se integran de forma individual en cada volumen para construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes discretas como velocidad, presión, densidad, temperatura, entre otros. Luego realiza una linealización de las ecuaciones discretizadas para facilitar su solución y así poder obtener los resultados de las variables dependientes. Con lo anterior se decide resolver usando el método por defecto de ANSYS Fluent el cual está basado en presión, ya que no existe alguna recomendación clara de cual método es más apropiado al modelo a estudiar.

El método numérico basado en presión presenta dos algoritmos diferentes de solución, un algoritmo segregado y un algoritmo acoplado. El de tipo segregado resuelve las ecuaciones de forma secuencial. Dado que las ecuaciones son no

lineales, el bucle de solución debe llevarse a cabo de forma iterativa para obtener una solución numérica convergente. El algoritmo acoplado resuelve de forma conjunta las ecuaciones de momento y de continuidad, las ecuaciones restantes se resuelven de forma desacoplada como en el algoritmo anterior. Puesto que las ecuaciones de momento y continuidad se resuelven de una manera estrechamente acoplada, la convergencia de la solución mejora significativamente en comparación con el algoritmo segregado. En la figura 16 se puede apreciar la diferencia en los métodos de solución basados en la presión. En base a lo explicado anteriormente, se determinó que la mejor opción para resolver el modelo fluidodinámico es el algoritmo acoplado basado en presión.

Figura 16. Descripción general de los métodos de solución basados en la presión.



Fuente: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/flu_th/flu_th_uns_scheme.html.

Luego de establecer el método de solución y las condiciones de frontera se procede a iniciar la simulación, para esto es necesario realizar una solución de inicialización, la cual es una colección de técnicas y métodos de interpolación de límites, se aplicó el de tipo híbrido, este es el método por defecto de ANSYS Fluent, y finalmente se ejecuta la simulación con un número de 100 iteraciones, si se elige un número muy pequeño es posible que los resultados que se obtengan sean incorrectos.

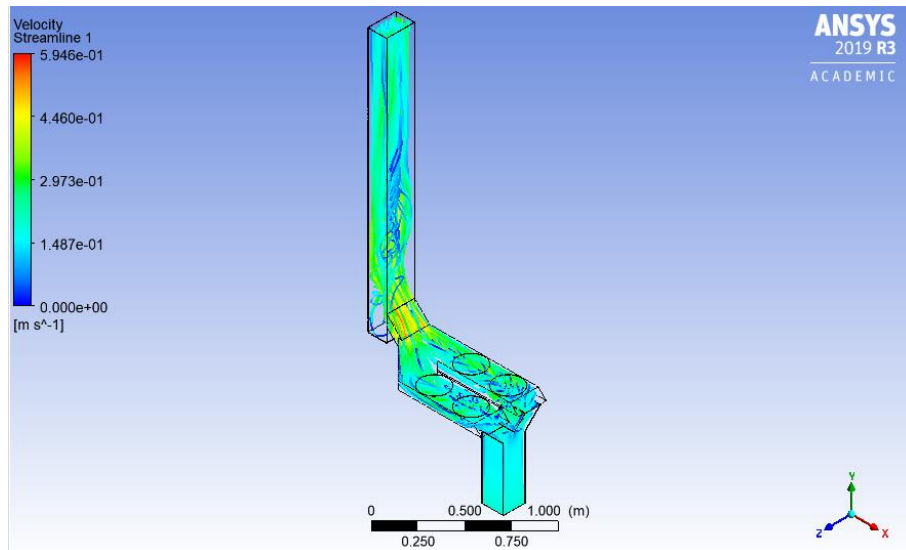
6.3.4 Resultados y análisis

A continuación, se hace un análisis detallado de los resultados más relevantes encontrados en la simulación previamente definida.

6.3.4.1 Comportamiento dinámico de los humos

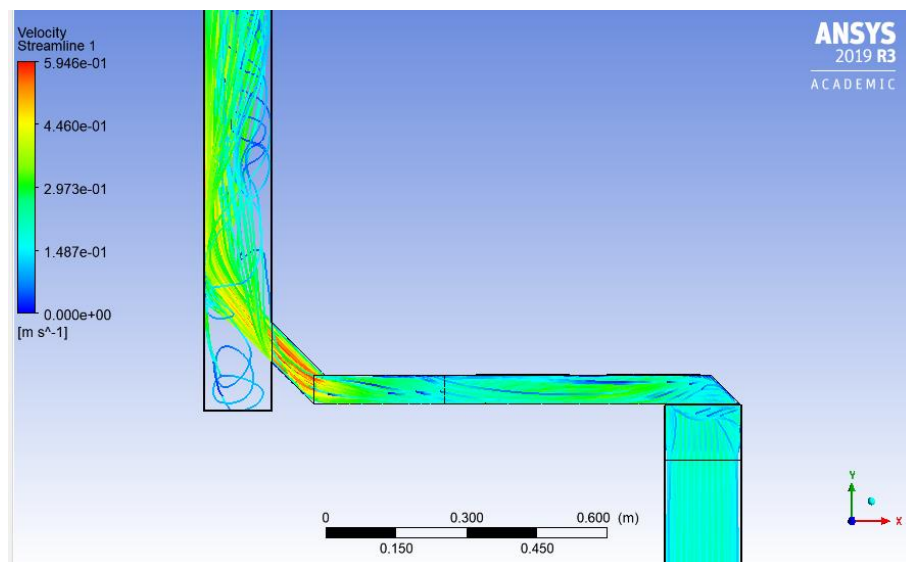
Es importante garantizar un movimiento continuo y sin interrupciones en los gases que circulan a través de la estufa, lo ideal es evitar flujos turbulentos que afecten la evacuación de estos, en la figura 16 se puede apreciar el movimiento que llevan los humos desde su entrada en el primer segmento de la chimenea y hasta llegar al punto de salida.

Figura 17. Velocidad de los humos a través de la estufa de gasificación tipo cohete.



De la figura 17 se puede apreciar un flujo continuo y sin obstrucciones de los gases, las turbulencias mostradas no son altamente significativas, ya que rápidamente el flujo se estabiliza y vuelve a tener un comportamiento de tipo laminar.

Figura 18. Vista lateral del comportamiento dinámico de los gases.



En la figura 18 se puede observar que el flujo en mayor parte del recorrido es de tipo laminar, es decir, el movimiento del fluido es ordenado y suave, se mueven en laminas paralelas; presenta pequeñas turbulencias en las zonas de transición, cuando sale de la chimenea inicial y cuando entra a la sección final de la chimenea, esto se debe al cambio de dirección que deben tomar los gases de combustión.

6.3.4.2 Variación de la temperatura de los gases

La figura 19 muestra el resultado de las temperaturas de los gases desde su entrada en la estufa a 600 K, luego pierden temperatura rápidamente al pasar por las hornillas, las cuales se encuentran a temperatura ambiente (300 K) y finalmente salen de la chimenea a una temperatura aproximada de 375 K.

Figura 19. Distribución de temperaturas de los humos a través de la estufa de gasificación tipo cohete.

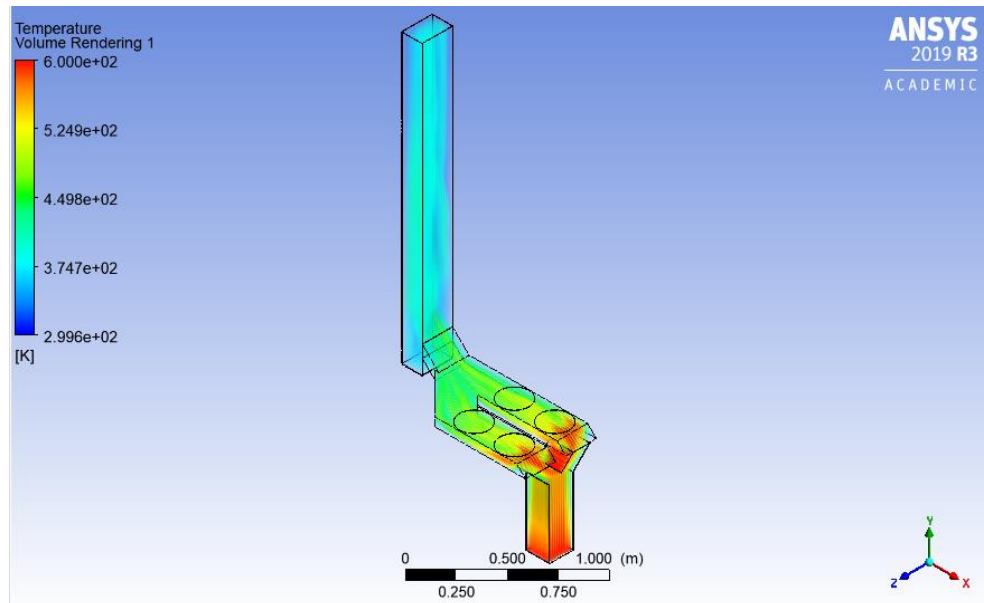
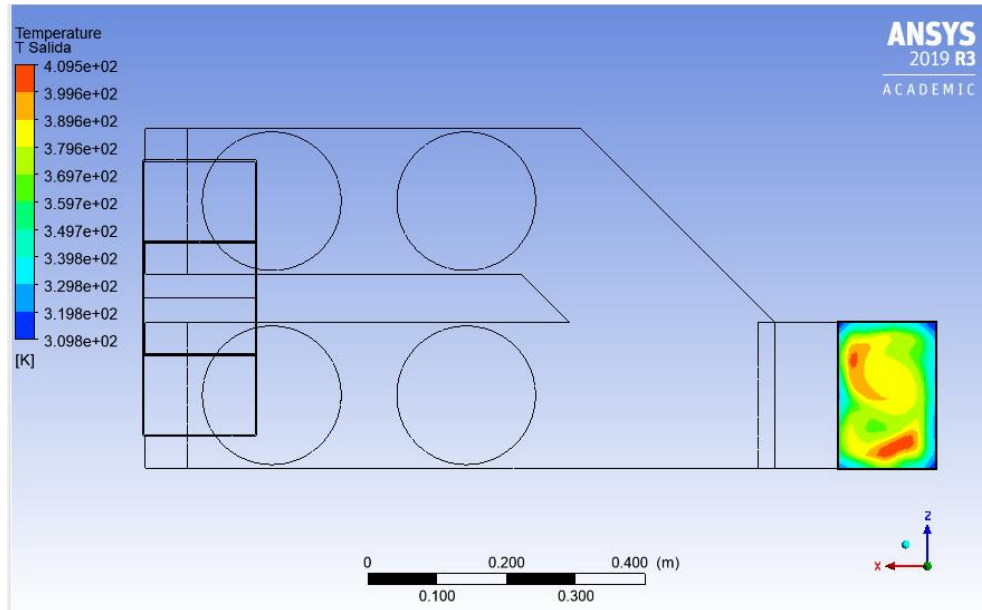


Figura 20. Temperatura de los humos a la salida de la chimenea.



Las temperaturas de los humos al salir por la chimenea se encuentran en un gran porcentaje sobre los 360 K y en algunos puntos la temperatura máxima llega a ser de 409 K, esto evidencia claramente el cumplimiento de los criterios de diseño, pues se había establecido una temperatura promedio de salida de 373,15 K (100°C).

6.4 SISTEMA DE AISLAMIENTO TÉRMICO

Un sistema debe tener un aislamiento térmico para cumplir al menos una de las siguientes razones:

- Por ahorro energético: El objetivo es reducir la cantidad de energía perdida que pasa a través de las paredes del sistema. Esto se consigue con la instalación del aislamiento, reduciendo las pérdidas de calor.

