

Diseño paramétrico de una estufa tipo Rocket utilizando biomasa lignocelulósica de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) como combustible

Oscar Javier Rojas Rojas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ingeniero Mecánico, Ph. D

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi madre Esperanza Cristancho Rojas, fuente de fortaleza y perseverancia, cuyas profundas enseñanzas y amor incondicional han sido mi faro en este viaje académico.

A mis maestros, Lic. Yesid Javier Rueda Ordoñez que hizo parte de mi trayectoria, que ha guiado mi camino con inspiración y apoyo.

A los sueños que nos impulsan a alcanzar nuevas metas, y a todos aquellos amigos que creen en ellos tanto como yo. Que este trabajo de tesis sea un tributo a la gratitud, la dedicación y la pasión que nos impulsan a seguir adelante.

Agradecimientos

Al maestro de mi trabajo de grado, Yesid Javier Rueda Ordoñez, cuya sabiduría y dedicación han sido una guía invaluable en cada paso de este viaje académico. Su apoyo constante y compromiso inquebrantable han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A los distinguidos profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, cuyo compromiso con la excelencia académica ha enriquecido mi formación profesional y ha sido una fuente constante de inspiración.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Fundamentación integral para el diseño de una estufa Rocket	14
2.1 Antecedentes	14
2.1.1 Desempeño de la combustión de biomasa en cocinas usando CFD.	14
2.1.2 Sostenibilidad de la eficiencia de la transferencia de calor de cocinas de biomasa autoconstruidas.	14
2.1.3 Sintetización de carbón activado usando biocombustible de bajo costo.	15
2.1.4 Uso de la simulación CFD como una herramienta para el diseño de cocinas de biomasa ..	15
2.2 Referentes Teóricos	16
2.2.1 Biomasa.....	16
2.2.1.1 Formación y composición de la biomasa lignocelulosa.	16
2.2.2 Biomasa como fuente de energía	17
2.2.2.1 Propiedades Físicas.....	17
2.2.2.2 Propiedades Químicas.....	18
2.2.2.3 Propiedades Energéticas	20
2.2.2.4 Propiedades termodinámicas	21
2.2.3 Proceso de combustión	21
2.2.3.1 Pirólisis	22

2.2.3.2 Gasificación	23
2.2.4 Estufa tipo cohete (Rocket Stove).....	23
2.2.4.1 Boca de carga.....	23
2.2.4.2 Cámara de combustión.....	23
2.2.4.3 Chimenea	24
3. Metodología de diseño.....	25
3.1 Descripción del modelo matemático:.....	25
3.1.1 Descomposición térmica:.....	27
3.1.2 Combustión homogénea:	29
3.2 Simulación computacional.....	32
3.2.1 Descripción del modelo geométrico	33
3.2.2 Mallado	34
3.2.3 Descripción de condiciones frontera.....	41
3.2.4 Análisis de convergencia de malla.....	42
3.3 Parametrización.....	43
3.4 Resultados.....	45
4. Conclusiones.....	49
5. Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	51

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Mecanismos de reacción de combustión.</i>	28
Tabla 2. <i>Fracción másica volátil de la biomasa.</i>	29
Tabla 3. <i>Composición elemental en el Eucalipto Globulus Labill.</i>	30
Tabla 4. <i>Dimensiones del dominio computacional de la estufa Rocket.</i>	33
Tabla 5. <i>Características de la malla.</i>	35
Tabla 6. <i>Mallado.</i>	36
Tabla 7. <i>Calidad Ortogonal.</i>	38
Tabla 8. <i>Skewness (sesgo).</i>	39
Tabla 9. <i>Relación de aspecto.</i>	40
Tabla 10. <i>Independencia de malla.</i>	42

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Estructura base de la biomasa.</i>	17
Figura 2. <i>Proceso de combustión de biomasa.</i>	22
Figura 3. <i>Estufa Rocket.</i>	24
Figura 4. <i>Piezas de la estufa Rocket.</i>	32
Figura 5. <i>Geometría de la estufa Rocket.</i>	34
Figura 6. <i>División del dominio computacional en caras.</i>	36
Figura 7. <i>Parametrización de la estufa Rocket.</i>	44
Figura 8. <i>Contorno de temperatura en el dominio computacional de la Rocket.</i>	45
Figura 9. <i>Contorno de velocidad de la combustión de gases volátiles.</i>	46
Figura 10. <i>Contorno de fracción másica de NOx en el dominio computacional de la Rocket.</i>	47

Lista de Apéndices

Apéndice A. <i>Configuración de ANSYS</i>	54
Apéndice B. <i>Planos en Detalle</i>	55

Resumen

Título	Diseño paramétrico de una estufa tipo Rocket utilizando biomasa lignocelulósica de eucalipto (<i>Eucalyptus Globulus Labill</i>) como combustible
Autor:	Oscar Javier Rojas Rojas
Palabras clave:	Combustión, biomasa, rocket, estufa, CFD.

Descripción: El uso de leña en las cocinas de los hogares de las áreas rurales presenta riesgos para el medio ambiente, como contaminación del aire y la deforestación, así como afectación en la salud. El propósito es diseñar una estufa Rocket que emplee biomasa sólida para cocinar en el municipio de Betétiva (Boyacá), ya que no cuenta con gas por tubería y muchos de sus habitantes utilizan cocinas de leña y carbón. Para mejorar la eficiencia y funcionalidad, se empleó un diseño con la siguiente línea metodológica que incluyó: (i) Descripción del modelo matemático (ii) Simulación computacional (iii) Parametrización (iv) Resultados. Los resultados de la tesis revelan que la estufa Rocket alcanzó una temperatura máxima de 1470 K en la primera cámara de combustión. La velocidad del fluido alcanzó los 47 m/s debido a la ley de continuidad, se observó una fracción másica relativamente de cero en los gases NO_x, aunque se enfatizó la importancia de considerar las emisiones durante los cambios de estado y la necesidad de modelar la simulación del hollín y el carbón fijo, para comprender mejor las emisiones de gases contaminantes. Las conclusiones revelan aproximaciones de una estufa Rocket con características específicas y una detallada caracterización de la biomasa. La simulación de la combustión arrojó temperaturas máximas en la cámara de combustión de la estufa, y la parametrización del diseño mejoró la uniformidad del perfil de velocidades. Se destacó el papel crucial de la simulación en la evaluación y mejora del diseño, aunque se reconoció la simplificación de los procesos de combustión. A pesar de continuar con la combustión tradicional en los hogares, la simulación muestra la viabilidad de una estufa Rocket eficiente.

Abstract

- Title:** Parametric design of a rocket type stove using eucalyptus lignocellulosic biomass (*Eucalyptus Globulus Labill.*) as fuel.
- Author:** Oscar Javier Rojas Rojas
- Key Words:** Combustion, biomass, rocket, stove, CFD.

Description: The use of firewood in household kitchens in rural areas presents risks to the environment, such as air pollution and deforestation, as well as affecting health. The purpose is to design a Rocket stove that uses solid biomass for cooking in the municipality of Betétiva (Boyacá), since it does not have piped gas and many of its inhabitants use wood and charcoal stoves. To improve efficiency and functionality, a design was used with the following methodological line that included: (i) Description of the mathematical model (ii) Computational simulation (iii) Parameterization (iv) Results. The results of the thesis reveal that the Rocket stove reached a maximum temperature of 1470 K in the first combustion chamber. The velocity of the fluid reached 47 m/s, due to the continuity law, a relatively zero mass fraction was observed in the NO_x gases, although the importance of considering emissions during state changes and the need to model the simulation of soot and fixed coal was emphasized, in order to better understand emissions of polluting gases. The findings reveal approximations of a Rocket stove with specific characteristics and a detailed characterization of biomass. Combustion simulation yielded maximum temperatures in the stove's combustion chamber, and design parameterization improved speed profile uniformity. The crucial role of simulation in evaluating and improving design was highlighted, although the simplification of combustion processes was recognized. Despite continuing traditional combustion in homes, the simulation shows the viability of an efficient Rocket stove.

Introducción

En Colombia, la mayoría de las cocinas y estufas en las zonas rurales, se encuentran llenas de leña para usarlas en la cocción de sus alimentos. Esto representa un problema para la salud, si no se realiza de la manera correcta, ya que se contamina el aire interior de las viviendas; además, aumenta la degradación de los bosques, contribuyendo al efecto invernadero y aumenta los contaminantes en la atmosfera. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016)

Debido al desarrollo social permeable en Colombia, el acceso a la energía es el principal problema para las condiciones de vida. Según el DANE, en el 2018 se determinó que aquellos hogares que hacen uso de leña como principal fuente energética en la cocción de alimentos es de 1.664.229. Igualmente, en el 2014, el DANE informó que 4900 mujeres habían fallecido a causa de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), ya que ellas eran quienes pasaban mayor parte del tiempo en el hogar junto a sus hijos. (Contrato UPME C-031-2019, 2019)

El problema mencionado anteriormente se debe a la mala optimización que tiene el sistema térmico de la transferencia de energía de la estufa. Esto lleva a un aumento en el consumo del biocombustible, por su combustión incompleta, puesto que estas estufas son hechas artesanalmente, por lo general en ladrillo o barro; es decir sin conocimiento teórico acerca de los procesos de calidad de la combustión y del diseño geométrico de la estufa.

En virtud de lo anterior, se realizará el diseño bajo la parametrización térmica y de transferencia de calor de una estufa Rocket, con el objeto de encontrar las características geométricas que aumenten la transferencia de calor, la seguridad y disminuya las emisiones contaminantes y los costos; de este modo, se hacen aportes al avance en el campo académico.

El diseño de la estufa Rocket se realiza con el fin de sustituir prototipos artesanales, lo que se quiere es brindar calidad de vida en los hogares rurales colombianos, ya que se reduce las emisiones contaminantes liberadas al medio ambiente. De la misma forma se implementa una transición del cambio de combustibles fósiles al uso de biomasas, puesto que la contaminación ambiental es una problemática que afecta a todos los habitantes del planeta (Ianto evans & Leslie Jackson, 2006).

La implementación de un nuevo modelo de cocina reduce de forma significativa los gases que producen las cocinas tradicionales; por ende, las EPOC. Además, La disminución de uso de biomasa evita la deforestación en la zona (Contrato UPME C-031-2019, 2019).

En el desarrollo de este trabajo de grado se diseñará una estufa Rocket que presentará un modelo de parametrización térmica de transferencia de calor, con el fin de realizar un óptimo diseño de dicha estufa que contribuya a aquellos sectores de Colombia donde el acceso al combustible fósil es costoso por su traslado, específicamente en el municipio de Betétiva, ubicada en el departamento de Boyacá. Pero puede ser implementada en cualquier parte, sin embargo, su rendimiento se verá afectada por las condiciones ambientales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de estufa Rocket que utilice biomasa sólida como fuente de energía para la cocción de alimentos en Betétiva (Boyacá), donde no se dispone de acceso a gas por tubería.

1.2 Objetivos Específicos

Diseñar una estufa Rocket con requerimientos de funcionamiento que incluyan la caracterización de la biomasa a utilizar, así como una interfaz intuitiva y piezas fáciles de limpiar y reemplazar.

Simular el diseño de la estufa Rocket mediante la herramienta numérica ANSYS, analizando la distribución de temperaturas y determinando los puntos críticos.

Parametrizar el diseño de la estufa Rocket a partir de la inspección de las áreas que mejoren dicho diseño para hacerlo más eficiente y funcional.

2. Fundamentación integral para el diseño de una estufa Rocket

2.1 Antecedentes

Se presentan algunas investigaciones que ayudan como referentes teóricos para el desarrollo del diseño de la estufa Rocket, brindando un mejor entendimiento de cada uno de los parámetros para su desarrollo.

2.1.1 Desempeño de la combustión de biomasa en cocinas usando CFD.

En este artículo muestra un modelo axisimétrico validado con pruebas experimentales, usado con el fin de predecir temperaturas y flujos dentro de la estufa, con la ayuda de submodelos de combustión, turbulencia y transferencia de calor; igualmente, se encontró un coeficiente de absorción de 7.5 m^{-1} , y una potencia de fuego de 4 KW; luego, se estableció un modelo que relaciona la potencia de fuego, la tasa de flujo de aire y el exceso de aire. Al final, se establece que el aumento de consumo de combustible incrementa las temperaturas del gas, con una potencia de fuego de 5 KW el exceso de aire es 3 veces mayor a partir del balance estequiométrico y la temperatura de la estufa se establece entre los 300 K y los 1800 K (Pundle, Sullivan, Means, Posner & Kramlich, 2019).

2.1.2 Sostenibilidad de la eficiencia de la transferencia de calor de cocinas de biomasa autoconstruidas.

Este trabajo de investigación se centró en el diseño y optimización de un “Fogón mejorado de adobe”, usando la herramienta de cálculo CFD que trae el software “STAR CCM+”; se presentó el impacto de las diferentes alternativas de diseño, junto con la implementación de cambios de geometría o adición de elementos que al integrarlos representan un aumento en la eficiencia del sistema; el trabajo mostró los resultados base, calor en plancha

597.1 (W/m²), temperatura media de plancha 99.81 [°C], eficiencia de transferencia de calor en plancha 6.75%. (Luzuriaga, 2015).