- Protección personal: Si las temperaturas superficiales externas son muy elevadas, pueden provocar lesiones y accidentes en las personas. Además si las temperaturas superficiales son lo suficientemente altas, podrían producirse efectos de combustión e incendio en materiales combustibles próximos a estas superficies.
- Por proceso: Ciertos procesos deben tener una estabilidad térmica por lo que deben evitarse transferencias o pérdidas térmicas que provoquen un mal funcionamiento del proceso. El objetivo es que el proceso funcione de forma correcta y estable, según ha sido diseñado.
- Por impacto medioambiental: Al disminuir las pérdidas de calor en el proceso, se reducen las emisiones de CO₂, dado que se está aprovechando en mayor porcentaje la energía producida, es decir, su eficiencia aumenta.

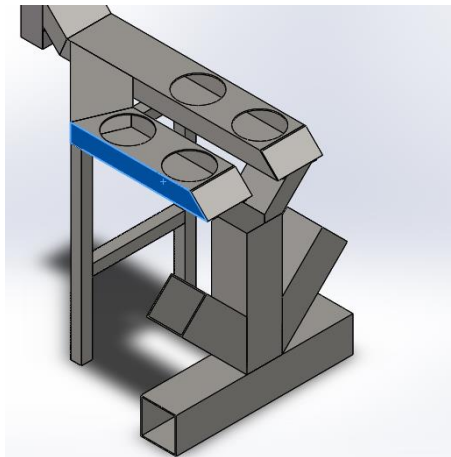
El dimensionamiento del aislante térmico para la estufa de gasificación tipo cohete estará basado en la protección personal, la temperatura máxima superficial recomendada por guías de buenas prácticas de aislamiento térmico es de 50°C, partiendo de este dato, se realiza el cálculo del espesor del aislante en las zonas de mayor riesgo para las personas que se encuentren a su alrededor. El material usado es fibra de vidrio, se seleccionó por su bajo coeficiente de conducción de calor, el cual está en torno a 0.04 W/m°C, además, tiene un costo muy bajo, lo que resulta útil ya que es uno de los puntos más relevantes para el consumidor final.

La transferencia de calor que realiza la estufa con el ambiente es por medio de la convección natural, esta transferencia depende de la configuración geométrica de

la superficie, así como de su orientación. También depende de la variación de la temperatura de la zona y de las propiedades termofísicas del fluido que interviene.¹²

Los ductos que contienen las hornillas representan el mayor riesgo para las personas por la constante interacción al momento de cocinar, por esto se decidió aislarlos para hacer de la estufa un producto de uso seguro. Los cálculos del espesor del aislante se desarrollaron con la región señalada en la figura 21, ya que en esta zona se presenta la mayor temperatura; es una placa plana vertical donde su longitud característica (altura) es de 0.07 m y cuenta con un área aproximado de 0.044 m².

Figura 21. Zona de cálculos para el dimensionamiento del aislante.



Primero debemos conocer el coeficiente promedio de transferencia de calor (h) sobre la superficie para poder determinar el espesor del aislante, para esto, se utilizaron las siguientes relaciones:

¹² CENGEL, Y; GHAJAR, A. Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, 4ta edición. United States of America: McGraw-Hill, Inc. 2011 pp. 519-530.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)Lc^3}{\nu^2} Pr$$

$$Nu = \frac{hLc}{k}$$

Fuente: Libro de transferencia de calor y masa. Cengel 4 Edición.

Donde:

Nu : Número promedio de Nusselt

Ra_L : Número de Rayleigh

g : Aceleración gravitacional [m/s^2]

β : Coeficiente de expansión volumétrica [$1/K$]

T_s : Temperatura de la superficie [$^{\circ}C$]

T_∞ : Temperatura del ambiente exterior [$^{\circ}C$]

Lc : Longitud característica de la configuración geométrica [m]

ν : Viscosidad cinemática del fluido [m^2/s]

Pr : Numero de Prandtl

h : Coeficiente promedio de transferencia de calor sobre la superficie [$W/m^2^{\circ}C$]

k : Conductividad térmica [$W/m^{\circ}C$]

Luego de evaluar todas las propiedades del fluido a la temperatura de película ($T_f = (T_s + T_\infty)/2$) se resolvió el sistema de ecuaciones y se encontró que el coeficiente promedio de convección natural es de $5.582 W/m^2^{\circ}C$.

$$\beta = 0,00321 \text{ [1/K]}$$

$$Lc = 0,07$$

$$T_{ext} = 26,85 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$Nu. = 14,74$$

$$T_f = 38,43 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h = 5,582 \text{ [W/m}^2\text{C}^\circ\text{]}$$

$$Pr = 0,7259$$

$$T_s = 50 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

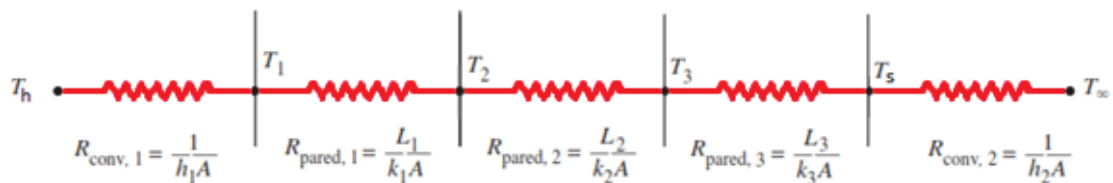
$$k = 0,0265 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

$$Ra = 637673,179$$

$$v = 0,00001687 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

En la figura 22 se muestra la red de resistencias térmicas que ofrece el sistema para la conducción de calor desde el interior de la estufa hasta el ambiente exterior. La primera pared hace referencia al tubo que contiene los humos producto de la combustión en el hogar, la segunda pared es el aislante y la última es la lámina que cubre la fibra de vidrio.

Figura 22. Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor.



De la figura 19 logramos determinar la temperatura al interior de la cara que se va a aislar (T_1), la cual es de aproximadamente 200°C . Con esto podemos calcular la transferencia de calor y así establecer el espesor necesario en el aislante, las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$Q = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

$$Q = \frac{T_1 - T_s}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R = \frac{L}{K * A_s}$$

Fuente: Libro de transferencia de calor y masa. Cengel 4 Edición.

Donde:

Q : Calor transferido por convección natural [W]

A_s : Área de superficie de transferencia de calor [m^2]

T_1 : Temperatura en la cara interna del hogar

R : Resistencia térmica

K : Coeficiente de conductividad térmica [$W/m^{\circ}C$]

L : Espesor del material

Luego de resolver el sistema de ecuaciones se obtuvieron los siguientes resultados.

$A_s = 0,044 [m^2]$	$h = 5,582 [W/m^2^{\circ}C]$	$K1 = 48 [W/m^{\circ}C]$	$K2 = 0,04 [W/m^{\circ}C]$	$K3 = 54 [W/m^{\circ}C]$
$L1 = 0,004 [m]$	$L2 = 0,04643 [m]$	$L3 = 0,0009 [m]$	$Q = 5,686 [W]$	$R1 = 0,001894 [^{\circ}C/W]$
$R2 = 26,38 [^{\circ}C/W]$	$R3 = 0,0002525 [^{\circ}C/W]$	$Rt = 26,38 [^{\circ}C/W]$	$T_{ext} = 26,85 [^{\circ}C]$	$T_s = 50 [^{\circ}C]$

Para facilidades de diseño y construcción, el aislante tendrá un espesor constante alrededor de los ductos, se encontró que este debe ser de 4.64 cm para garantizar una temperatura superficial menor o igual a 50°C.

7. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

En este capítulo se exponen las fotografías tomadas durante el proceso de construcción y ensamble de una estufa de gasificación tipo cohete, siguiendo los planos previamente elaborados (ver Anexo D) se inició la fabricación en talleres externos a la Universidad Industrial de Santander.

7.1 CONSTRUCCIÓN DEL HOGAR

Figura 23. Cortes para la obtención de los segmentos del hogar.



Figura 24. Segmentos que conforman el hogar.



Figura 25. Soldadura para la unión de los segmentos que hacen parte del hogar.



7.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS DUCTOS

Figura 26. Corte de las hornillas en los ductos.



Figura 27. Alineación de los ductos de las hornillas para ser soldados.



7.3 CONSTRUCCIÓN DE LA CHIMENEA

Figura 28. Doblado de lámina para la obtención de la chimenea.



7.4 CONSTRUCCIÓN DEL CUBRIMIENTO DEL AISLATE

Figura 29. Lamina cortada lista para ser doblada.



Figura 30. Obtención del protector del aislante en una maquina dobladora.



Figura 31. Instalación del aislante alrededor de los ductos.



7.5 ENSAMBLE DE LA ESTUFA DE GASIFICACIÓN TIPO COHETE

Figura 32. Ensamble de las diferentes partes que conforman la estufa.



Figura 33. Puesta en marcha para observar la existencia de posibles fugas.



8. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO WBT

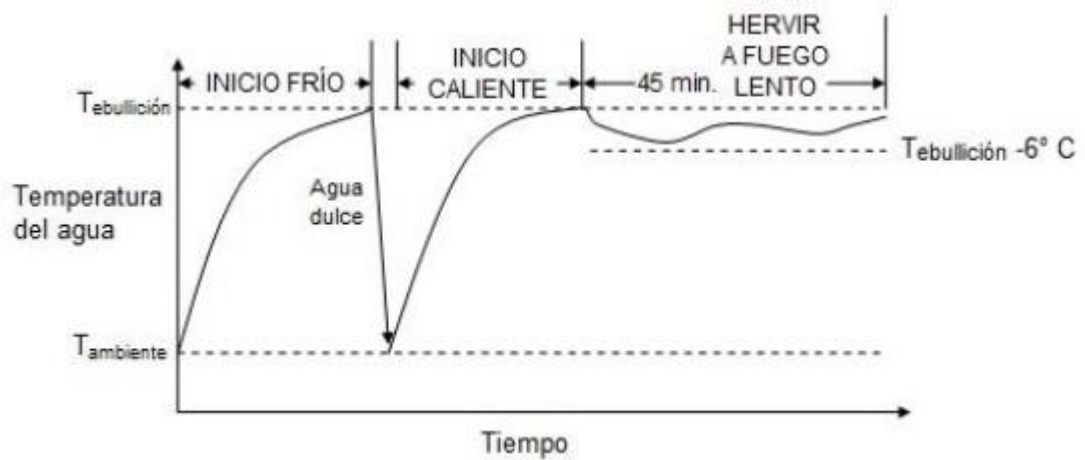
La prueba de ebullición de agua o protocolo WBT (por sus siglas en inglés) determina cuan eficiente es una estufa en utilizar un combustible para calentar agua, además, puede calcular la cantidad de emisiones producidas durante el proceso al usar equipos complejos de medición. El WBT está dividida en tres fases:

1. Fase de alta potencia de inicio frío: Se enciende la estufa a temperatura ambiente con una carga de combustible previamente pesada para hervir una cantidad medida de agua en una olla estándar.
2. Fase de alta potencia de inicio caliente: Al terminar la primera fase, se agrega más combustible debidamente pesado para hervir una cantidad medida de agua. Esta fase ayuda a identificar las diferencias en el rendimiento entre una estufa cuando está fría y cuando está caliente.
3. Fase de baja potencia y fuego lento: Se proporciona la cantidad de combustible requerido para mantener 5 litros de agua por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos. Esta fase simula el tiempo de cocción de las legumbres en gran parte del mundo.

La tercera fase no es recomendable para el cálculo de la eficiencia térmica, esto se debe a que una estufa que es muy lenta para hervir puede presentar un buen resultado en cuanto a eficiencia térmica porque evapora una gran cantidad de agua, sin embargo, el combustible usado para esta labor puede ser muy alto, un mejor indicador sería el de consumo específico, el cual mide la cantidad de combustible

requerido para hervir un litro de agua. Esta fase tampoco resulta útil para calcular la potencia térmica, ya que al limitar la alimentación de combustible no mostraría el valor real del tamaño de la estufa (expresado en vatios). Pruebas de ebullición anteriores han demostrado que las fases de arranque en frío y de arranque en caliente producen los mismos resultados en estufas de poca masa (sin cerámica)¹³, por lo anterior, se decidió realizar únicamente la fase de alta potencia de inicio frío para determinar los indicadores de desempeño.

Figura 34. Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición.



Fuente: <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/404-1.pdf>.

Las mediciones del WBT fueron registradas en una hoja de cálculo de Excel (ver Anexo A), recomendada y suministrada por el mismo protocolo, las ecuaciones que se usan para determinar los indicadores de desempeño de la estufa están señaladas en el apéndice 4 del documento en su versión 4.2.3.

¹³ The Global Alliance for clean cookstoves. WBT 4.2.3 Protocol. 2014. 89 p.

8.1 ANALISIS DE RESULTADOS

En la figura 35 se muestran los resultados calculados a través de la prueba de ebullición de agua, estos corresponden a la fase de alta potencia de inicio frío.

Figura 35. Indicadores de desempeño encontrados en el protocolo WBT.

COLD START			
Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	2.530	f_{cm}
Net change in char during test	g	500	Δc_c
Equivalent dry fuel consumed	g	1058	f_{cd}
Water vaporized from all pots	g	1.562	w_{cv}
Effective mass of water boiled	g	6.547	w_{cr}
Time to boil Pot # 1	min	65	Δt_c
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	65	Δt_c^T
Thermal efficiency	%	29%	h_c
Burning rate	g/min	16,3	r_{cb}
Specific fuel consumption	g/liter boiled	162	SC_c
Temp-corr sp consumption	g/liter	162,728518	SC_c^T
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	3.173	SE_c^T
Firepower	watts	5290	FP_c

La potencia de fuego es el indicador más usado al momento de caracterizar estufas de leña, un valor más alto o más bajo no es necesariamente conveniente, sino más bien es un indicador del tamaño de la estufa, esto representa cuan rápido puede quemar el combustible para obtener un calor útil. Las potencias altas están acompañadas de eficiencias bajas, tal como lo describe Sam Baldwin en su libro *"Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination"*, en donde describe las formas de fabricar estufas mejoradas y presenta algunos ejemplos de las eficiencias que pueden tener en base a la potencia, para un fuego de 1,7 kW tendrá una eficiencia del 47% y para un fuego de 8 kW su eficiencia será del 26%. En base a esto, se puede determinar que el gasificador desarrollado en el presente

proyecto puede ser considerado como una estufa mejorada, ya que su potencia es de 5,29 kW y su eficiencia alcanza el 29%, valores intermedios a los expuestos en la investigación de Baldwin.

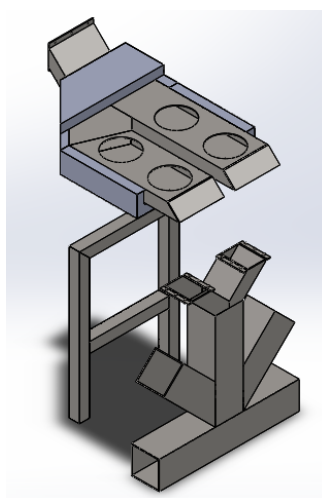
Además de estos indicadores de desempeño, el protocolo WBT también expone otras características propias de la estufa, como lo son el consumo específico de combustible y la velocidad de combustión. El primero de estos mide la cantidad de biomasa requerida para hervir un litro de agua y el segundo es una medida de los gramos promedio de leña quemada por minuto. Estos indicadores no son expuestos con frecuencia en muchas de las estufas comerciales, por esta razón no se pueden categorizar como condiciones buenas o malas de la misma, aun así, estos logran describir con mayor detalle las condiciones de operación, siendo datos de utilidad para el consumidor final.

9. MANUALES

9.1 MANUAL DE ENSAMBLE

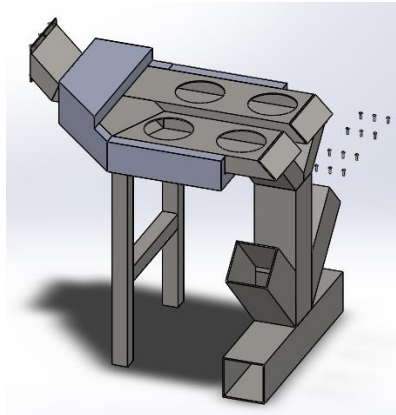
Ubicar los ductos que contienen las hornillas sobre el soporte y sobre el hogar, como se muestra en la figura 36. El aislante y su recubrimiento protector están fijos a los ductos, si se quiere hacer un cambio en el tipo de aislamiento, estos elementos se pueden separar al retirar los tornillos que los une.

Figura 36. Ensamble de los ductos sobre el soporte y el hogar.



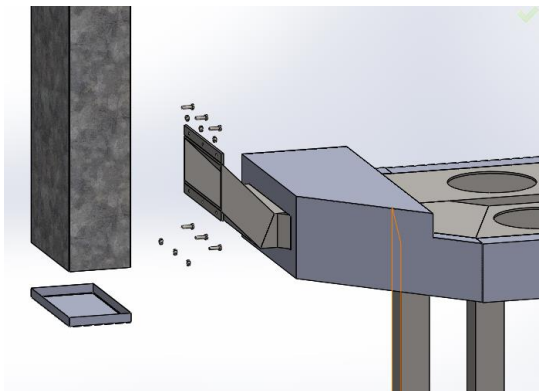
Alinear los orificios de los ductos y el hogar para ubicar los tornillos con sus respectivas tuercas, verificar que tengan un buen ajuste para evitar fugas de los gases producto de la combustión.

Figura 37. Unión de los ductos con el hogar por medio de tornillos y tuercas.



Acoplar la chimenea con los ductos de las hornillas por medio de tornillos y tuercas, por último se debe ubicar el tapón de la chimenea en su parte inferior, con esto se termina el ensamble de la estufa.

Figura 38. Unión de la chimenea con los ductos de las hornillas.



9.2 MANUAL DE OPERACIÓN

Para la puesta en marcha de la estufa de gasificación tipo cohete se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Verificar que la sección de las cenizas no se encuentra completamente llena, con el fin de garantizar una correcta entrada de aire en el hogar.
- A través de los puertos de alimentación suministrar madera pequeña y delgada o cualquier otro tipo de combustible que facilite el encendido de la estufa.
- Luego de que la llama se fortalezca, agregar la cantidad de biomasa deseada para mantener un fuego continuo durante la cocción de los alimentos.
- Por último, observar el color de los humos, los cuales no deben ser muy visibles, si esto no es así, significa que la estufa está presentado algún problema (infiltraciones de aire frío en los ductos, alto porcentaje de humedad en la biomasa y/o poca admisión de comburente) que afecta directamente la combustión. Esto se debe solucionar antes de continuar nuevamente con la operación de la estufa.

9.3 MANUAL DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento se realizará cuando la estufa esté completamente fría. Se debe revisar periódicamente el compartimiento de las cenizas para ser vaciado antes de que este se llene completamente, de no ser así, podría afectar el desempeño del gasificador. Adicional a esto, retirar el tapón de la chimenea para observar posibles infiltraciones de agua al interior de esta, luego del chequeo ubicar el tapón nuevamente en su lugar.

De una a dos veces por año se recomienda deshollinar los ductos para evitar cualquier repercusión en la salud, la frecuencia de esta labor dependerá del contenido de agua de la biomasa usada en la combustión, un porcentaje alto de humedad aumenta la formación de hollín en las paredes internas de la estufa.

10. PRESUPUESTO

Tabla 4. Presupuesto.

DESCRIPCIÓN	CANT.	VALOR C/U	TOTAL
Tubos para el hogar	1	90.000	90.000
Ductos de las hornillas	2	40.000	80.000
Tubos para el soporte	2	15.000	30.000
Lámina de acero galvanizado calibre 24	1	46.000	46.000
Lámina de acero galvanizado calibre 20	2	30.000	60.000
Doblado de lámina	1	24.000	24.000
Aislamiento térmico	1	20.000	20.000
Mano de obra	1	250.000	250.000
Gastos varios (Transportes, asesorías)	1	200.000	200.000
		TOTAL	800.000

11. CONCLUSIONES

Se diseñó una cámara de combustión con doble entrada de biomasa para aumentar su potencia térmica y su autonomía, al tener una configuración de 45° garantiza una tasa de alimentación constante, permitiendo una operación continua sin la necesidad de la supervisión permanente de un operador.

Se encontró el perfil de distribución de temperatura a través de la estufa de gasificación tipo cohete al usar un programa de simulación dinámica computacional de fluidos (CFD), y se obtiene que los humos salen de la chimenea a una temperatura superior a los 100°C (en promedio), de esto se concluye que el equipo no requeriría aislamiento si la seguridad no fuera un factor importante, ya que cumple con las condiciones de temperatura establecidas en la fase de diseño, requerimiento que se debe cumplir para garantizar una correcta evacuación de los gases producto de la combustión.

El equipo construido muestra favorables índices de desempeño, la potencia de fuego y la eficiencia térmica encontradas en el protocolo WBT, 5,29 kW y 29% respectivamente, posicionan a la estufa de gasificación tipo cohete como un diseño mejorado al compararla con estufas de leña tradicionales.

El costo total de la estufa tipo cohete es de \$800.000 pesos, dicho valor es considerablemente inferior a las que existen en el mercado nacional, esto resulta ser una gran ventaja sobre las ofertas actuales, con lo cual se concluye que la construcción de este gasificador cumple con los requisitos más relevantes expuestos en la gestión de calidad (QFD), una estufa eficiente de uso seguro a un precio asequible.

12. RECOMENDACIONES

Es de gran importancia tomar precauciones durante el uso de la estufa de gasificación tipo cohete para evitar accidentes y/o quemaduras, especialmente en las zonas que no fueron aisladas.

Para obtener mayores niveles de desempeño térmico se recomienda el uso de biomasa con un menor porcentaje de humedad, preferiblemente que sea por debajo del 20%.

BIBLIOGRAFÍA

ANSYS. Ansys Fluent: Fluid simulation software. [En línea]. (Recuperado el 20 de agosto de 2020). Disponible en: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.

ANSYS. Fluent theory guide. [En línea]. (Recuperado el 20 de agosto de 2020). Disponible en: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/flu_th/flu_th.html.

ASOCIACIÓN DE FABRICANTES ESPAÑOLES LANAS MINERALES AISLANTES (AFELMA). Guía de buenas prácticas: Aislamiento térmico en la industria. España. 151 p.

CARBEL. Historia de la chimenea. [En línea]. (Recuperado el 25 de agosto de 2020). Disponible en: <https://carbel.net/historia-la-chimenea/>.

CENGEL, Y; GHAJAR, A. Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, 4ta edición. United States of America: McGraw-Hill, Inc. 2011 pp. 519-530.

CEUPE. ¿Qué es la gasificación? [En línea]. (Recuperado el 24 de agosto de 2020). Disponible en: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-gasificacion.html#:~:text=La%20gasificaci%C3%B3n%20es%20un%20proceso,unos%20niveles%20de%20ox%C3%ADgeno%20restringidos>.