2.1.3 Sintetización de carbón activado usando biocombustible de bajo costo.

Se desarrolló el diseño de una estufa Rocket para producir carbón activado, usando cáscara de coco, hueso de aceituna como fuente de combustible; el diseño paramétrico fue llevado en dos fases: una, “GUI-MATLAB” y otra, en “FLUENT-ANSYS”. Con el fin de obtener la temperatura promedio de la cámara de combustión que alcanza los 1800 [K], se usó un flujo de combustible de 0.0010 Kg/s. En una estufa con entrada de combustible a 45°, se usó material perlita para el aislamiento de la cámara de combustión y la chimenea; para la estructura se seleccionó acero inoxidable H525. También, se encontró que la relación aire-combustible debía ser del 40% de exceso. (Vásquez Bazán, 2017).

2.1.4 Uso de la simulación CFD como una herramienta para el diseño de cocinas de biomasa

Se realizó un estudio de recopilación de información sobre la implementación de simulación CFD en el diseño de estufas de biomasa, se presenta con detalle una colección de resúmenes de trabajos sobre los fenómenos físicos como: transferencia de calor, flujo de fluidos, pirolisis y combustión; se expresa que el problema de optimización se puede formular mediante una computadora, en un tiempo corto y a costos inferiores con el fin de predecir el rendimiento de la estufa real. Además, se menciona como funcionan los modelos y su interconexión que cada Autor encontró durante sus investigaciones (Ravi et al., 2002).

2.2 Referentes Teóricos

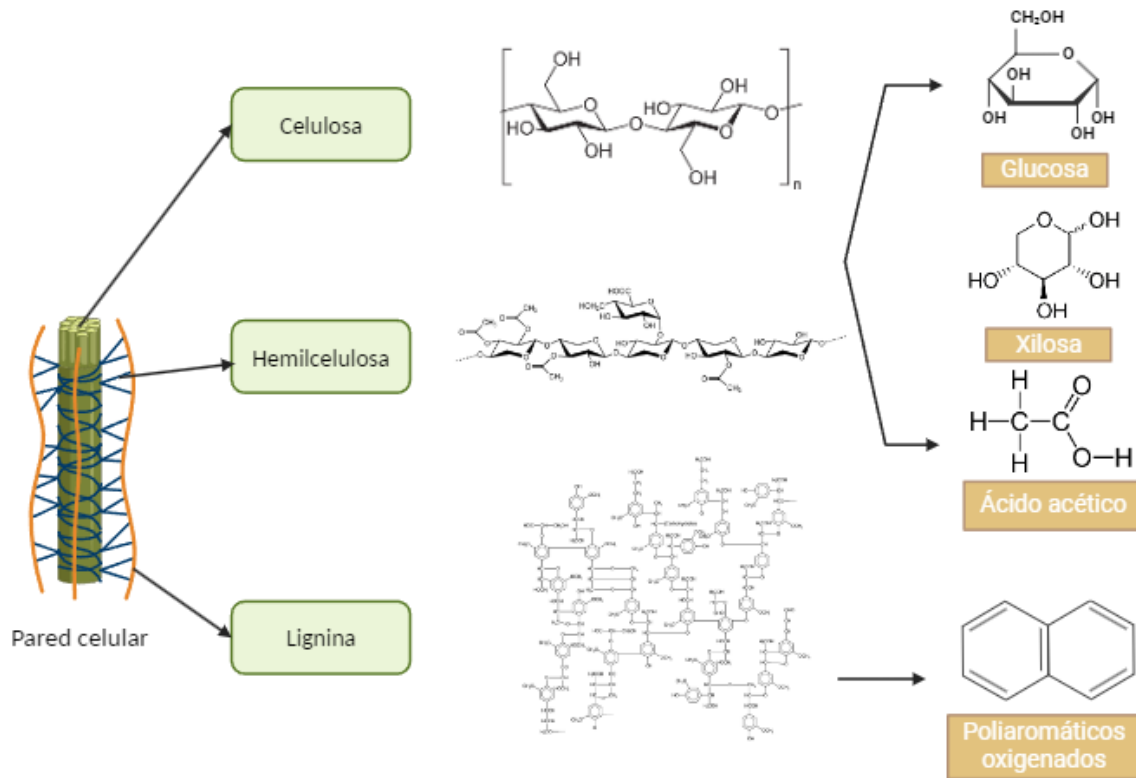
Debido a que la fuente más importante para el consumo en Colombia es el gas natural, se hace necesario establecer un cambio de fuente de energía para la cocción de alimentos cuyo punto de partida fue el incremento de la demanda de combustibles renovables durante el periodo de pandemia, lo que llevó a la revisión de otros horizontes con respecto a las formas de obtención de energía térmica.

2.2.1 Biomasa

Según Padilla Sherly (2009) citado por Bazán Brian, (2017), la biomasa es una sustancia orgánica capaz de almacenar energía, se encuentra presente en fuentes naturales, su característica principal es ser inagotable, debido a que cumple con un ciclo de recirculación y aprovechamiento, dicho ciclo se evidencia de manera clara en el proceso de la fotosíntesis con la creación de nueva materia orgánica para sustento de la vida animal.

La biomasa origina tres tipos de materia prima para la bioenergía: lípidos, azúcares, lignocelulosa. Es importante aclarar que esta última está compuesta de hidratos de carbono complejos y moléculas no carbohidratadas presentes en las hojas y tallos de las plantas (Elorza Juan, 2015)

2.2.1.1 Formación y composición de la biomasa lignocelulosa. Según Elorza Juan, (2015), Los componentes en la biomasa lignocelulosa son una mezcla de hemicelulosa (15-25%), celulosa (50%), lignina (20-30%) y extractos (<1%), que presenta una proporción dependiente de su especie. Representa una de las mayores fuentes de energía con una contribución del 14% del consumo mundial, en comparación al carbón y a los gases, con un aporte del 12 y el 15% respectivamente (Figura 1).

Figura 1.*Estructura base de la biomasa.*

Nota. Adaptado de: (Basu Prabir, 2013).

2.2.2 Biomasa como fuente de energía

La biomasa es la materia prima para la producción de distintos biocombustibles, tales como combustibles sólidos, líquido y gaseosos, cada uno de ellos obtenido con un proceso diferente.

2.2.2.1 Propiedades Físicas Dentro de estas propiedades se encuentra la densidad la humedad y la distribución granulométrica, esta última define el estado en el que se seleccione la biomasa, ya sea en ramas, astillas, hojas secas, entre otras. (Mendoza & Aguirre, 2016)

Densidad: Se puede encontrar dentro de los más importantes dos tipos de densidades con base en la norma ASTM D4052 18^a (Rodríguez Navarrete et al., 2024). La densidad real se representa como el peso por unidad de volumen ocupado por el sólido constituido de biomasa (Ecuación 1); mientras que, la densidad aparente está basada en el volumen aparente la cual incluye el volumen poroso (Basu Prabir, 2013).

$$\rho_{real} = \frac{\text{Peso total de biomasa}}{\text{Volumen solido de biomasa}} \quad (1)$$

Higroscopicidad: La biomasa demasiado húmeda incrementa los niveles de monóxido de carbono (CO) y partículas finas (PF); además, se reduce el poder calorífico. Los valores de humedad entre 10 y 15% queman a ritmo constante, por otro lado, la madera muy seca genera incremento en emisiones al quemarse excesivamente rápido; igualmente, el contenido del agua se puede clasificar en tres categorías, (Ilunga, 2021):

- Agua libre, eliminada sin que la biomasa se encoja.
- Agua ligada, atrapada en la estructura de la biomasa, provoca contracción al evaporarse.
- Agua de constitución, se libera solo por combustión.

2.2.2.2 Propiedades Químicas Estas hacen referencia a las composiciones químicas de la biomasa, como también, al contenido de ceniza. Para caracterizar las propiedades químicas se realizan dos tipos de análisis: el último y el próximo.

Análisis último: También llamado análisis elemental, basado en la norma ASTM D5373-93 (Rodríguez Navarrete et al., 2024), determina los porcentajes en peso de los elementos que

constituyen la biomasa. Con el fin de determinar la relación de aire que es necesaria para que ocurra el proceso de combustión ideal (Mendoza & Aguirre, 2016). Expresada de la siguiente manera, (Ecuación 2).

$$C + H + O + N + S + Cz + Hd = 100\% \quad (2)$$

En la cual se representa los porcentajes en masa de los componentes; además, la humedad está representada por la letra (Hd), y la ceniza como (Cz) (Basu Prabir, 2013).

Análisis próximo: Se basa en la norma ASTM D5142 (Rodríguez Navarrete et al., 2024), también llamado análisis inmediato, determina: Hd, Cz, materia volátil (MV) y el carbono fijo (CF) de la biomasa, en el cual el material volátil está representado por gases y vapores, que al ser oxidados a altas temperaturas se consumen; de este modo, el CF es aquel que se queda en las cenizas (Mendoza & Aguirre, 2016), (Ecuación 3).

$$MV + CF + Hd + Cz = 100\% \quad (3)$$

Donde cada componente representa el peso porcentual del material volátil de cada elemento descrito.

Contenido de cenizas: Basado en la norma ASTM D-1102 (Rodríguez Navarrete et al., 2024), es la consecuencia de la oxidación de los elementos minerales que están entre el 0.3 y un 0.8 %. Sus principales ingredientes son el sílice, aluminio, hierro y calcio; las cenizas pueden llegar a ser un foco de inconvenientes debido a la creación de escoria y, por ende, taponamiento de las rejillas y problemas de corrosión (Ilunga, 2021).

2.2.2.3 Propiedades Energéticas Conocidas también como poder calorífico (PC), representan la energía química que puede ser transformada en energía térmica por medio de la combustión (Mendoza & Aguirre, 2016).

El valor que posee el PC refiere a condiciones normales, es decir 273 K y a la presión atmosférica de 1 atm, (101325 Pa) se expresa con las siguientes unidades $\frac{kJ}{Kg}$, se precisan dos tipos principales de PC: Poder calorífico superior (PCS) y Poder calorífico inferior (PCI) (Ilunga, 2021).

PCS: También conocido como valor calorífico en bruto. Se define como la cantidad de calor liberado por unidad de masa o volumen inicialmente a 25 °C, una vez quemado y sus productos regresen a la misma temperatura. Asimismo, el PCS incluye el calor latente de vaporización del agua, el PCS nos ayuda a expresar la eficiencia térmica de un sistema, aunque depende del tipo de base que se define en este caso (base seca). (Basu Prabir, 2013).

PCI: También conocido como el poder calorífico neto. Se define como la cantidad de calor liberado al quemar completamente una cantidad específica menos el calor de vaporización del agua en el producto de la combustión.(Basu Prabir, 2013),La ecuación que relaciona los dos tipos de calor específico se define así:

$$PCI = PCS - h_g \left(\frac{9H}{100} - \frac{Hd}{100} \right) \quad (4)$$

Donde h_g es el calor latente de vaporización, H % de hidrogeno, Hd % de humedad

Se hace uso de dos ecuaciones propuestas por (Yin, 2011) para determinar el PCS tal que:

$$PCS = 0.2949 C + 0.8250 H \quad (5)$$

$$PCS = 0.1905 MV + 0.2521 CF \quad (6)$$

Correlaciones basadas en el análisis último y el próximo como se realizó en el estudio de la descomposición térmica del eucaliptus globulus (Sharma & Diwan, 2017)

2.2.2.4 Propiedades termodinámicas

Calor específico: Es un indicador de la capacidad de calor de una sustancia, tanto la humedad como la temperatura afectan el calor específico, por otro lado, la densidad ni la especie de la madera tiene influencia sobre el calor específico

Calor de formación: También se le conoce como entalpia de formación de 1 mol de elementos constitutivos de la biomasa en estado estándar es decir a (25 °C, 1 atm); Por ejemplo, el H_2 y el O_2 son estables en su forma elemental, por ello su entalpia de formación es cero, sin embargo, un valor de energía (241.5 kJ) es liberado por mol cuando estos se combinan en estado gaseoso (Basu Prabir, 2013)

Temperatura de ignición: Es una propiedad importante para cualquier combustible porque la reacción de combustión del material solo comienza cuando la temperatura supera este umbral. La velocidad de la reacción exotérmica aumenta cuando se agrega calor al combustible desde una fuente externa, lo que aumenta la generación de calor, la tasa de generación de calor iguala o supera la tasa de pérdida de calor cuando la temperatura alcanza un punto específico. En este punto, el proceso se vuelve autosostenible y la temperatura mínima requerida se conoce como temperatura de ignición (Basu Prabir, 2013).