C. R. Hayes, P. C. Rey, M. Lucia, and T. Giraldo, "Memorias al Congreso de la República, Ministerio de Minas y Energía," 2019.

Delgado García, R., Velasco-Roldáb, L., Onofa-Cuichán, E. & Armas-Figueroa, E. Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasas de reducido poder calorífico. DYNA 83 (199) pp. 183-190.

DPM ESPECIALIDADES. Historia de las cocinas de leña. [En línea]. (Recuperado el 25 de agosto de 2020). Disponible en: <http://dpmespecialidades.es/historia-de-las-cocinas-de-lena/>.

EVACALOR. Manual de instrucciones estufas de pellets. [En línea]. (Recuperado el 24 de agosto de 2020). Disponible en: <https://www.evacalor.com/profiles/evacalor/images/file/1032325370.pdf>.

G. Jose Luis. ¿Cómo saber si una chimenea tira bien? [Blog]. Reformas. 22 de abril de 2020. (Recuperado el 20 de agosto de 2020). Disponible en: <https://materialesalicante.com/saber-una-chimenea-tira-bien/>.

J. R. Pérez Padilla, J. Regalado Pineda, and A. O. Morán Mendoza. La inhalación doméstica del humo de leña y otros materiales biológicos. Un riesgo para el desarrollo de enfermedades respiratorias. Vol. 135, no. 1, pp. 20-25, 1999.

MARQUINA ZABALZA, Eduardo. Combustión. [Blog]. Estufas de inercia: Diseño, asesoramiento y construcción estufas de leña a medida. Biszkaia. Julio de 2020. (Recuperado el 20 de agosto de 2020). Disponible en: <https://estufasdeinercia.wordpress.com/2017/02/11/combustion/>.

M. Auxiliadora, C. Moreira, M. A. Barbosa, J. R. Jardim, M. C. C. A. M. Queiroz, and L. U. Inácio, "Original article Chronic obstructive pulmonary disease in women exposed to wood stove smoke q Maria Auxiliadora Carmo Moreira a, Maria Alves Barbosa b, José R. Jardim c," *Rev Assoc Med Bras*, vol. 59, no. 6, pp. 607–613, 2013.

Organización Mundial de la Salud. Contaminación del aire de interiores y salud. 08 de mayo 2018. [En línea]. (Recuperado el 04 de octubre de 2019). Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.

Roth C. Micro-gasificación: Cocinar con gas procedente de la biomasa sólida y seca. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.pp 10-20, 2011.

TEORIA DE CONSTRUCCIÓN. Hogares y chimeneas con tiro natural. [En línea]. (Recuperado el 20 de agosto de 2020). Disponible en: <http://teoriadeconstruccion.net/blog/hogares-y-chimeneas-con-tiro-natural/>.

The Global Alliance for clean cookstoves. WBT 4.2.3 Protocol. 2014. 89 p.

WINIARSKI, Larry. Combustion and heat transfer in a rocket stove system. [En línea]. (Recuperado el 24 de agosto de 2020). Disponible en: http://ethoscon.com/pdf/ETHOS/ETHOS2012/SatAM/Winiarski_HeatTransfer_RocketStoveSystem.pdf.

ANEXOS

Anexo A. Hoja de cálculo del protocolo WBT.

<p>Test & stove description</p> <p>Name of Tester(s) Juan Camilo Cárdenas Rubio</p> <p>Test Number or Code 1</p> <p>Test Dates 24/08/2020</p> <p>Test Year 2020</p> <p>Test Location Bucaramanga</p> <p>Replicate Test Number </p> <p>Altitude/Elevation (m) 959</p> <p>Stove Type/Model Rocket Stove</p> <p>Manufactured by Juan Camilo Cárdenas Rubio</p> <p>Description and Notes </p> <p>Description of Pot(s) </p> <p>Ambient conditions</p> <p>Air relative humidity (%) 84</p> <p>Local boiling point (C) 96,8</p> <p>Emission testing</p> <p>Atmospheric P (kPa) </p> <p>Pitot delta-P </p> <p>Hood flow rate (m3/hr) </p> <p>Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form</p>	<p>Fuel description</p> <p>Your general description </p> <p>Fuel type Average Softwood (Canifer)</p> <p>Fuel description Natural</p> <p>Average length (cm) 50</p> <p>Cross-sectional dimensions (cm x cm) 2x2</p> <p><u>Default values (looked up)</u></p> <p>Gross calorific value 20.817 HHV, kJ/kg</p> <p>Net calorific value 19.497 LHV, kJ/kg</p> <p>Char calorific value 29.500 LHV, kJ/kg</p> <p>Char carbon content 95% by mass</p> <p><u>If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below.</u></p> <p><input type="checkbox"/> Check box if you have a measured calorific value</p> <p>Measured gross calorific value HHV measured, kJ/kg</p> <p>Measured net calorific value LHV, kJ/kg</p> <p>Assumed net calorific value LHV, kJ/kg</p> <p><u>Values to be used for tests</u></p> <p>Gross calorific value 20.817 HHV, kJ/kg</p> <p>Net calorific value 19.497 LHV, kJ/kg</p> <p>Fuel carbon content 0,500 by mass</p> <p>Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling (note: Kindling should be weighed and reported with wood)</p> <p></p>
---	---

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.4 - TEST #1

DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)*

Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs

Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	Juan Camilo Cárdenas Rubio
Test Number	1
Date	24/08/2020
Location	Bucaramanga
Stove type/model	Rocket Stove
Type of fuel	

gray: efficiency
blue: emissions
pink: error, missing input

Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	26,9	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	460	g	P1
Wind conditions	Light breeze			Dry weight of Pot # 2 (grams)	480	g	P2
Fuel dimensions	50			Dry weight of Pot # 3 (grams)	460	g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	25%	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)	285	g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	20.817	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	300	g	k
Net calorific value (dry fuel)	19.497	kJ/kg	LHV	Local boiling point	96,8	°C	T _b
Effective calorific value				Background concentrations: CO2		ppm	CO2,b
(accounting for fuel moisture)	13.984	kJ/kg	EHV	CO		ppm	CO,b
Char calorific value	29.500	kJ/kg		PM		ug/m3	PM,b

TEST #1 1		COLD START HIGH POWER			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils	
		data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	10:05	t _{ci}	11:10	t _{cf}
Weight of fuel	g	3500	f _{ci}	970	f _{cf}
Water temperature, Pot # 1	°C	22,3	T1 _{ci}	96,8	T1 _{cf}
Water temperature, Pot # 2	°C	22,3	T2 _{ci}	68,0	T2 _{cf}
Water temperature, Pot # 3	°C	22,3	T3 _{ci}	95,0	T3 _{cf}
Water temperature, Pot # 4	°C	22,3	T4 _{ci}	65,0	T4 _{cf}
Weight of Pot # 1 with water	g	2960	P1 _{ci}	2395	P1 _{cf}
Weight of Pot # 2 with water	g	2980	P2 _{ci}	2698	P2 _{cf}
Weight of Pot # 3 with water	g	2960	P3 _{ci}	2435	P3 _{cf}
Weight of Pot # 4 with water	g	2785	P4 _{ci}	2595	P4 _{cf}
Fire-starting materials (if any)	--				
Weight of charcoal+container	g			800	c _c
Average CO2	ppm				CO2 _c
Average CO	ppm				CO _c
Average PM	ug/m3				PM _c
Average Duct Temperature	°C				T _{cd}
Total CO2 (if available)	g				m _{CO2,c}
Total CO (if available)	g				m _{CO,c}
Total PM (if available)	g				m _{PM,c}

COLD START			
Calculations/Results	Units	data	label
Fuel consumed (moist)	g	2.530	f _{cm}
Net change in char during test	g	500	Δc _c
Equivalent dry fuel consumed	g	1058	f _{cd}
Water vaporized from all pots	g	1.562	w _{cv}
Effective mass of water boiled	g	6.547	w _{cr}
Time to boil Pot # 1	min	65	Δt _c
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	65	Δt _c ^T
Thermal efficiency	%	29%	h _c
Burning rate	g/min	16,3	r _{cb}
Specific fuel consumption	g/liter boiled	162	SC _c
Temp-corr sp consumption	g/liter	162,728518	SC _c ^T
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	3.173	SE _c ^T
Firepower	watts	5290	FP _c

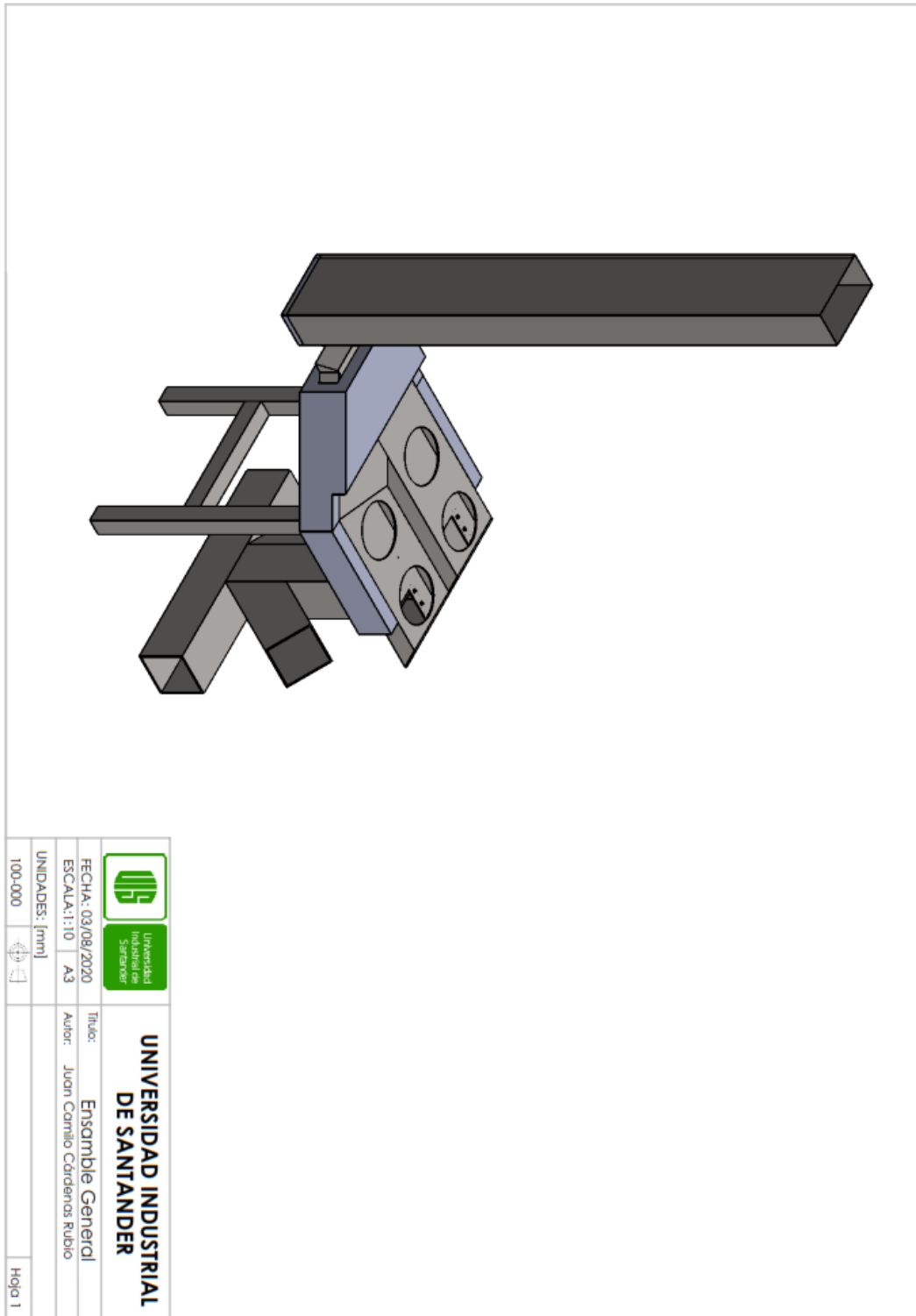
Anexo B. Propiedades térmicas de algunas aleaciones.