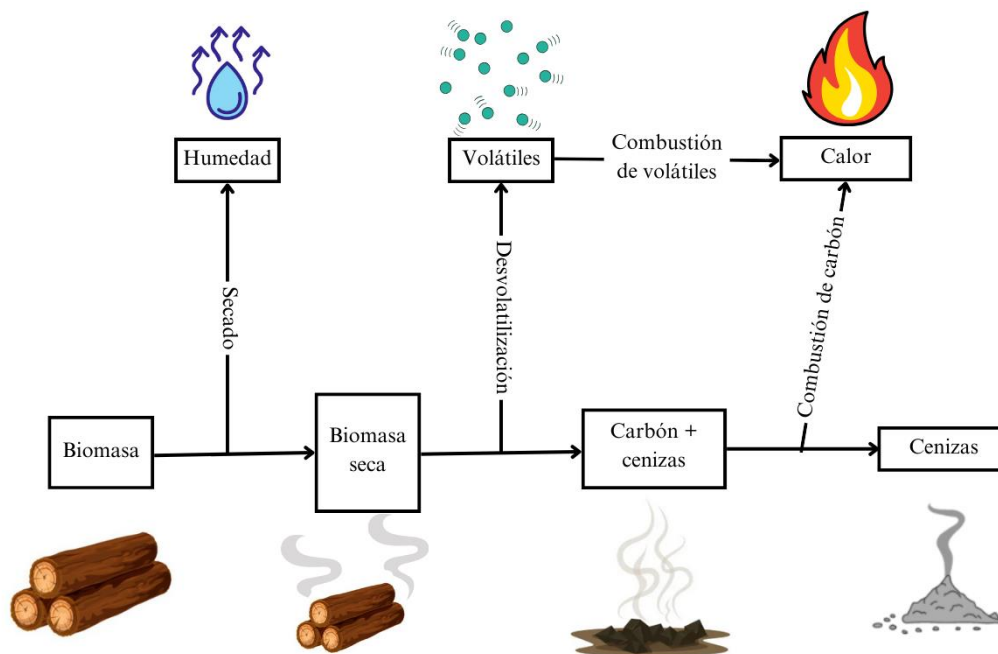
2.2.3 Proceso de combustión

Se presenta como un conjunto de reacciones complejas de oxidación producida por el combustible y el comburente, biomasa y oxígeno respectivamente; además, es importante tener en cuenta la energía de activación. (Ilunga, 2021). En general se engloban cuatro etapas en la

combustión: secado, pirólisis, gasificación y combustión. Esta primera etapa, se define como la eliminación de la humedad en la superficie de la biomasa, puede alcanzar temperaturas de hasta 120°C. La combustión opera de modo continuo o discontinuo, con aire forzado o natural; (Saldarriaga Elorza,2015), (Figura 2).

Figura 2.

Proceso de combustión de biomasa.



Nota. Adaptado de: (Ghiwe et al., 2023).

La combustión estequiométrica es un proceso que no se puede llegar a cabo, y que obliga a maniobrar con excesos de aire de hasta un 20 %, para el cual se define un coeficiente de exceso de aire (Ilunga, 2021).

2.2.3.1 Pirólisis Esta segunda etapa está centrada en la posibilidad de valorar los productos gaseosos, líquidos y sólidos. La descomposición de la biomasa en ausencia de oxígeno es un proceso a temperaturas entre los 400 y 600 °C (Flego, 2019), que genera un líquido

llamado bio-oil, constituido por la despolimerización y fragmentación de la lignocelulosa. Por otro lado, la fracción sólida generada está constituida por carbono y cenizas.

2.2.3.2 Gasificación La tercera etapa brinda información sobre la volatilización, se logra optimizar con el máximo rendimiento del proceso realizado a temperaturas entre 1073 – 1373 K, y su composición de gases principalmente es CO , CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 (Elorza, 2015).

2.2.4 Estufa tipo cohete (Rocket Stove)

Esta estufa aprovecha de forma eficiente la biomasa, presenta una chimenea vertical aislada, que asegura una combustión efectiva. Los principios de la estufa Rocket fueron descritos por el Dr. Larry Winiarsky (Vásquez Bazán, 2017).

El funcionamiento de la Rocket Stove, se produce por la diferencia de densidades entre los gases fríos y los gases calientes, debido al fenómeno conocido por el nombre de “efecto chimenea” que sucede cuando se tiene gases calientes en un ducto, estos gases calientes van a arrastrar nuevos gases por la boca del ducto; además el volumen de gases que avanzan deja una depresión que se llena con los gases que vienen inmediatamente detrás, el efecto se magnifica al incrementar la altura del ducto chimenea (Flego, 2019) .

Dentro de los principales componentes de la estufa Rocket encontramos: Boca de carga, cámara de combustión y chimenea, que se explican a continuación:

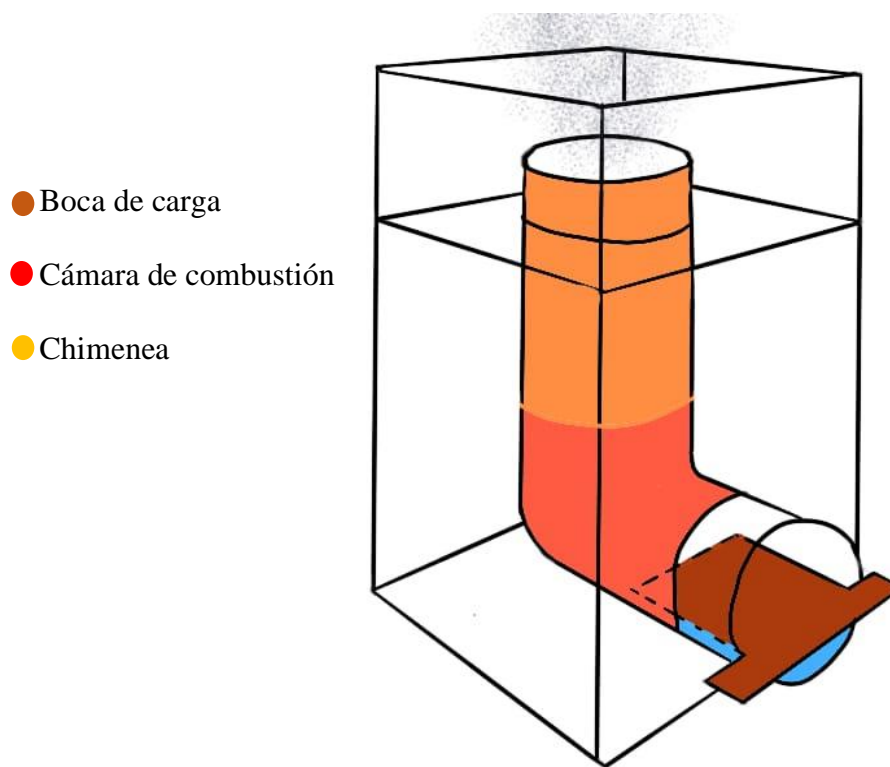
2.2.4.1 Boca de carga Puerto de entrada por el cual ingresa la biomasa gracias a la fuerza de la gravedad; además la almacena, mientras ocurre el proceso de combustión en la parte más baja de la cámara, debido a que solo se enciende por la parte baja.

2.2.4.2 Cámara de combustión Se realiza la combustión de la biomasa liberando gases volátiles, direccionándolos hacia la salida por la torreta o chimenea (Flego, 2019).

2.2.4.3 Chimenea Los gases tienen que terminar de combustionar, se puede considerar como una segunda cámara de combustión, liberando la energía térmica faltante. Se conoce que se superan las temperaturas de los 600 °C (Flego, 2019).

Figura 3.

Estufa Rocket.



Nota. Basado en la Winiarski Rocket Stove.

3. Metodología de diseño

3.1 Descripción del modelo matemático:

Las ecuaciones necesarias para desarrollar cualquier modelo en el espacio de ANSYS-FLUENT basado en presión, parten de los balances de continuidad, momento y energía en los diferentes volúmenes finitos generados por el mallado de la geometría propuesta, las ecuaciones que se resuelven de manera iterativa se presentan a continuación (Ramírez Santiago, 2010):

Ecuación global de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{(\partial \rho u_x)}{\partial x} + \frac{(\partial \rho u_y)}{\partial y} + \frac{(\partial \rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Donde:

ρ Es igual a la densidad del fluido.

u_x, u_y, u_z Son las componentes de las velocidades en las direcciones x, y, z .

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ Es la derivada parcial de la densidad respecto al tiempo.

Se encuentra escrita en coordenadas rectangulares, además, debido al análisis estacionario el primer término es cero, y las dimensiones espaciales se reducen a dos. Este mismo juicio se tiene en cuenta para los otros modelos matemáticos usados y descritos a continuación.

Se presenta la ecuación de conservación de masa de las especies definida como:

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + u_x \frac{\partial \rho_j}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho_j}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho_j}{\partial z} = D_j \left(\frac{\partial^2 \rho_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho_j}{\partial z^2} \right) + R_{M,j} \quad (8)$$

Donde cada especie química (j), (D_j) su termino de difusión y su densidad, (ρ), se asumen como constantes; La tasa de consumo o producción de especies (j) se define con el termino, ($R_{M,j}$), al igual que con la ecuación global se hacen simplificaciones según nuestro modelo.

Ecuación de conservación de energía:

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \\ + \mu \left(\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \right) + R_Q \end{aligned} \quad (9)$$

Donde se expresa la viscosidad como (μ), la conductividad térmica (λ), la densidad (ρ), el poder calorífico (c_p), como el termino de adición o sustracción de energía expresado como (R_Q).

Ecuación de conservación de movimiento:

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (10)$$

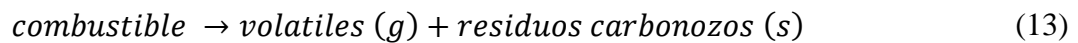
$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (12)$$

3.1.1 Descomposición térmica:

Se conoce como desvolatilización al proceso que comprende la descomposición térmica de la materia en presencia de oxígeno, como se puede ver en la siguiente sección se encuentra la combustión homogénea.

Para aquellas partículas pequeñas isotérmicas de combustible con $Bi \ll 0.1$ se puede asumir que la descomposición térmica se limita por la cinética química, este modelo se representa de la siguiente manera:



Su tasa de reacción esta expresada según:

$$\frac{dm_f}{dt} = k_0(m_{f-\infty} - m_f)^n \quad (14)$$

Tal que m_f es la masa de combustible y el subíndice ∞ es el valor final, el orden de la reacción esta expresada en el exponente n , y k_0 es la constante de velocidad de reacción de Arrhenius expresada como:

$$k_0 = A * e^{\left(\frac{-E}{RT_p}\right)} \quad (15)$$

Como A es el factor pre-exponencial, E es la energía de activación, T es a la temperatura del combustible, R es la constante universal de los gases, el modelo no diferencia la descomposición de la celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en la biomasa.

Se considera el siguiente mecanismo de reacción usado por diversos autores (García Sánchez et al., 2023), (Tabla 1).

Tabla 1.

Mecanismos de reacción de combustión.

Reacciones de combustión		Factor preexponencial	Energía de activación
		$A \left[\frac{m^3}{kgmol} \right]$	$E \left[\frac{kJ}{kgmol} \right]$
R1	$C_6H_6 + \frac{9}{2}O_2 \rightarrow 6CO + 3H_2O$	1.3496×10^9	1.256×10^8
R2	$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	5.012×10^{11}	2×10^8
R3	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	9.87×10^8	3.1×10^7
R4	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	2.239×10^{12}	1.702×10^8
R5	$H_2O + CO \rightarrow CO_2 + H_2$	2.780	1.255×10^7
R6	$CO_2 + H_2 \rightarrow H_2O + CO$	93690	4.659×10^7

Nota. Adaptado de: “Biomass Combustion Modeling Using OpenFOAM: Development of a Simple Computational Model and Study of the Combustion Performance of Lippia origanoides Bagasse.” de García Sánchez, G. F., Chacón Velasco, J. L., Fuentes Díaz, D. A., Rueda-Ordóñez, Y. J., Patiño, D., Rico, J. J., & Martínez Morales, J. R., 2023, p. 7, Energies, 16, 2932.

Se establece entonces, la fracción másica de los volátiles del eucalipto en el proceso de combustión de la biomasa según galgano con una modificación menor (Pundle et al., 2019),(Tabla 2).

Tabla 2.*Fracción másica volátil de la biomasa.*

Especies	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂</i>	<i>H₂O</i>
Fracción másica	0.383	0.273	0.032	0.312

Nota. Adaptado de “Predicting and analyzing the performance of biomass-burning natural draft rocket cookstoves using computational fluid dynamics.” De Pundle, A., Sullivan, B., Means, P., Posner, J. D., & Kramlich, J. C., 2019, p. 3, *Biomass and Bioenergy*, 131.

3.1.2 Combustión homogénea:

La combustión en fase gaseosa se da debido a que los reactantes se encuentran en la fase continua (gas) a esto se le conoce como combustión homogénea, para Atreya en 1998 según (Beng Hugh Burnham, 2008) sugiere que deben cumplirse diferentes criterios para que los volátiles se inflamen: Superar un flujo de masa crítico de entrada de gases volátiles, superar la temperatura crítica del gas en la zona de mezcla de gases y oxígeno.

Para modelar esta combustión se tienen en cuenta dos fenómenos, el transporte de reactivos, así como, el mecanismo que limita la velocidad de combustión. El modelo usado para el transporte de reactivos se denomina (Modelo de transporte de especies) que se define de la siguiente manera:

Los términos fuente en las ecuaciones de continuidad para diferentes especies y ecuaciones de energía afectan las reacciones químicas. Además de ello la biomasa contiene altos porcentajes de material volátil, que se evidencia del análisis próximo de la biomasa seleccionada como eucaliptus globulus (Tabla 3), (Sharma & Diwan, 2017).

Tabla 3.*Composición elemental en el Eucalipto Globulus Labill.*

Composición elemental							
Análisis Próximo (AP)			Análisis ultimo (AU)			Calculado	
<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>VM</i>	<i>CF</i>	<i>Cz</i>	<i>PCS</i> $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$	
47.32	6.35	46.33	90.71	8.21	1.08	AP	AU
						19.2	19.35

Nota. Adaptado de: “Study of thermal decomposition process and the reaction mechanism of the eucalyptus Wood” Sharma, P., & Diwan, P. K., 2017, p. 3, *Wood Science and Technology*, 51(5), 1081–1094.

La ecuación de Modelo de transporte de especies se definida de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_{Mi} + S_i \quad (16)$$

Donde (\vec{J}_i) expresas la difusión de masa para flujos turbulentos y la tasa de producción de especies (i), (R_{Mi}). Cada una de ellas expresadas de la siguiente forma:

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu}{S_c}\right) \nabla Y_i \quad (17)$$

$$R_{Mi} = 2v'_{i,r} M_{w,i} \rho \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\sum_P Y_P}{\sum_i^N v''_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (18)$$

Dado que $(v'_{i,r})$ y $(v''_{j,r})$ representan los coeficientes estequiométricos de los reactivos, (i) , y los productos, (j) , para la reacción (r) , además la fracción másica de los productos, (Y_p) , con el peso molecular para cada especie, $(M_{w,i})$.

Y aquel modelo que limita la velocidad de combustión se denomina (Modelo de disipación de Eddy), esta asume que la tasa de reacción está limitada por la energía cinética turbulenta k junto a la tasa de disipación ϵ , ($k - \epsilon$ estándar), cuando el flujo es turbulento $k/\epsilon > 0$, expresadas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho u_j^k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \rho \epsilon \quad (19)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j^\epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - c_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (20)$$

Usa una ecuación diferencial para la velocidad turbulenta y la otra la longitud turbulenta donde (σ_ϵ) , (σ_k) , $(c_{\epsilon 1})$, $(c_{\epsilon 2})$ estas constantes empíricas tienen los valores de 1,3, 1,0, 1,44, 1,92 respectivamente.

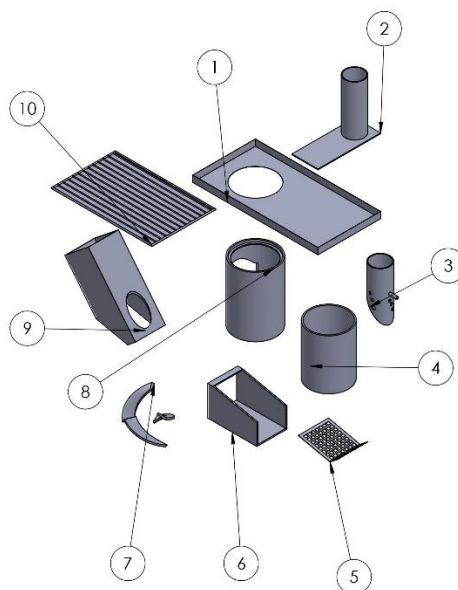
3.2 Simulación computacional

Para llevar a cabo la simulación de la estufa Rocket se emplea el software ANSYS, con la ayuda de un entorno de desarrollo integrado llamado Workbench, adquirido por la Universidad Industrial de Santander, específicamente el paquete de FLUENT, debido a que nos permite seleccionar la caracterización de la biomasa, permite modificar las reacciones de las especies, además parametrizar las entradas y salidas del proceso. prediciendo el comportamiento del flujo.

Con base a la recopilación de información sobre el diseño de la estufa Rocket y aquellas características que mejoran el rendimiento de la estufa, se plantea el siguiente diseño, a continuación, se realizó una serie de simplificaciones, con el fin de seleccionar las variables que presenten mayor importancia en el sistema, además, debido a que la simulación en el software ANSYS es un proceso altamente no lineal y por ende consume alto costo computacional. (Figura 4).

Figura 4.

Piezas de la estufa Rocket.



3.2.1 Descripción del modelo geométrico

Se muestra una representación simplificada bidimensional que puede dar una buena aproximación del comportamiento del flujo del diseño de la estufa tipo rocket que se alimenta lateralmente con biomasa sólida, el combustible ingresa desde la parte inferior de la estufa en forma de gas volátil por medio de entradas circulares de diámetro 10mm representando el modelo de salida de gases. El modelo presenta una segunda entrada de aire que ayuda en la disminución de $PM_{2.5}$ de CO, como lo muestra el estudio de (Caubel et al., 2020) que entra de forma paralela al flujo de la entrada primaria de aire que se encuentra inmediatamente al salir de la cámara de combustión. Siguiendo el recorrido después del elevador de gases se encuentra en la parte superior la plancha (griddle), seguido; se opta por tener un canal estrecho para aumentar la transferencia de energía para posteriormente dirigirse a la chimenea y salida de los gases no volátiles (Figura 5), (Tabla 4).

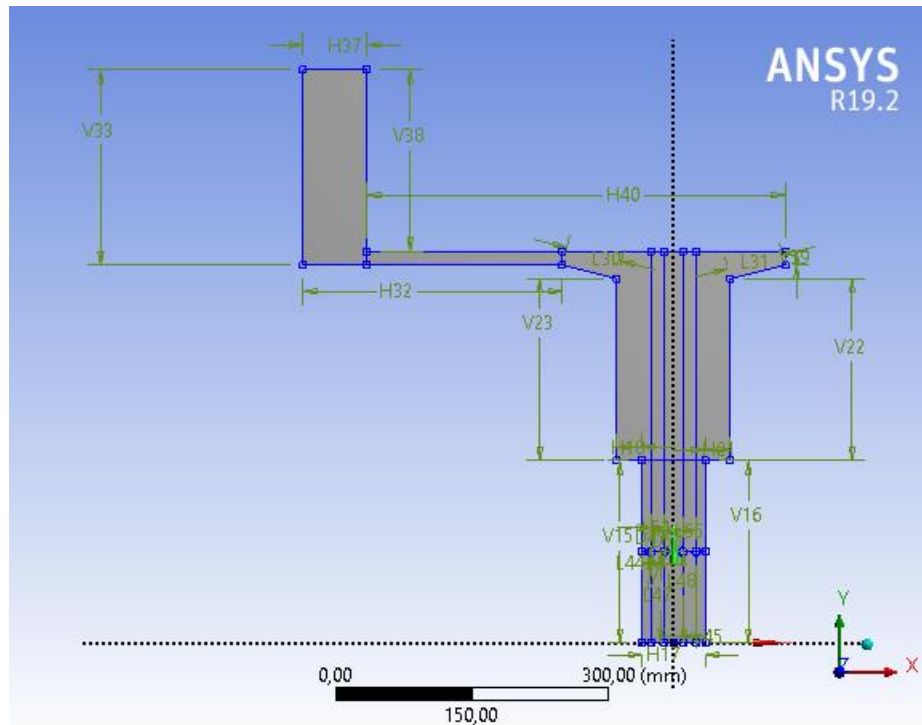
Tabla 4.

Dimensiones del dominio computacional de la estufa Rocket.

Dimensiones [mm]										
H17	H18	H40	H32	H37	V15	V22	V39	V38	V33	L30
70	27.5	460	285	70	200	200	15	200	215	61.847

Figura 5.

Geometría de la estufa Rocket.



Nota: Dimensiones principales de la geometría realizada con Ansys: “Ansys / Engineering Simulation Software”. Disponible en: <https://www.ansys.com/>.

3.2.2 Mallado

Se hace el mallado con la ayuda del gestor de mallas (Ansys Meshing), se realizó un mallado rectangular a la geometría propuesta, al inicio se optó por tener un modelo híbrido de mallado, triangular-rectangular, pero este modelo presentó métricas de calidad de malla deficientes con respecto a las mostradas con la configuración rectangular. Se realizó un refinamiento de malla en las entradas de aire, la salida de gases, la plancha y las paredes, con el fin de tener una mejor predicción del comportamiento de la combustión dentro de la Rocket,

Aproximaciones similares se encuentran en simulaciones documentadas en la literatura. (Pundle et al., 2019a)

Se dividió el mallado en 17 caras con el fin de establecer un mallado de cara para cada una, hace que sea más fácil obtener elementos no sesgados haciendo uso de (Face Split), no se definió (bias) ya que se realizó un mallado de borde (Edge sizing) con comportamiento (hard) y sin tipo de bias, lo cual fue suficiente para establecer una calidad de malla optima que logre predecir el comportamiento del fluido. (Figura 5).

Se logro obtener las siguientes características en la malla:

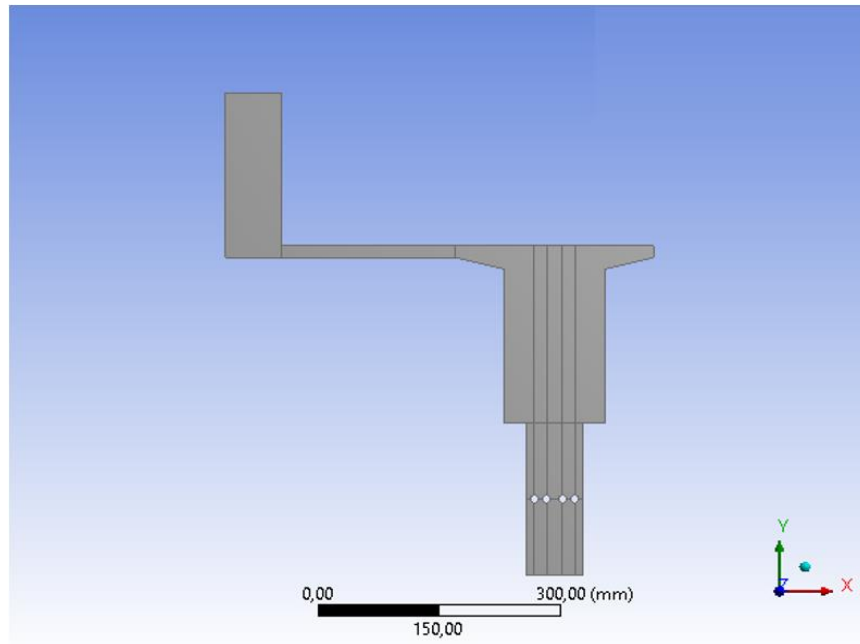
Tabla 5.

Características de la malla.

Número de elementos	66012
Número de nodos	64804

Figura 6.

División del dominio computacional en caras.

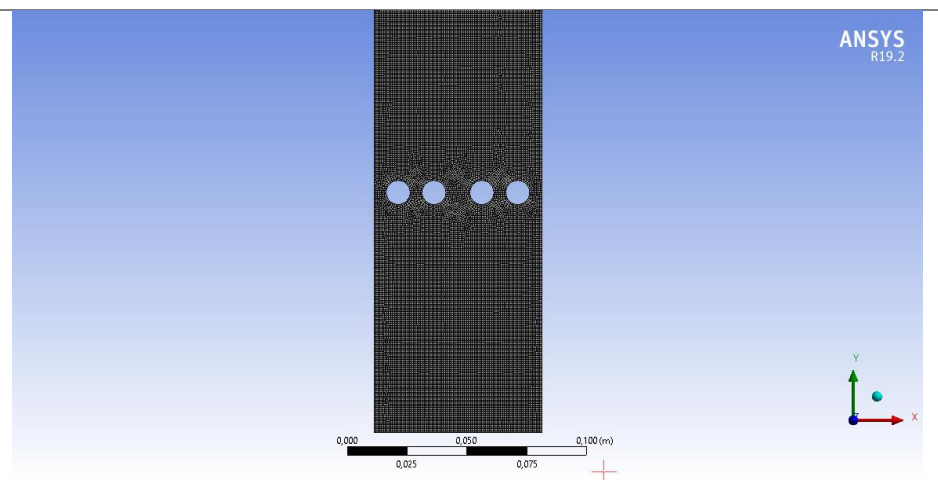


Nota. Elaborado con: “Ansys / Engineering Simulation Software”. Disponible en: <https://www.ansys.com/>.

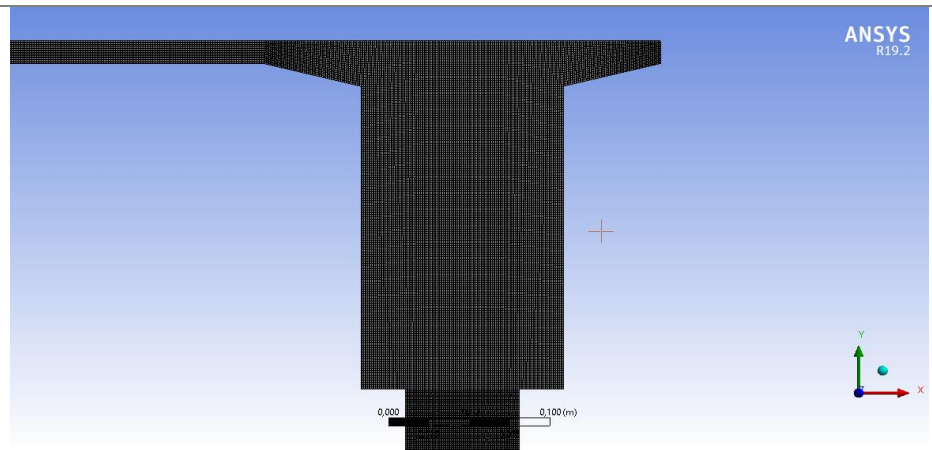
Tabla 6.