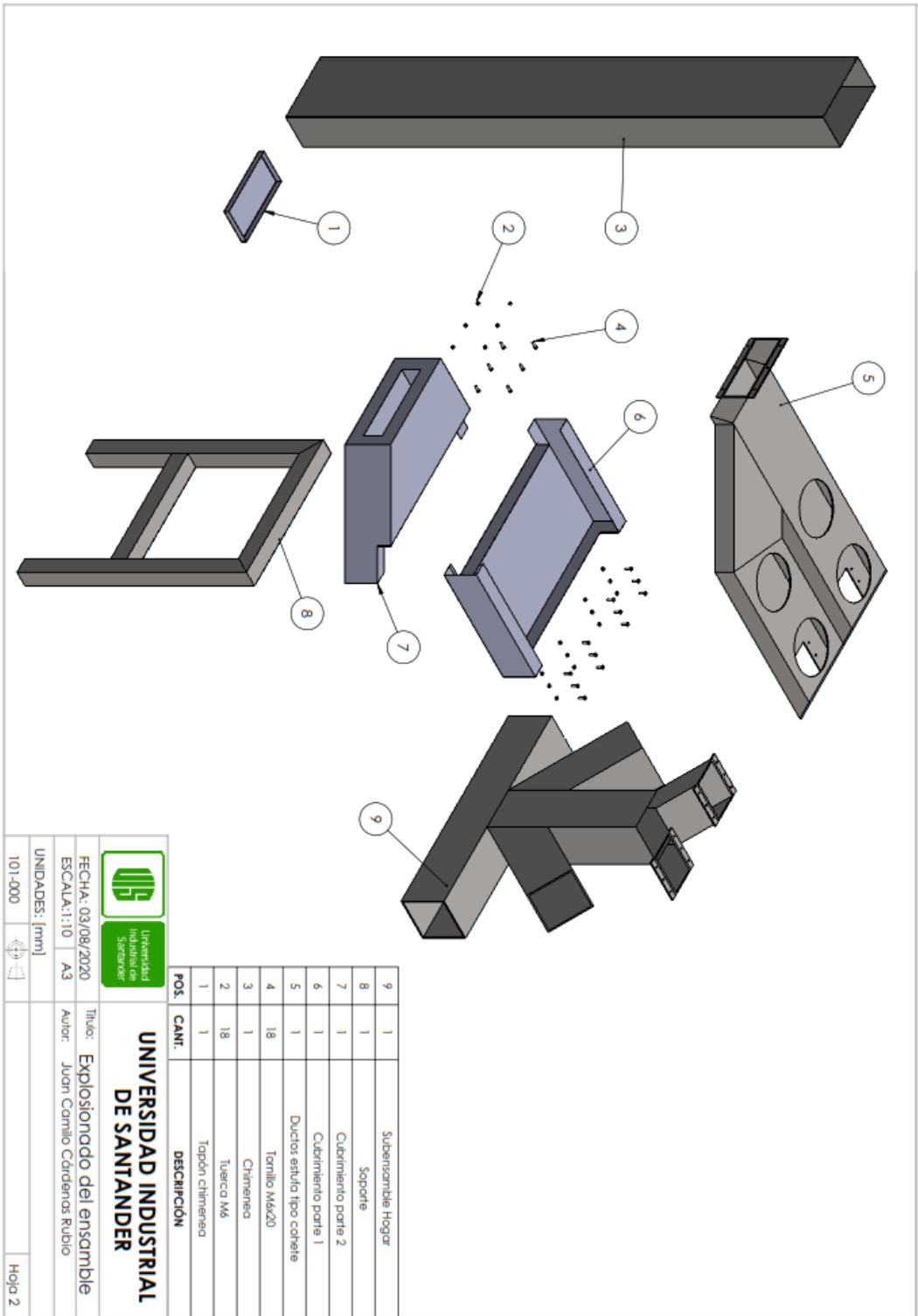
Propiedades a 20°C		Densidad ρ Kg/m ³	Calor especif J/kg°K	Conduct. k W/m°K	Difusividad $\alpha \times 10^5$ m ² /seg	Conductividad térmica en (W/m°C) a la temperatura en °C:												
Aleaciones	Composición					-100	0°C	100	200	300	400	600	800	1000				
Duraluminio	94-96% Al; 3-5% Cu	2787	833	164	6,680	126	159	182	194									
Siluminio	87% Al; 1,33% Si	2659	871	164	7,100	119	137	144	152	161								
Alusil	80% Al; 20% Si	2627	854	161	7,172	144	157	168	175	178								
Al-Mg-Si	97% Al; 1% Mg; 1% Si	2707	8922	177	7,311		175	189	204									
Bronce de aluminio	95% Cu; 5% Al	8666	410	83	2,330													
Bronce	75% Cu; 25% Sn	8666	343	26	0,860													
Latón rojo	85% Cu; 9% Sn; 6% Zn	8714	385	61	1,804		59	71										
Latón	70% Cu; 30% Zn	8522	385	111	3,412	88		128	144	147	147							
Plata alemana	62% Cu; 15% Ni; 22% Zn	8618	394	24,9	0,733	19,2		31	40	45	48							
Constantán	60% Cu; 40% Ni	8922	410	22,7	0,612	21		22	26									
Fundición	4% C	7272	420	52	1,702													
Acero al carbono	0,5% C	7833	465	54	1,474		55	52	48	45	42	35	31	29				
	1% C	7801	473	43	1,172		43	43	42	40	36	33	29	28				
	1,5% C	7753	486	36	0,970		36	36	36	35	33	31	28	28				
Acero al cromo	1% Cr	7865	460	61	1,665		62	55	52	47	42	36	33	33				
	5% Cr	7833	460	40	1,110		40	38	36	36	33	29	29	29				
	20% Cr	7689	460	40	1,11		22	22	22	22	24	24	26	29				
Acero al níquel	10% Ni	7945	460	26	0,720													
	20% Ni	7993	460	19	0,526													
	40% Ni	8169	460	10	0,279													
	60% Ni	8378	460	19	0,493													
	80% Ni	8618	0,46	35	0,872													
	Invar 36% Ni	8,137	460	10,7	0,286													
Acero al Cr-Ni	15% Cr; 10% Ni	7865	460	19	0,526													
	15% Cr; 40% Ni	8073	460	11,6	0,305													
	18% Cr; 8% Ni	7817	460	16,3	0,444		16	17	17	19	19	22	27	31				
	20% Cr; 15% Ni	7833	460	15,1	0,415													
	25% Cr; 20% Ni	7865	460	12,8	0,361													
Acero al manganeso	1% Mn	7865	460	50	1,388													
	5% Mn	7849	460	22	0,637													

Anexo C. Propiedades del aire a 1 atm.

TABLA A-15							
Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974

Anexo D. Planos de la estufa de gasificación tipo cohete.





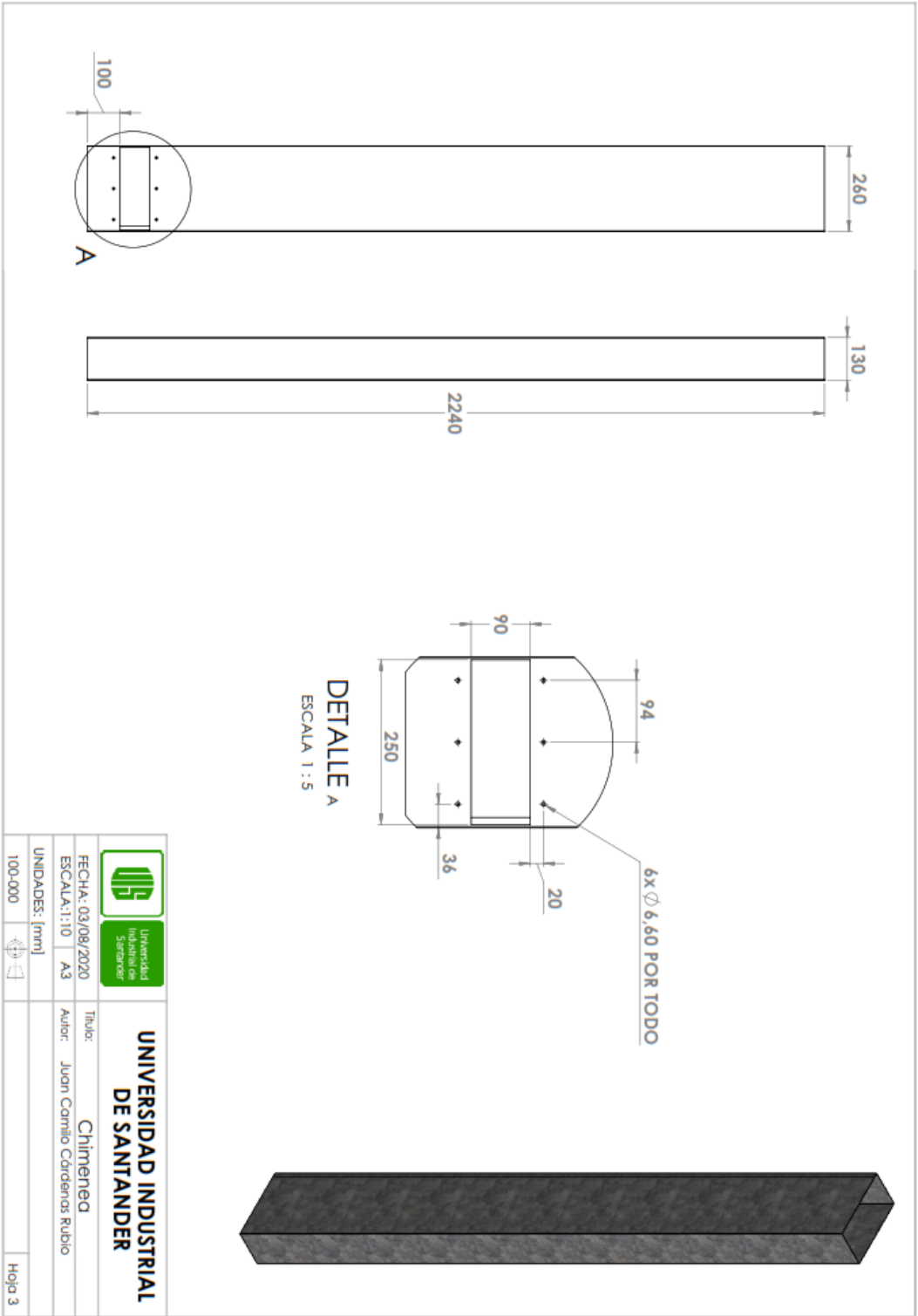
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN
9	1	Subensamble Hogar
8	1	Soporte
7	1	Cubrimiento parte 2
6	1	Cubrimiento parte 1
5	1	Ductos estufa tipo colate
4	18	Tornillo M6x20
3	1	Chimenea
2	18	Tuerca M6
1	1	Tapón chimenea