Mallado.

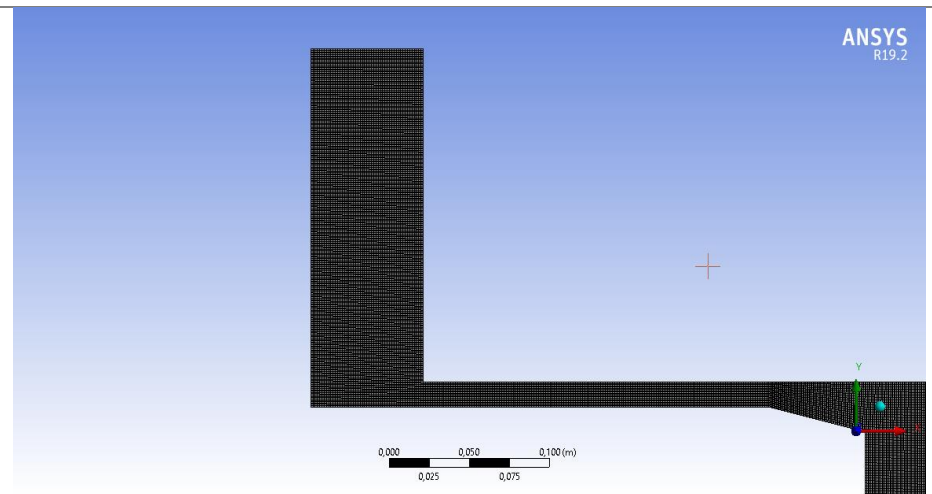
**Entrada de aire 1 /
Entrada de
combustible**



**Plancha / Paredes /
Entrada de aire 2**



Salida de gases



Nota. Elaborado con: “Ansys / Engineering Simulation Software”. Disponible en: <https://www.ansys.com/>.

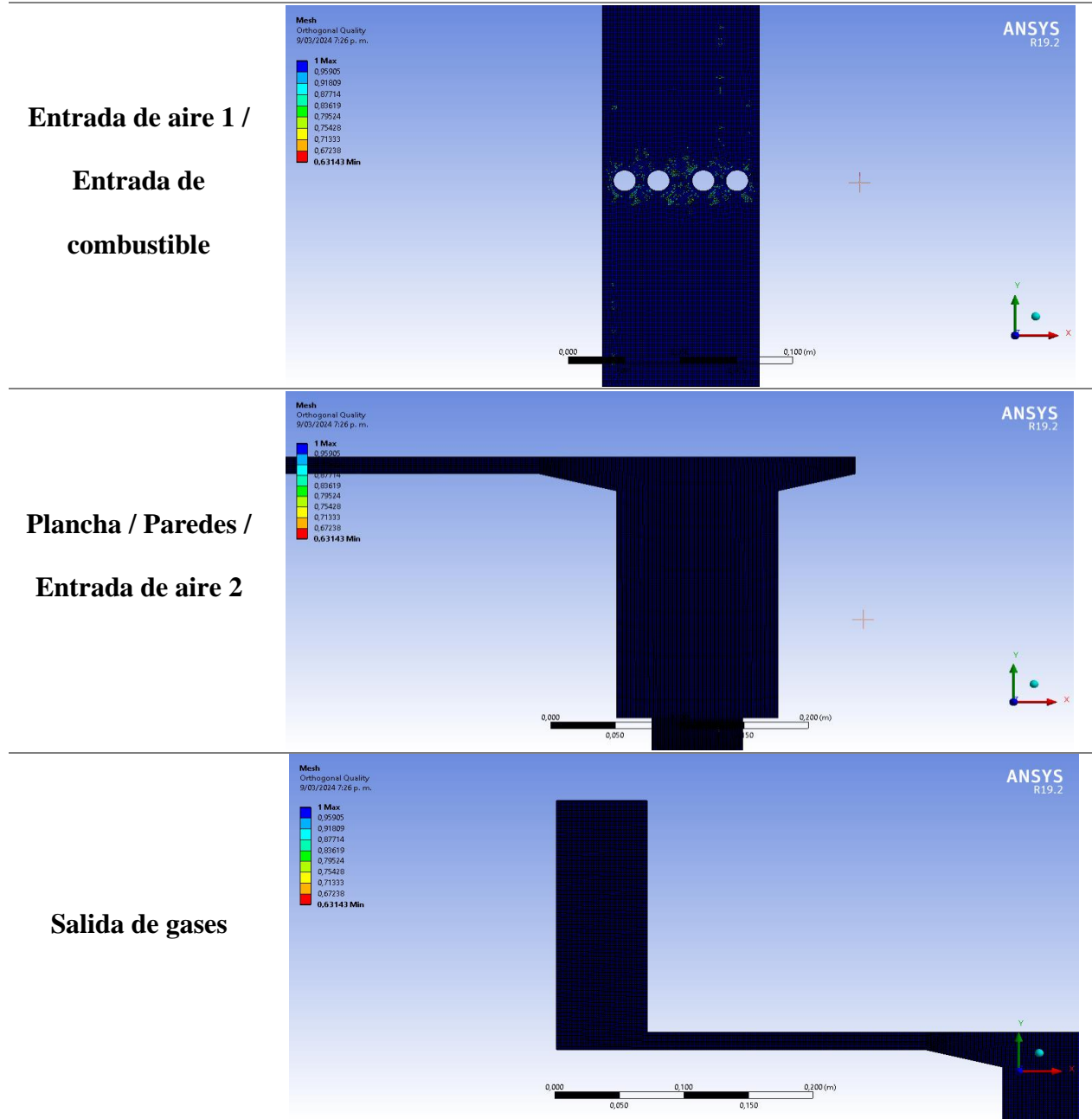
Métricas de calidad de malla

Se utilizan tres métricas con el fin de validar la calidad y precisión de la malla:

- Calidad ortogonal
- Skewness (sesgo)
- Relación de aspecto

Tabla 7.

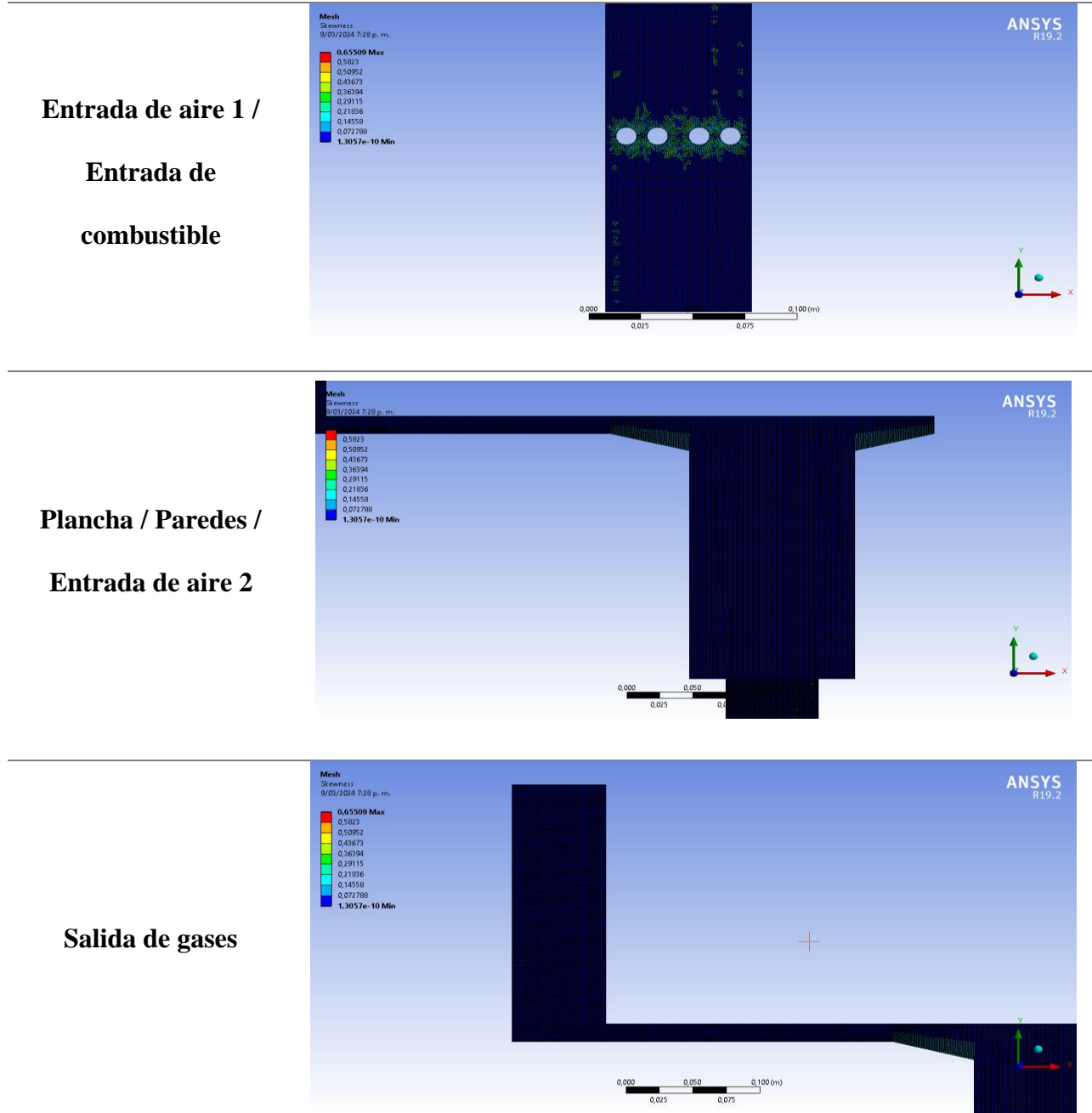
Calidad Ortogonal.



Nota.Elaborado con: “Ansys / Engineering Simulation Software”. Disponible en:
<https://www.ansys.com/>.

Tabla 8.

Skewness (sesgo).

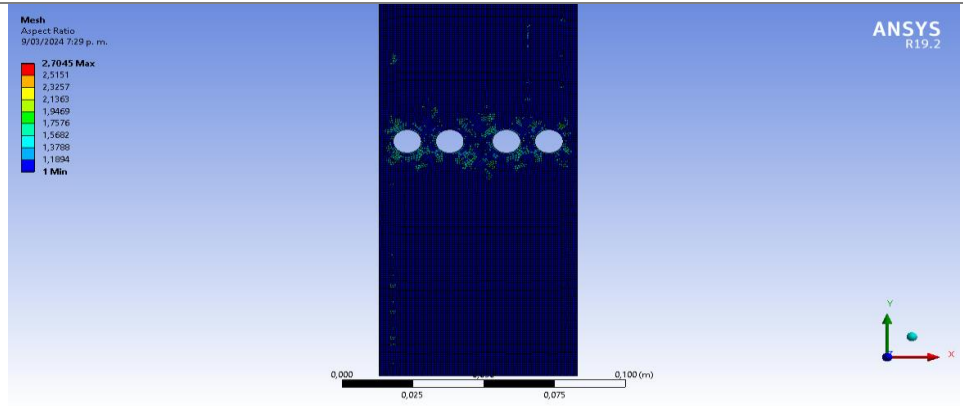


Nota. Elaborado con: “Ansys / Engineering Simulation Software”. Disponible en: <https://www.ansys.com/>.

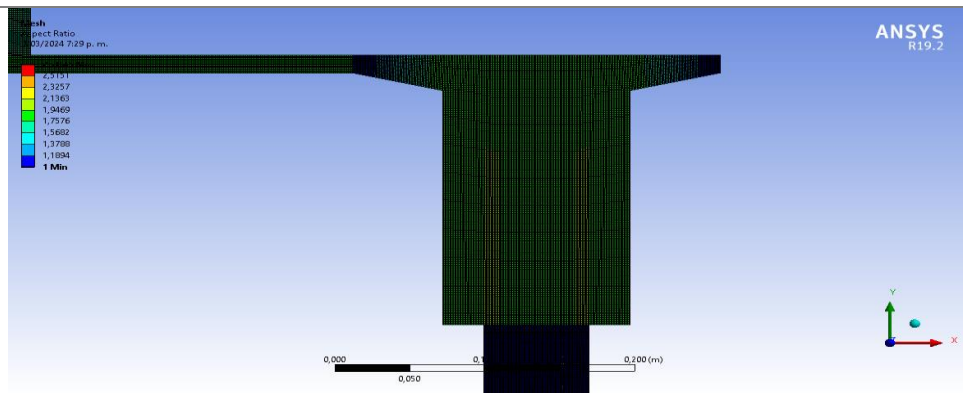
Tabla 9.

Relación de aspecto.