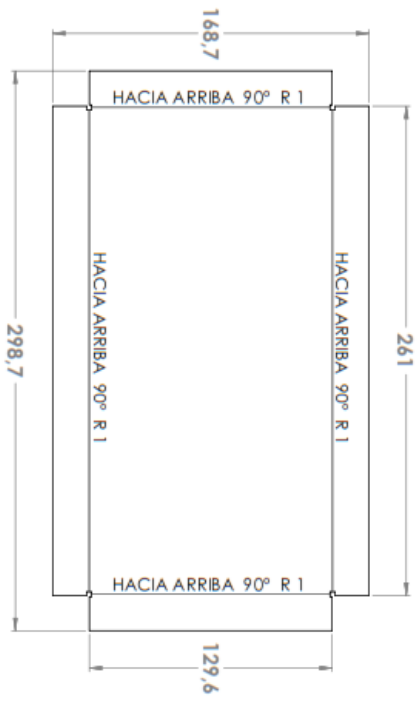
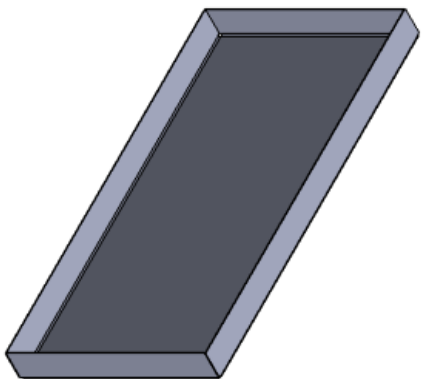
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER


FECHA: 03/08/2020
 ESCALA: 1:10 A3
 UNIDADES: [mm]

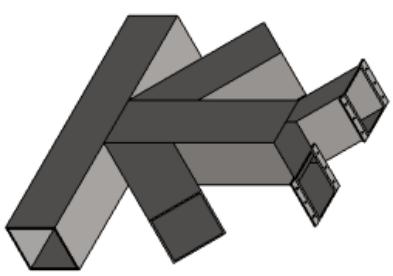
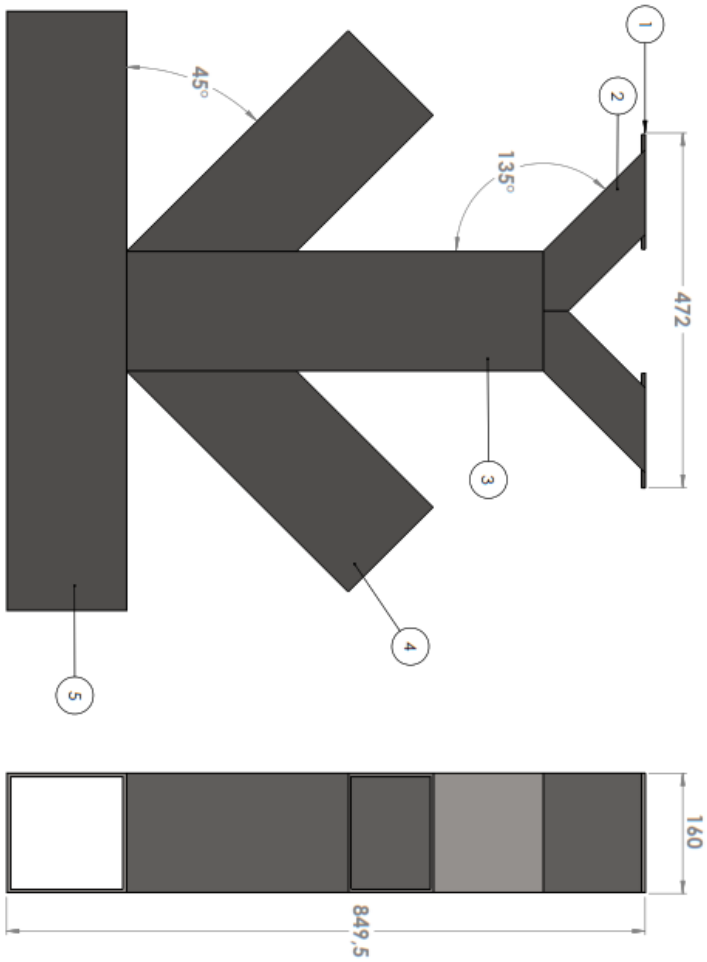
Título: Explosiónado del ensamble
 Autor: Juan Camilo Córdova Rubio

101-000 Hoja 2





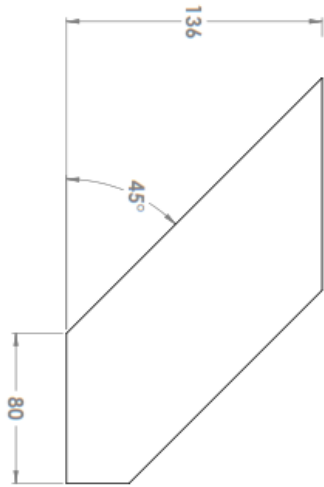
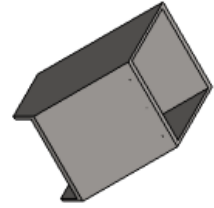


		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/08/2020	Título: Tapón Chimenea		
ESCALA: 1:2	A3	Autor: Juan Camilo Cárdenas Rubio	
UNIDADES: [mm]		Material: Laminado de acero galvanizado calibre 24	
102-001			Hoja 4

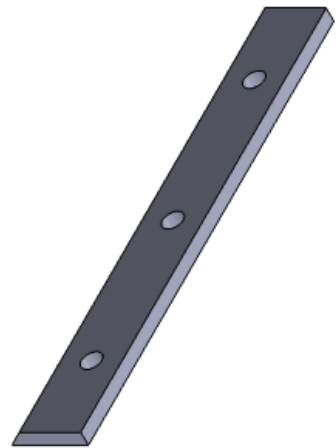
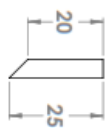
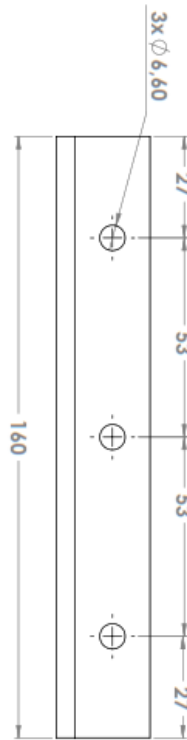



POS. CANT.	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	REFERENCIA
1 4	Pieftinos	Lamina 5mm	103-001
2 2	Distribuidor de humos	Tubo 160x80	103-001
3 1	Hogor	Tubo 160x160	103-002
4 2	Puerto de dilfrentación	Tubo 160x160	103-002
5 1	Acumulador de cenizas	Tubo 160x160	103-003

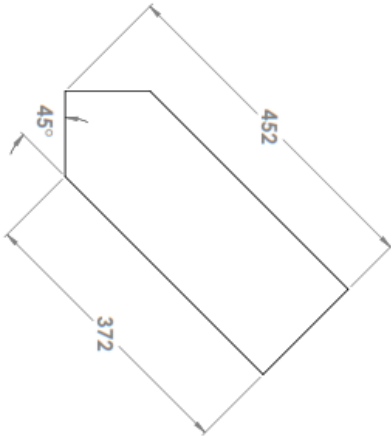
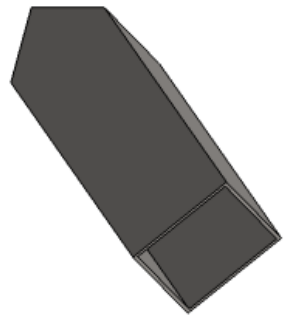
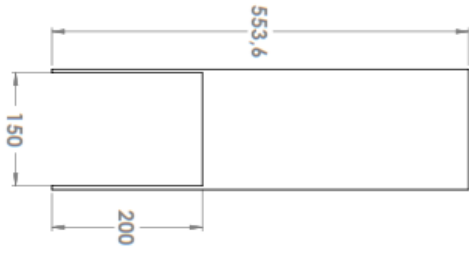
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/08/2020	ESCALA: 1:5	Título:	Subensamble Hogor
UNIDADES: [mm]	103-000	Autor:	Juan Camillo Cárdenas Rubio
			Hoja 5



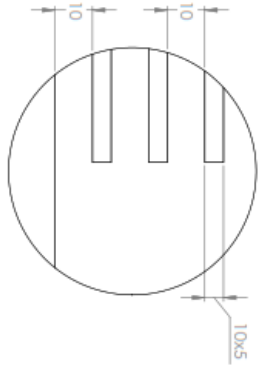
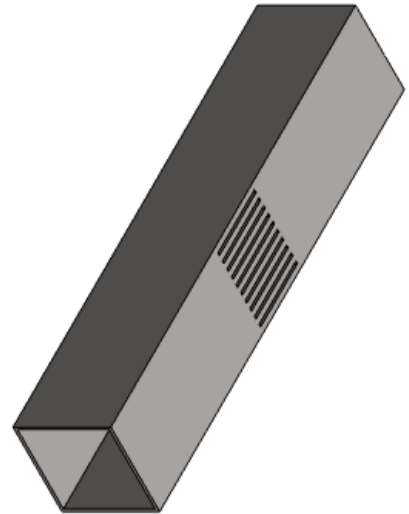
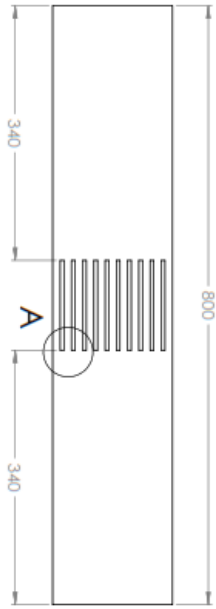
553.75



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/08/2020	Título: Platinas y Distribuidor de humos		
ESCALA: 1:5	A3	Autor: Juan Camilo Corderos Rubio	
UNIDADES: [mm]			
103-001			Hoja 6