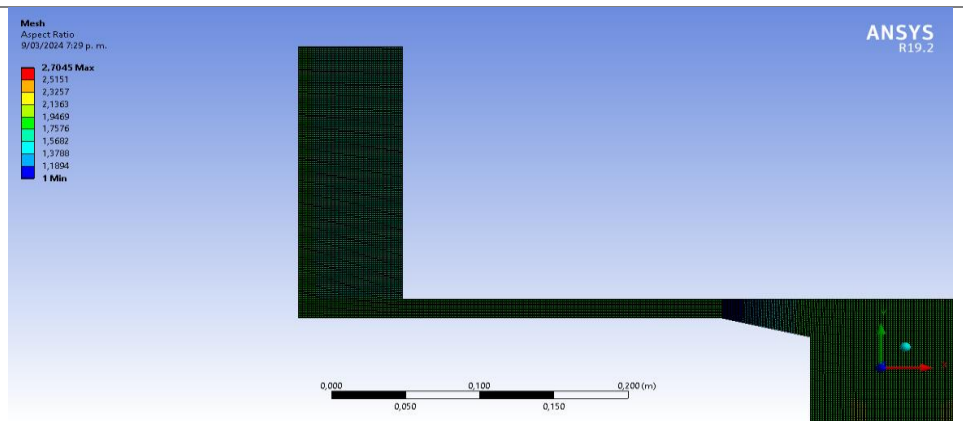
**Entrada de aire 1 /
Entrada de
combustible**



**Plancha/ Paredes /
Entrada de aire 2**



Salida de gases



Nota. Elaborado con: “Ansys / Engineering Simulation Software”. Disponible en: <https://www.ansys.com/>.

3.2.3 Descripción de condiciones frontera

El software soluciona numéricamente las ecuaciones que rigen el fluido, mediante las aproximaciones secuenciales dependiente de los resultados encontrados en las celdas contiguas, por lo tanto, es necesario conocer valores de las celdas anteriores y posteriores, lo cual, nos lleva a la necesidad de definir valores en los bordes del dominio computacional, valores conocidos como condiciones fronteras. A continuación, se presentan las condiciones introducidas en el software.

- El combustible entra por las entradas circulares ubicadas en la parte inferior de la estufa Rocket se definió la intensidad turbulenta del flujo en (15%) y velocidad de entrada de 0.75 m/s. Y fracción de volátiles igual a 1 y temperatura de entrada igual a la temperatura de salida de gases en la combustión de 1473K (Galgano et al., 2006).
- Para el aire que ingresa por convección natural en la parte inferior de la estufa se consideró, presión de 101700 (Pa) y 290.15 (K) y una intensidad turbulenta de 10% con velocidad de 2.7 (m/s) al igual que la entrada secundaria de aire tiene las mismas condiciones, con la condición de intensidad turbulenta del 15% y velocidad de 2 (m/s), con una fracción másica de $O_2 = 0.23$
- En las paredes de la estufa Rocket o zonas fronteras del flujo, esta es isotérmica a 18°C y flujo de calor
- En la plancha se determinó una temperatura poco superior de la saturación del agua 380 (K) a presión atmosférica a la altura del municipio y flujo de calor.
- En la salida de los gases se determinó a presión 101700 Pa y 18°C, abierto a la atmosfera para la salida de gases no condensables.

3.2.4 Análisis de convergencia de malla

Se realizó un análisis de convergencia con el tamaño de elementos rectangulares de la malla con la ayuda de la herramienta del software (Parameter set) de tal modo que para la primera configuración se establecieron variables de salida como lo es la temperatura promedio de la plancha y la temperatura de salida de los gases por la chimenea ya que son datos de mayor interés, con el fin de establecer que la malla sea independiente de los resultados obtenidos, con las siguientes configuraciones se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 10):

Tabla 10.

Independencia de malla.

Tamaño del elemento [mm]	Temperatura promedio de plancha (Griddle) [K]	Temperatura Promedio de salida de gases (outlet) [K]
5e-3	708.6	789.21
4e-3	706.87	787.83
3e-3	706.51	787.78
2e-3	704.37	785.73
1e-3	703.04	784.73
8e-4	702.83	784.62
7e-4	702.66	784.45
6e-4	702.35	784.19

Como se logra evidenciar la independencia de malla se logra para la temperatura de plancha de 702.83 en el tamaño de 8e-4 mm esto ya que las siguientes temperaturas varían en un orden mínimo, por otro lado, con la temperatura promedio de la salida de los gases se alcanza la

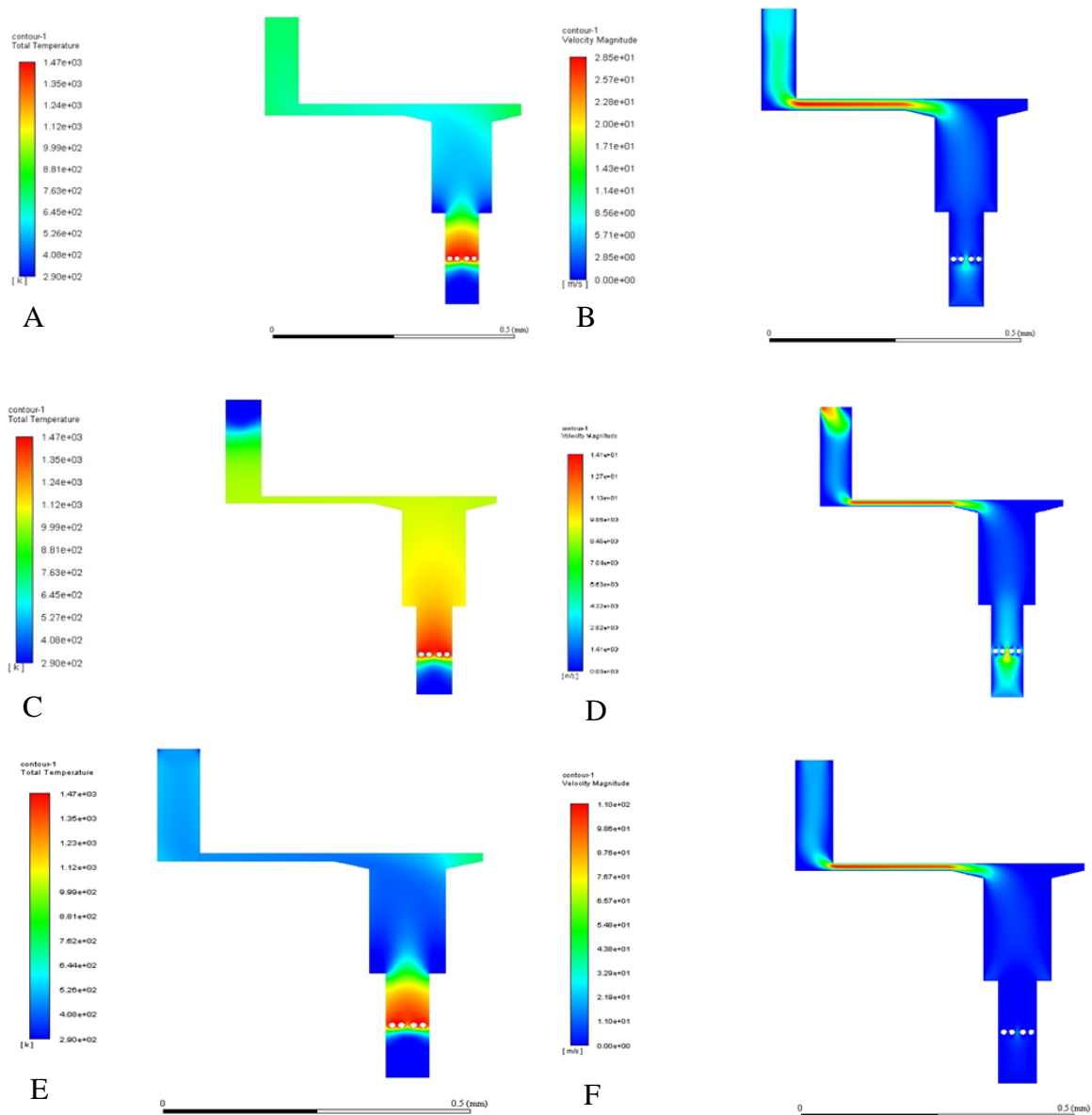
independencia con el tamaño de $1e-3$ ya que ocurre variación mínima con los siguientes tamaños de elemento de malla.

3.3 Parametrización.

Esta nos permite modelar con precisión y controlar diversos aspectos del proceso de combustión, como la eficiencia energética, la emisión de contaminantes entre otros. Se modifica la geometría de la estufa Rocket con el fin de analizar como estos parámetros logran afectar el comportamiento térmico y el perfil de velocidad en el dominio computacional de la estufa Rocket.

Se requiere analizar el cambio de la temperatura en la plancha y en la salida de los gases ya que son uno de los parámetros de más interés del dominio computacional, al modificar el espacio del ducto debajo de la plancha de 15 mm a 25 mm. De igual forma se estudia la importancia de la segunda entrada de aire, eliminando la segunda entrada de este. El último parámetro es la relación del dominio computacional con la velocidad de la segunda entrada de aire, con el fin de determinar si un ventilador tendría efecto positivo sobre la eficiencia y otros factores importantes cambiando la velocidad de 2 (m/s) a 5(m/s).

Por ello a continuación se presentan los perfiles de temperatura, así como los de velocidad para reconocer la importancia que tiene la variación de los parámetros mencionados anteriormente (Figura 7).

Figura 7.*Parametrización de la estufa Rocket.*

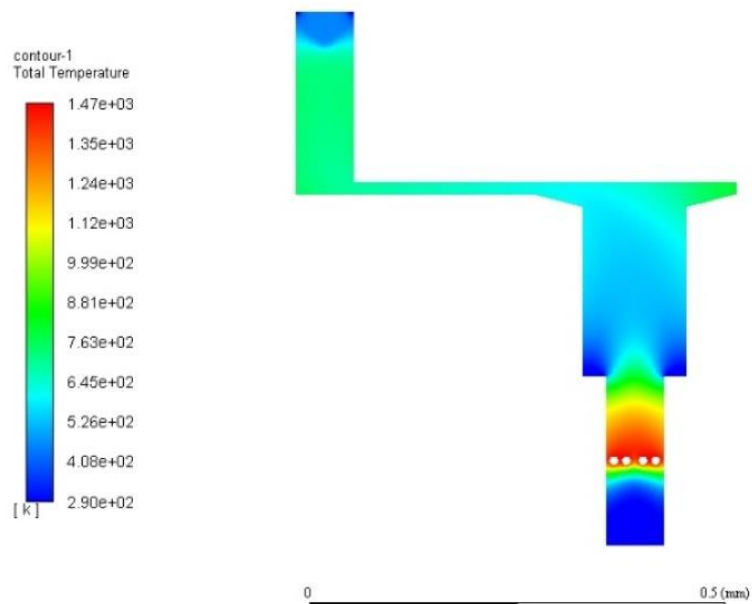
Nota. (A) Perfil de temperatura para 25 mm. (B) Perfil de velocidades para 25 mm. (C) Perfil de temperatura sin segunda entrada de aire. (D) Perfil de velocidades sin segunda entrada de aire. (E) Perfil de temperaturas para velocidad 5 [m/s] en la segunda entrada de aire. (F) Perfil de velocidades para velocidad de 5 [m/s] en la segunda entrada de aire.

3.4 Resultados

Se presenta el perfil de temperatura de la estufa Rocket conseguido con la geometría propuesta en el estudio del diseño de la combustión de biomasa, en el dominio computacional planteado, se ha comparado con resultados de otras investigaciones con el fin de validar los datos obtenidos y que estos se encuentran dentro de los parámetros esperados, estas investigaciones anteriores realizaron pruebas de acción sobre hornillas y otro tipo de estufas haciendo uso de termocuplas y anemómetros. Se encontró un perfil adecuado de temperaturas donde su máximo se halla en la primera cámara de combustión con un valor de 1471.297 K y como se logra evidenciar en la sección 3.2.4 las variables de temperatura de salida de gases, así como, temperatura de plancha son las variables de mayor interés en la simulación obteniendo valores de 702.83 K y 784.62 K respectivamente (Figura 8).

Figura 8.

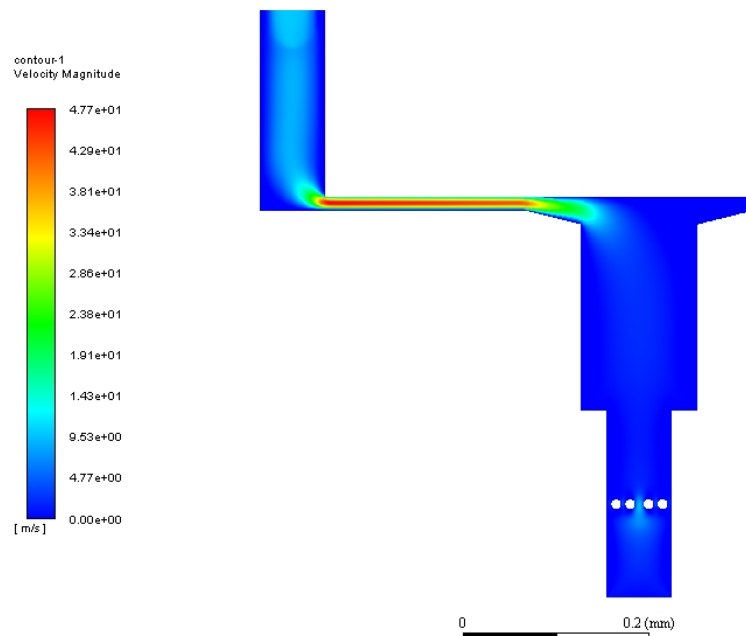
Contorno de temperatura en el dominio computacional de la Rocket.