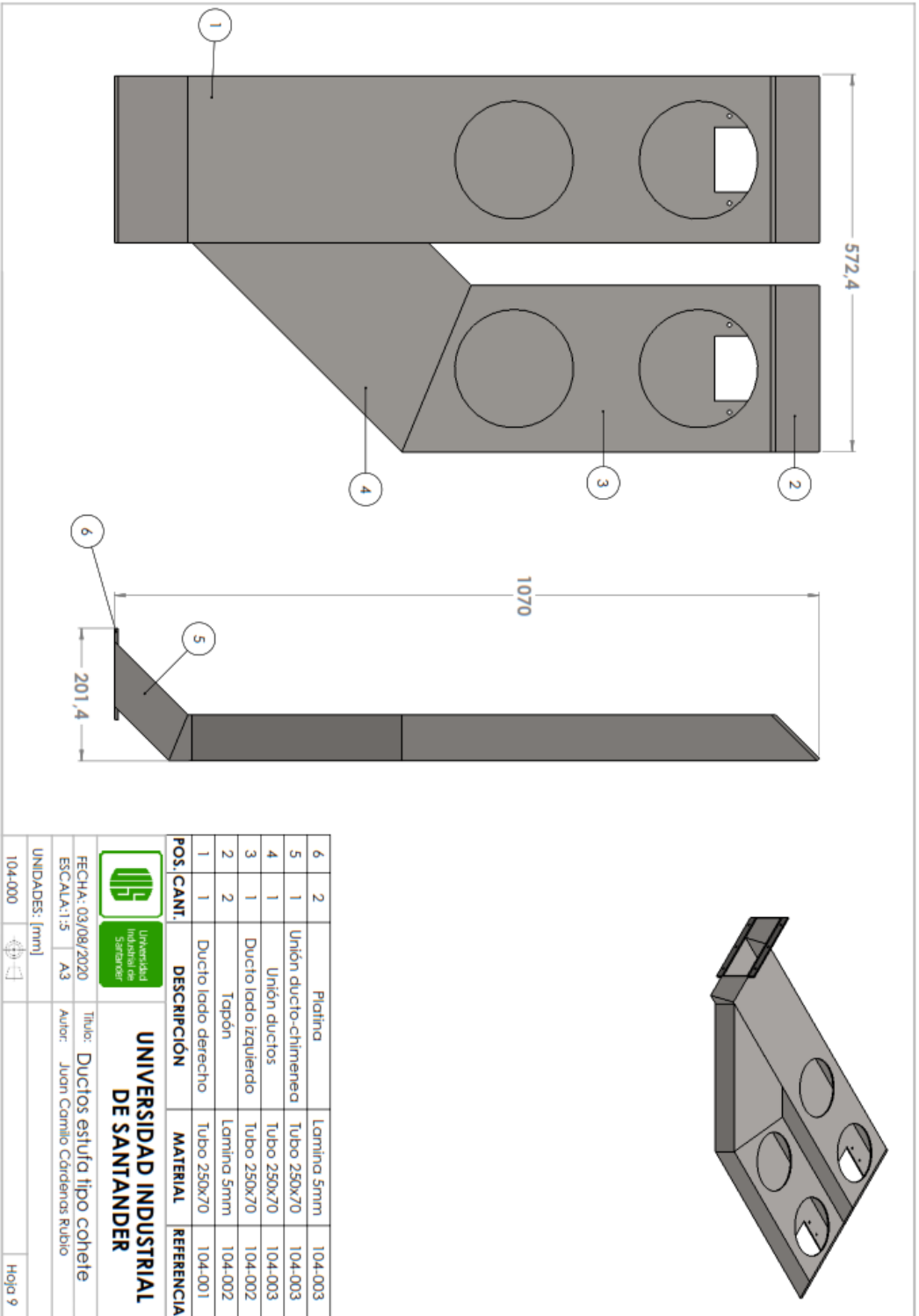


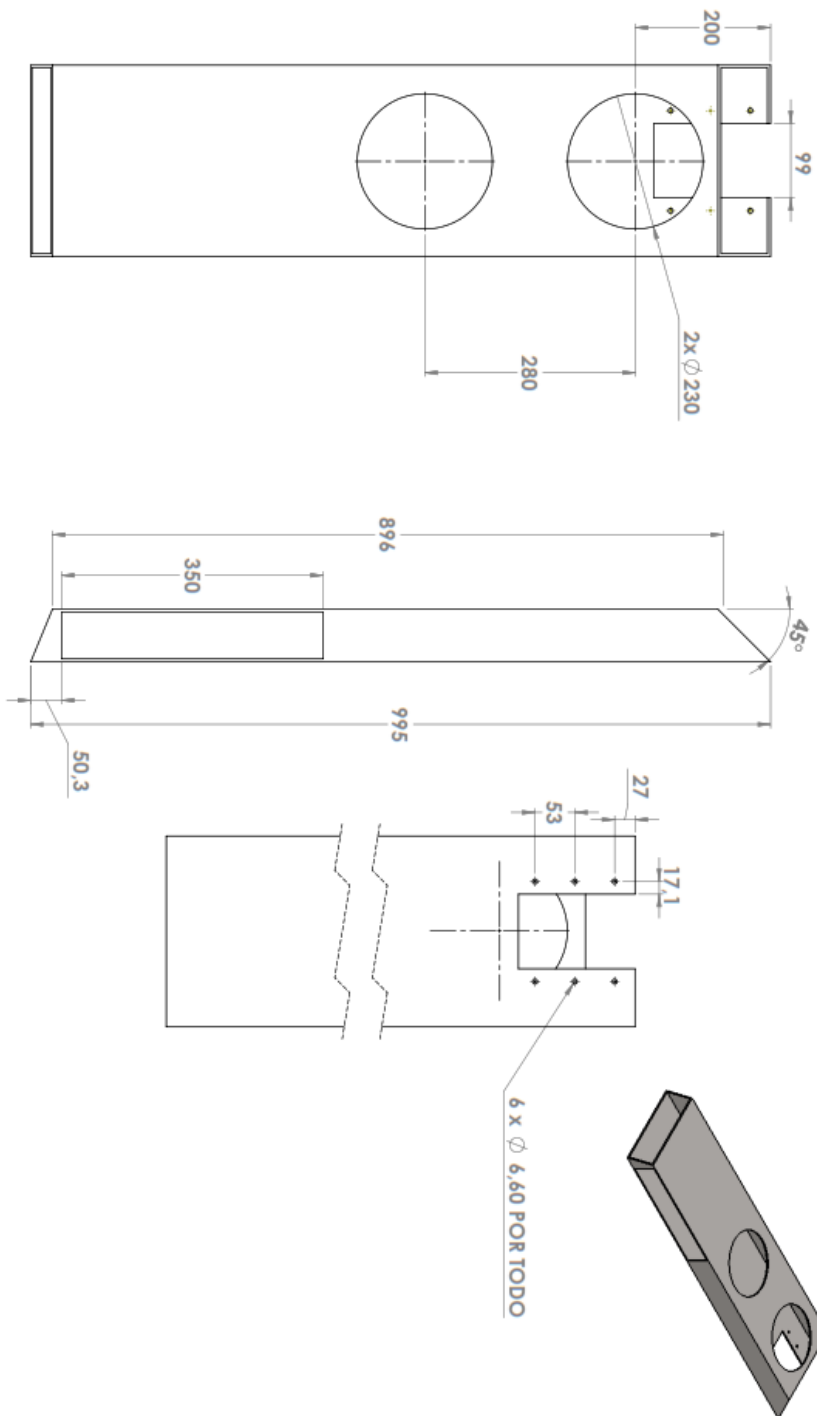
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA:	03/08/2020	Título: Hogar y puerto de alimentación	
ESCALA:	1:5 A3	Autor: Juan Camilo Cárdenas Rubio	
UNIDADES:	[mm]		
103-002			
		Hoja 7	




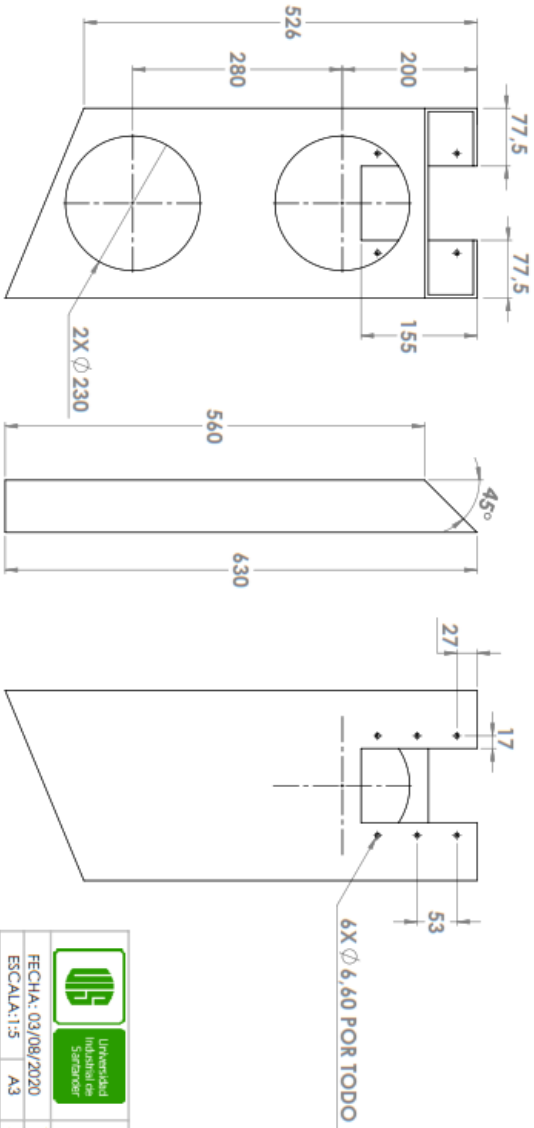
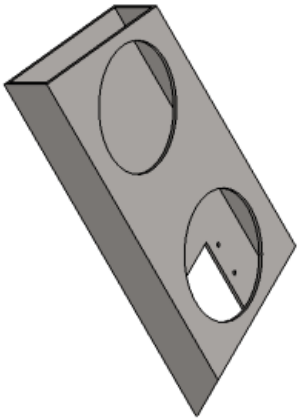
DETALLE A
ESCALA 1 : 1



				UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA:	03/08/2020	Título:	Acumulador de cenizas		
ESCALA:	1:5	A3	Autor: Juan Camilo Corderos Rubio		
UNIDADES:	[mm]				
103-003					Hoja 8