Luego de cumplir satisfactoriamente con las métricas de calidad de malla y la independencia de malla. A continuación, se muestra el perfil de velocidades donde se evidencia de manera clara la ley de continuidad puesto que el sistema tiene un fluido incompresible por ende la masa que entra debe ser igual a la masa que sale, por ello para mantener constante el flujo de masa, y disminuir la distancia del ducto la velocidad del fluido debe aumentar en consecuencia; Se encontró que para 15 mm de distancia se tiene una velocidad de 47 m/s. justo en el centro del conducto como se evidencia en un perfil de velocidades dentro del espacio, debido a que sobre las paredes la velocidad es de 0 m/s, sin embargo la parametrización de esta medida nos da un mejor enfoque, ya que al aumentar la distancia entra la plancha y el paso de gases, disminuye la velocidad y se obtiene velocidades máximas de 28 m/s que concuerdan con datos esperados (Figura 9).

Figura 9.

Contorno de velocidad de la combustión de gases volátiles.



Se logra establecer que el porcentaje de fracción másica de los NOx es relativamente cero sin embargo es importante afirmar que aun hace falta aquella fracción másica que se produce en el cambio de estado sólido-liquido-gas al igual que la importancia de implementar un modelo de simulación del hollín y carbón fijo ya que en estos procesos es donde se libera la mayoría de gases contaminantes al ambiente, estos modelos pueden proporcionar superficies adicionales para que ocurran reacciones químicas adicionales, incluida la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión a altas temperaturas. Además, pueden proporcionar condiciones locales en las que la temperatura sea lo suficientemente alta como para promover la formación de NOx (Figura 10).

Además de ello se evidencia que donde más hay presencia de NOx es en la salida de los gases no volátiles, lo cual es un buen indicador ya que la chimenea está bien ubicada al permitir eliminar de manera efectiva los gases contaminantes al entorno, y no dentro de las viviendas.

Figura 10.

Contorno de fracción másica de NOx en el dominio computacional de la Rocket.



La implementación de esta tecnología podría mejorar la calidad de vida de las personas al reducir los costos de combustible, mejorar la salud y promover la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, es importante considerar ciertos desafíos, como la accesibilidad económica para las comunidades rurales y la necesidad de programas de capacitación para garantizar un uso adecuado y seguro de las estufas Rocket. Además, se debe abordar el tema de la disponibilidad y la gestión sostenible de la biomasa utilizada como combustible, así como la infraestructura necesaria para su distribución y mantenimiento. Estos aspectos son fundamentales para maximizar los beneficios sociales, económicos y ambientales de esta tecnología en las comunidades rurales.

Se requiere tener presente las diferentes consideraciones para su fabricación como lo son los materiales utilizados, costos de producción, facilidad de producción con el fin de ser reproducida en cualquier lugar, teniendo en cuenta que las variables frontera como temperatura ambiental, temperatura de saturación del agua a la altura en la que se desea instalar la estufa Rocket, velocidades del viento y la presión atmosférica, representan un factor importante en la determinación de la eficiencia y la capacidad de transferir calor. Se presentan los siguientes materiales con el fin de ser evaluados en una matriz de calidad y determinar el mejor material para implementar la fabricación de la estufa Rocket: Acero inoxidable H525, acero inoxidable 304, acero ASTM-A36, SAE 1045, ASTM A-572.

4. Conclusiones

- Se diseñó una estufa Rocket con las especificaciones de funcionamiento y una caracterización detallada de la biomasa (*Eucaliptus Globulus* Labill). La atención se centró en una interfaz de usuario intuitiva y piezas de reemplazo fáciles, así como en una experiencia de usuario práctica.
- Se llevó a cabo la simulación de la combustión del (*Eucaliptus globulus* labill) en estado continuo obteniendo el perfil de temperatura en el dominio computacional de la estufa rocket con temperaturas máximas de 1471.297 K en la cámara de combustión 702.83 K en la plancha y 784.62 K en la salida de los gases no condensables.
- Se parametrizó el diseño de la estufa rocket enfocada en ajustar la geometría, la entrada y la velocidad del aire, de esta manera, la primera configuración (A) y (B) disminuye la velocidad en el ducto y presenta un perfil de temperatura uniforme en la plancha y en la salida de los gases.
- Se determinó que la simulación como herramienta de predicción cumple un papel importante al momento de evaluar y mejorar el funcionamiento de la estufa Rocket; en la presente investigación se logró predecir de manera aceptable el comportamiento visto en la (sección 3.2); Sin embargo, cabe resaltar que este modelo es una simplificación necesaria de los diferentes fenómenos físicos y químicos que ocurren durante la combustión.

5. Recomendaciones

- En futuras investigaciones se debe llevar a cabo un proceso de validación experimental para respaldar los resultados de la simulación, lo cual implica la obtención de las propiedades descritas de la biomasa, la medición de temperaturas y velocidades.
- Implementar en el modelo computacional CFD la fase discreta y transferencia de calor un modelo para el hollín y las cenizas, ya que puede tener un efecto importante en el proceso de combustión, con el fin de reducir el porcentaje de error que puede tener la simulación respecto a las mediciones en campo.
- Se debe llevar un modelado en proceso transitorio donde se tenga en cuenta el tiempo, ya que en el presente estudio se realizó en estado estable indicando que las propiedades del sistema tienden a ser constantes y en la vida real no es así, por ello, esta variable temporal si tiene gran impacto sobre la simulación.
- Adicionar una capa aislante en el diseño de la estufa propuesta con el fin de disminuir la temperatura en el cuerpo de la estufa ya que no se desea tener altas temperaturas donde el usuario puede llegar a ser expuesto a quemaduras.

Referencias Bibliográficas

- Basu prabir. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction* (2nd ed.). Elsevier Inc.
- Beng Hugh Burnham. (2008). *Breeding a better stove: the use of Computational Fluid Dynamics and Genetic Algorithms to optimise a wood burning stove for Eritrea*. The University of Nottingham.
- Caubel, J. J., Rapp, V. H., Chen, S. S., & Gadgil, A. J. (2020). Practical design considerations for secondary air injection in wood-burning cookstoves: An experimental study. *Development Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2020.100049>
- Elorza Juan. (2015). *Avances en el modelado de la combustión de biomasa en Spouted Bed cónico*.
- Flego, D. M. (2019). *Diseño y construcción de estufa Rocket e intercambiador de calor modular para climatización ampliada*.
- Galgano, A., Di Blasi, C., Horvat, A., & Sinai, Y. (2006). Experimental validation of a coupled solid- and gas-phase model for combustion and gasification of wood logs. *Energy and Fuels*, 20(5), 2223–2232. <https://doi.org/10.1021/ef060042u>
- García Sánchez, G. F., Chacón Velasco, J. L., Fuentes Díaz, D. A., Rueda-Ordóñez, Y. J., Patiño, D., Rico, J. J., & Martínez Morales, J. R. (2023). Biomass Combustion Modeling Using OpenFOAM: Development of a Simple Computational Model and Study of the Combustion Performance of Lippia origanoides Bagasse. *Energies*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/en16062932>
- Ghiwe, S. S., Kalamkar, V. R., Sharma, S. K., & Sawarkar, P. D. (2023). Numerical and experimental study on the performance of a hybrid draft biomass cookstove. *Renewable Energy*, 205, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.077>

- Ianto evans, & Leslie Jackson. (2006). *Rocket mass heaters superefficient woodstoves you can build (and snuggle up to)*.
- Ilunga, O. (2021). *Estudio de la optimización de estufas de cocción tradicionales empleadas en países en desarrollo utilizando biomasa leña gasificada (aplicado a la R.D.Congo)*. Universidad Politécnica de València .
- Luzuriaga, J. F. (2015). *Optimización bajo criterios de sostenibilidad de la eficiencia de la transferencia de calor de cocinas de biomasa autoconstruidas por comunidades rurales de Nicaragua*.
- Mendoza Luis, & Aguirre Daniel. (2016). *Diseño, análisis y construcción de una estufa de uso doméstico utilizando como fuente de combustible biomasa sólida*.
- Pundle, A., Sullivan, B., Means, P., Posner, J. D., & Kramlich, J. C. (2019a). Predicting and analyzing the performance of biomass-burning natural draft rocket cookstoves using computational fluid dynamics. *Biomass and Bioenergy*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105402>
- Pundle, A., Sullivan, B., Means, P., Posner, J. D., & Kramlich, J. C. (2019b). Predicting and analyzing the performance of biomass-burning natural draft rocket cookstoves using computational fluid dynamics. *Biomass and Bioenergy*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105402>
- Ramírez Santiago. (2010). *Simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en el reactor de lecho fijo de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ravi, M. R., Kohli, S., & Ray, A. (2002). *Use of CFD simulation as a design tool for biomass stoves*.

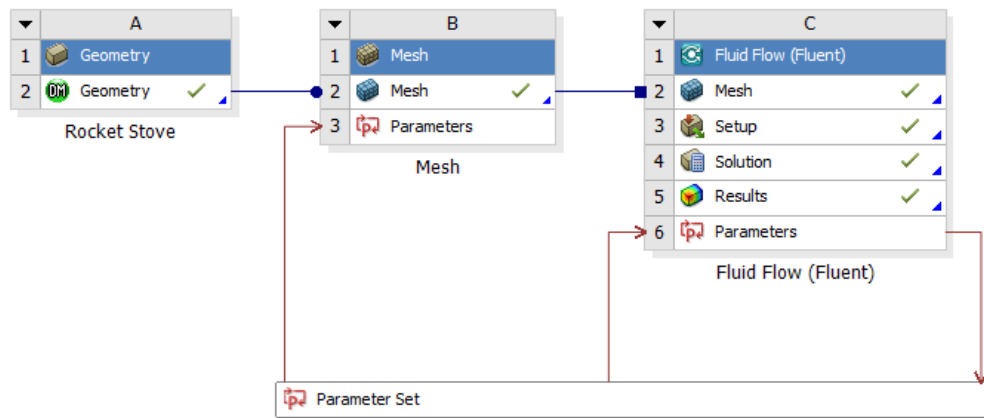
- Rodriguez Navarrete, Fernanda Luisa, Tovar Moreno, Angela Maria, Barbosa Vera, Andres David, Pereira Bulla, Edwin Alberto, Caicedo Orjuela, & Obradith. (2024). Eucalyptus globulus biomass as a raw material in the obtaining liquid biofuel. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 22. <https://doi.org/https://doi.org/10.18684>
- Saldarriaga Elorza, J. F. (2015). *Avances en el modelado de la combustión de biomasa en spouted bed cónico*.
- Sharma, P., & Diwan, P. K. (2017). Study of thermal decomposition process and the reaction mechanism of the eucalyptus wood. *Wood Science and Technology*, 51(5), 1081–1094. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0924-7>
- Vásquez Bazán, B. A. (2017). *Diseño de una estufa Rocket para sintetización de carbón activado usando biocombustible de bajo costo para la empresa A y D Pioneer S.A.C - Trujillo*. Universidad César Vallejo.

Anexos

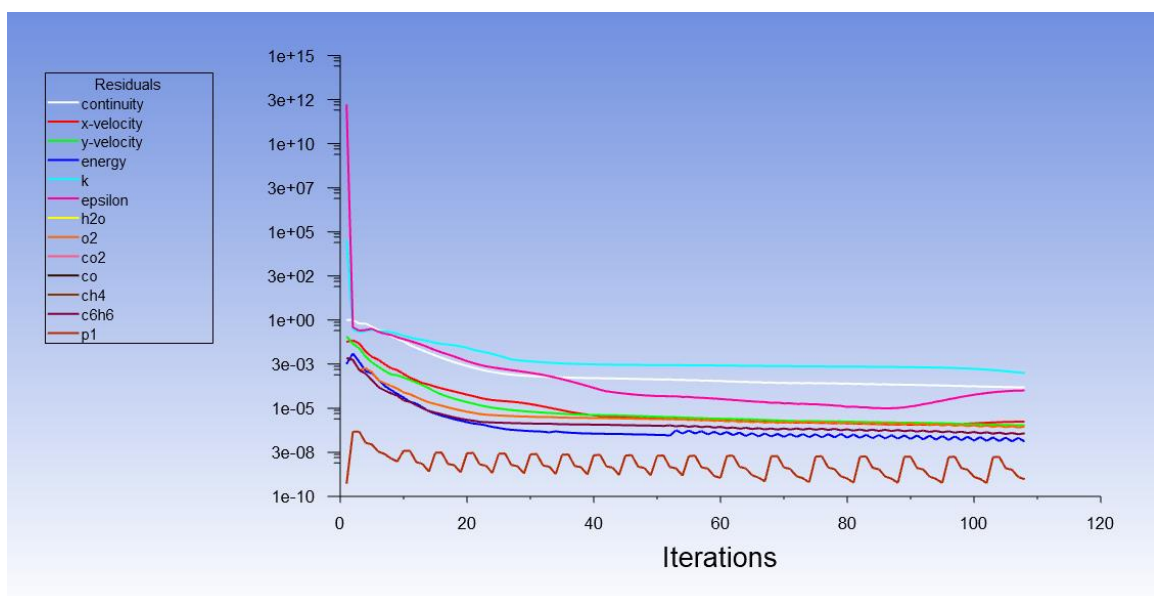
Apéndice A.