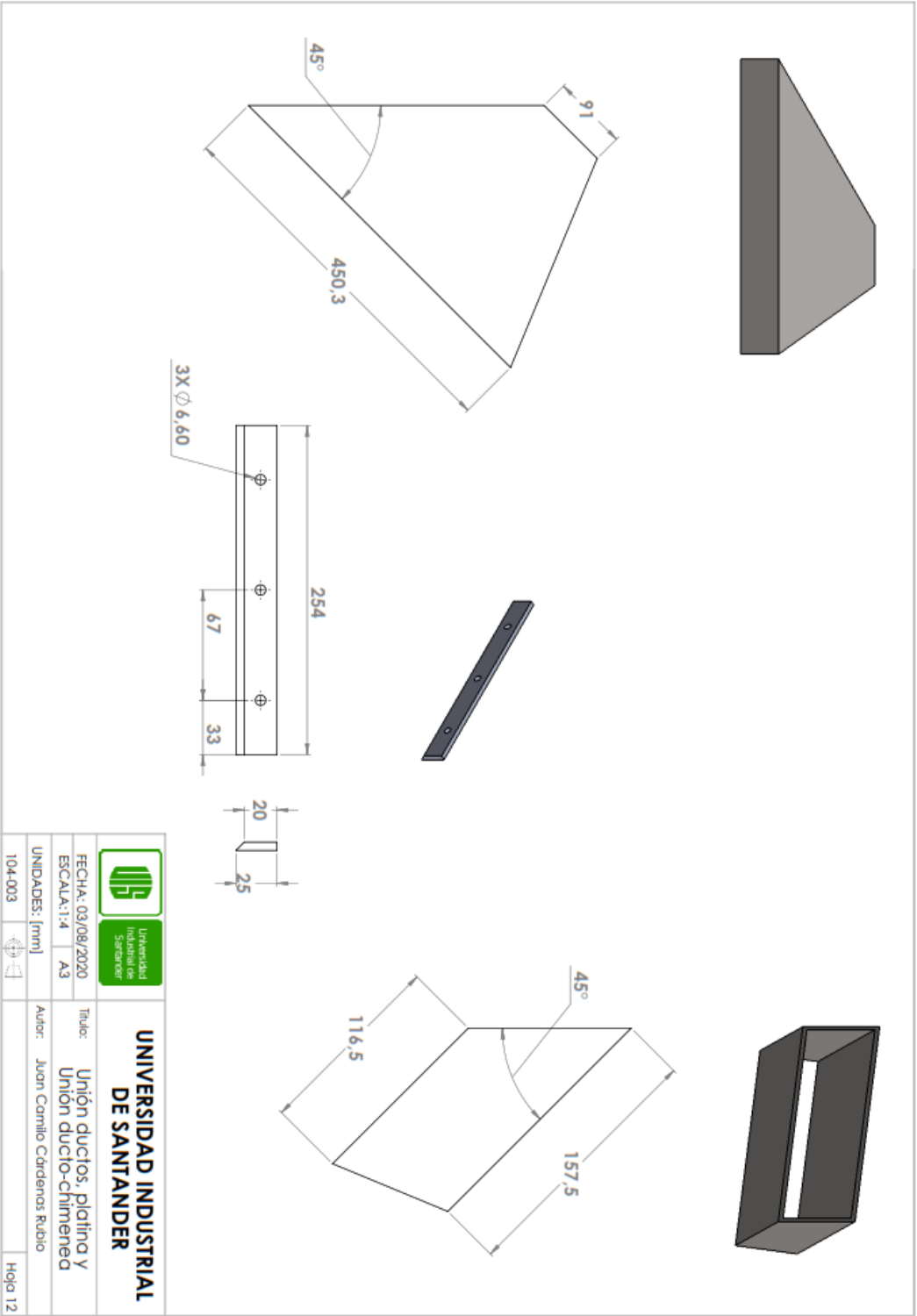


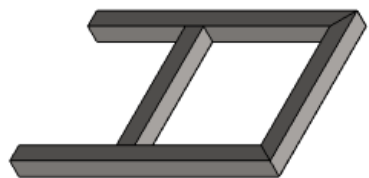
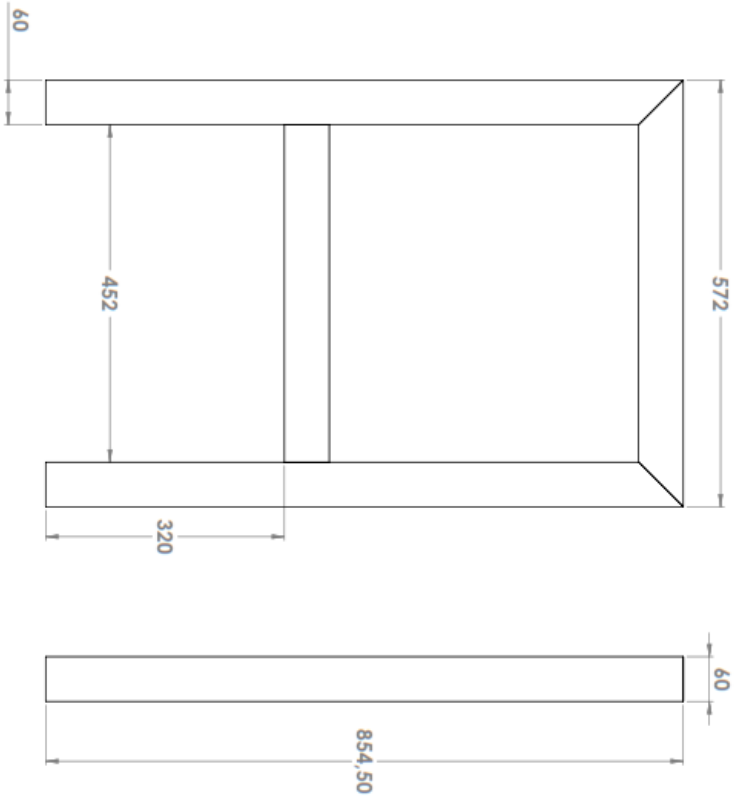


 Universidad Industrial de Santander		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/08/2020	Título: Ductos lado derecho		
ESCALA: 1:5	A3	Autor: Juan Camilo Cárdenas Rubio	
UNIDADES: [mm]			
104-001		Hoja 10	



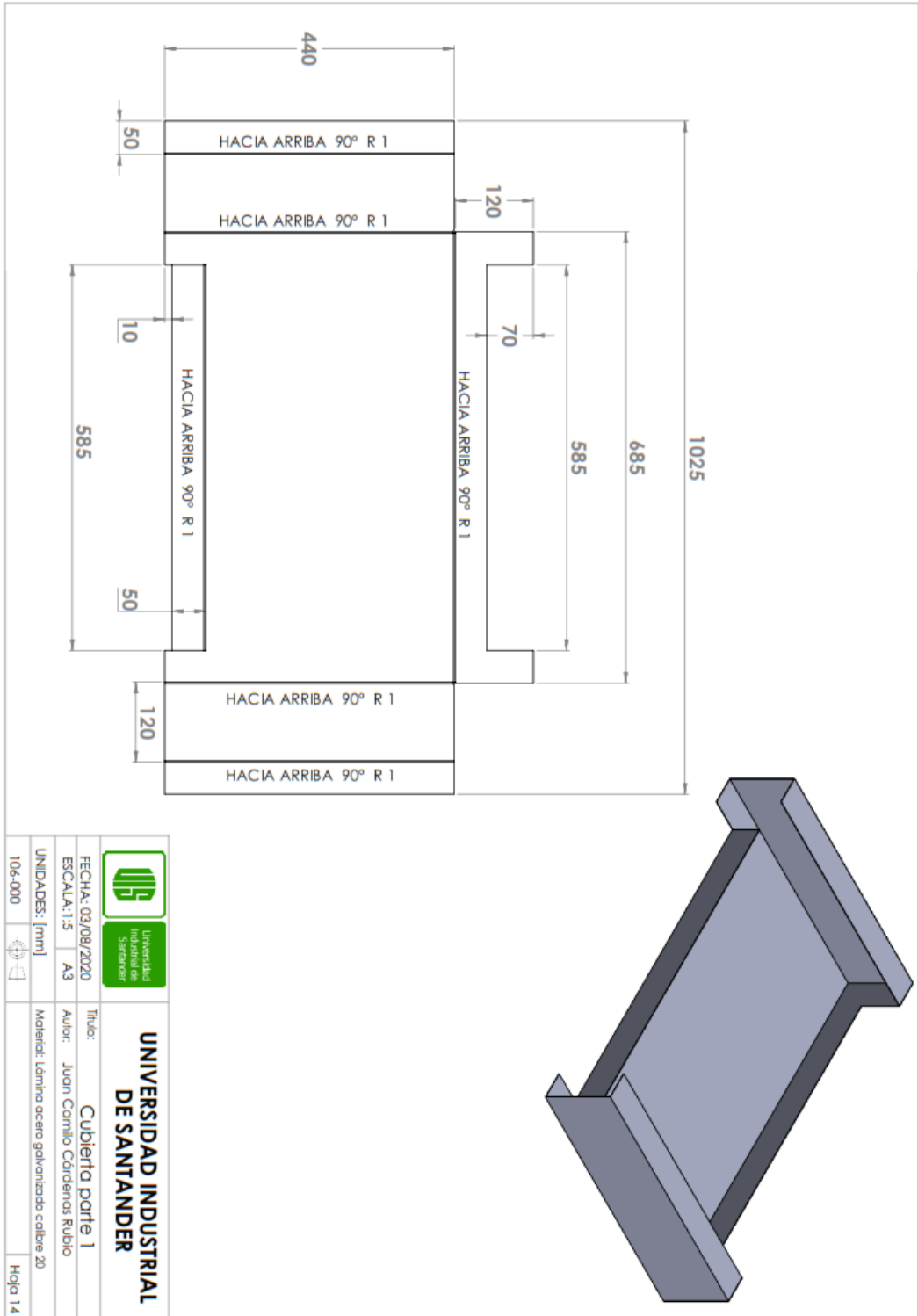
			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Título: Tapón y Ducto lado izquierdo Autor: Juan Camilo Cárdenas Rubio	
FECHA:	03/08/2020	ESCALA:	1:5
UNIDADES:	[mm]		
104-002			
			Hoja 11

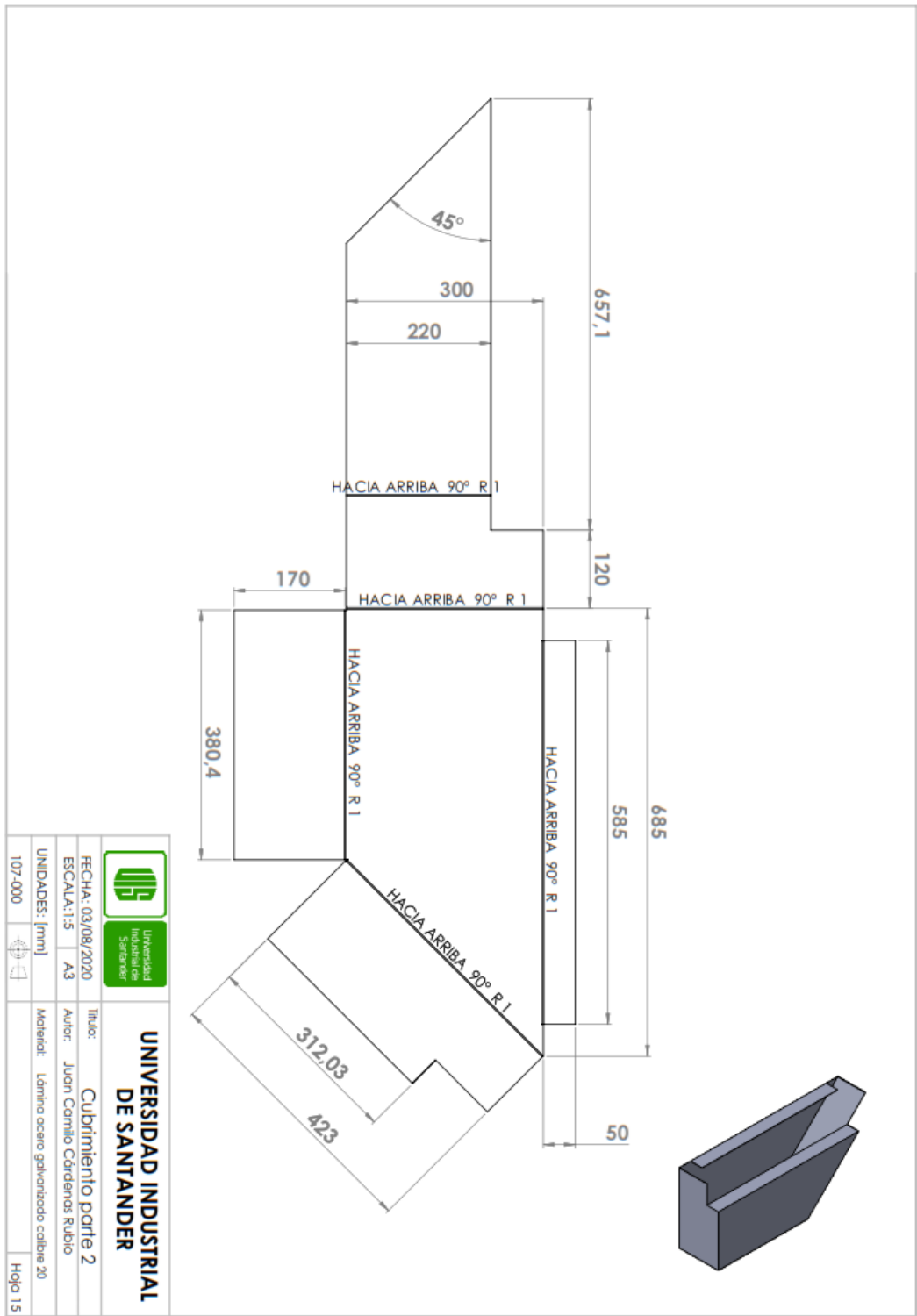




UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2020	Título: SODORTE
ESCALA: 1:5	A3
Autor: Juan Camilo Corderos Rubio	
UNIDADES: [mm]	
105-000	Hoja 13





			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/08/2020	Título: Cubrimiento parte 2	UNIDADES: [mm]	Hoja 15
ESCALA: 1:5	A3	Autor: Juan Camilo Corderos Rubio	
107-000		Materia: Lámina acero galvanizado calibre 20	