Configuración de ANSYS.

Se presenta un esquema del setup de la simulación usando el paquete de fluent del software cerrado que viene con Ansys.

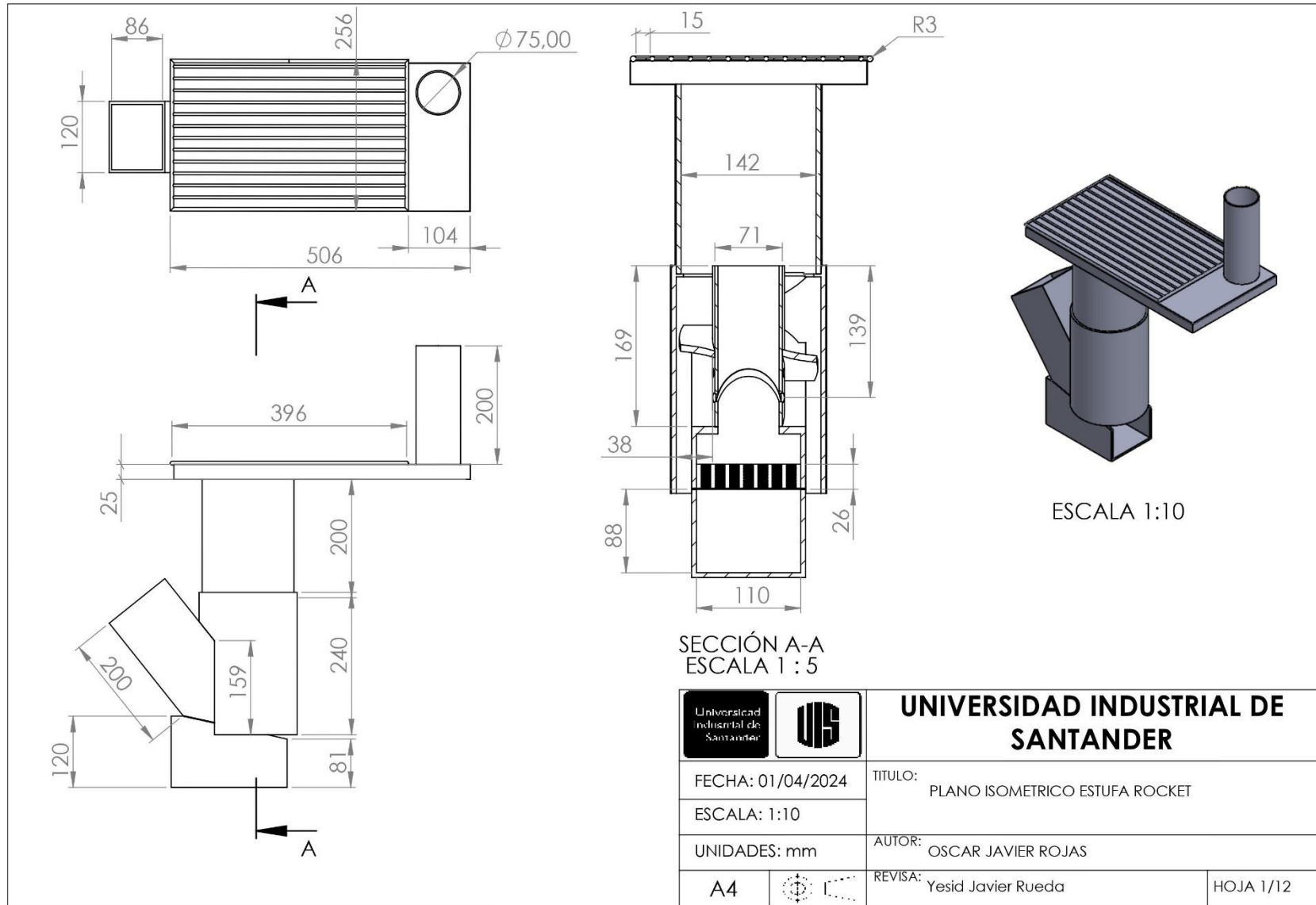


Se presenta una gráfica residual de la simulación en el momento que converge en la iteración 109 del código en la consola.



Apéndice B.*Planos en Detalle*




Se utiliza la parametrización para elegir la geometría más adecuada. Este método permite identificar y elegir la configuración de estufa más eficiente y funcional. Este informe proporcionará una descripción detallada del diseño y funcionamiento de la estufa Rocket, incluyendo planos detallados que muestran su estructura y componentes.

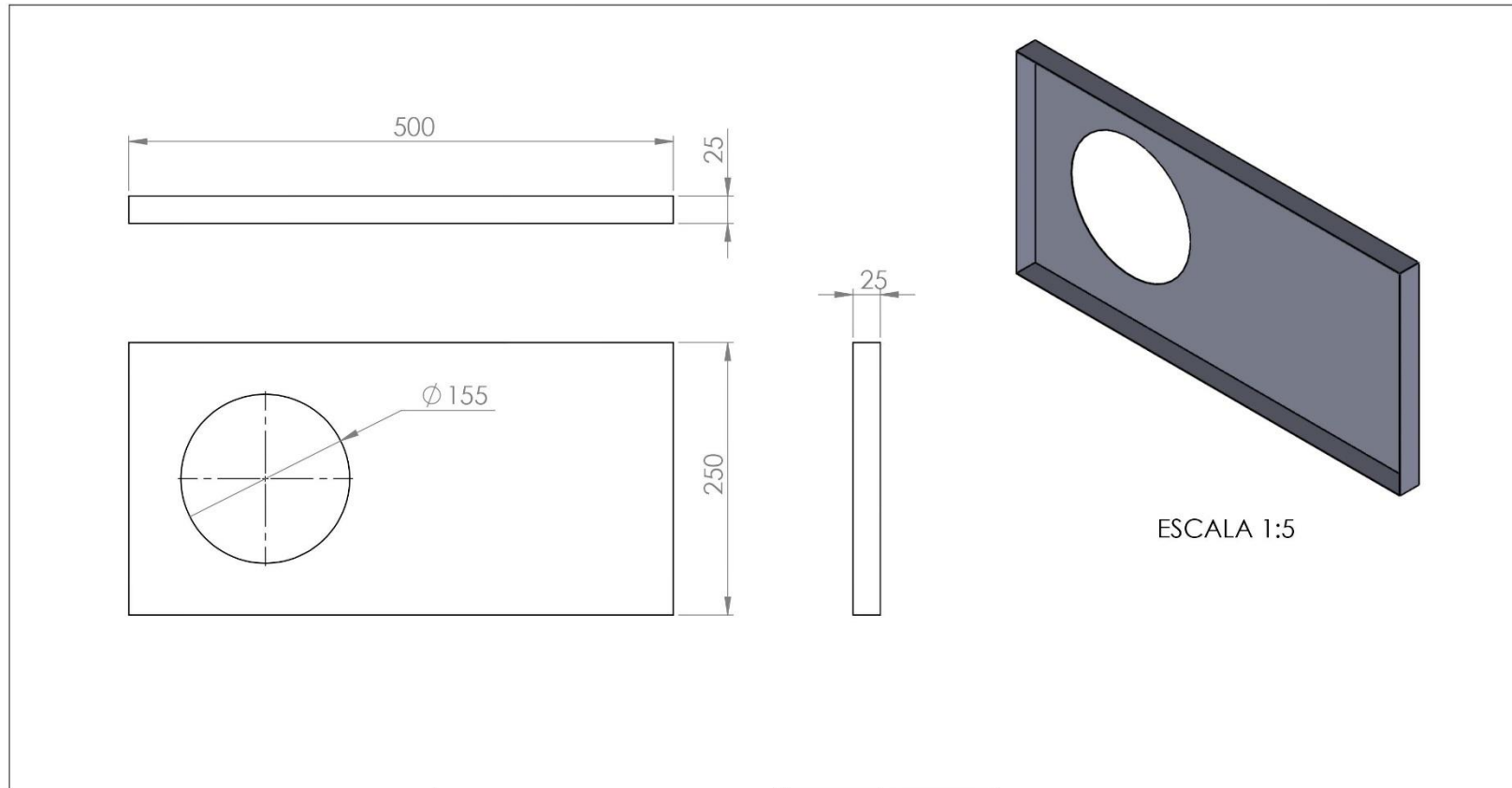


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 5

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/04/2024 ESCALA: 1:10		TITULO: PLANO ISOMETRICO ESTUFA ROCKET	
UNIDADES: mm		AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS	
A4		REVISAR: Yesid Javier Rueda	HOJA 1/12

10	Parrilla
9	Alimentador
8	Ducto entrada aire
7	Aletas
6	Base hollín
5	Rejilla
4	Elevador
3	Camara de combustión
2	Chimenea
1	Base Parrilla

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/04/2024		TITULO: PLANO EXPLOSIONADO DE LA ESTUFA ROCKET	
ESCALA: 1:10		AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS	
UNIDADES: mm		REVISA: Yesid Javier Rueda	
A4			HOJA 2/12



ESCALA 1:5

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Conformado por corte de una lamina de 1 x 2 x 0.003 m donde se corta una pieza de 250 x 500 mm, corta dos piezas de 25 x 250 mm de la parte restante de la lámina, y Corta dos piezas de 25 x 500 mm de la parte restante de la lámina, se soldan con SMAW con angulo de 90 °



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 01/04/2024

ESCALA: 1:5

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

BASE PARRILLA

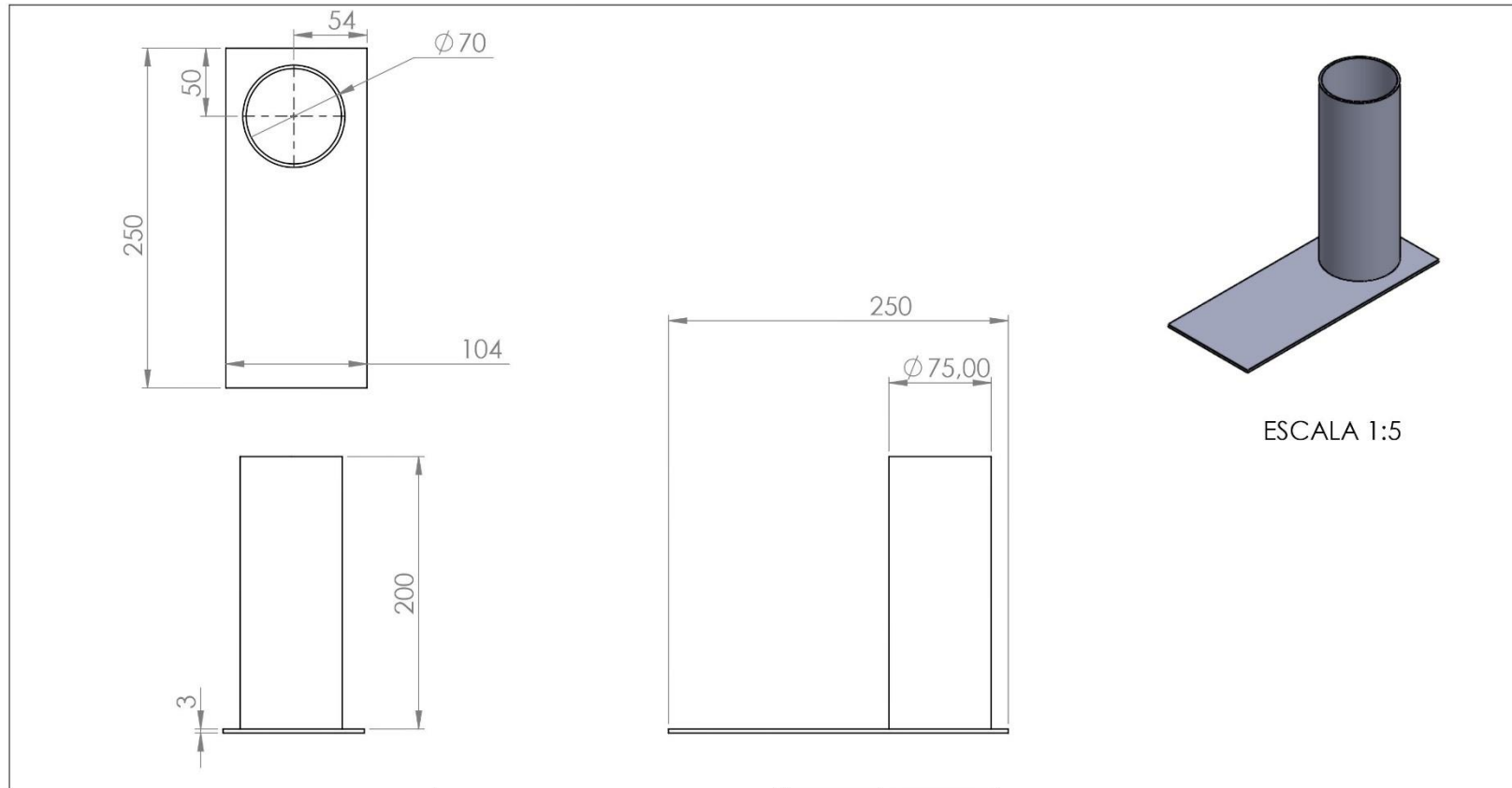
AUTOR:

OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS

REVISA:

Yesid Javier Rueda

HOJA 3/12



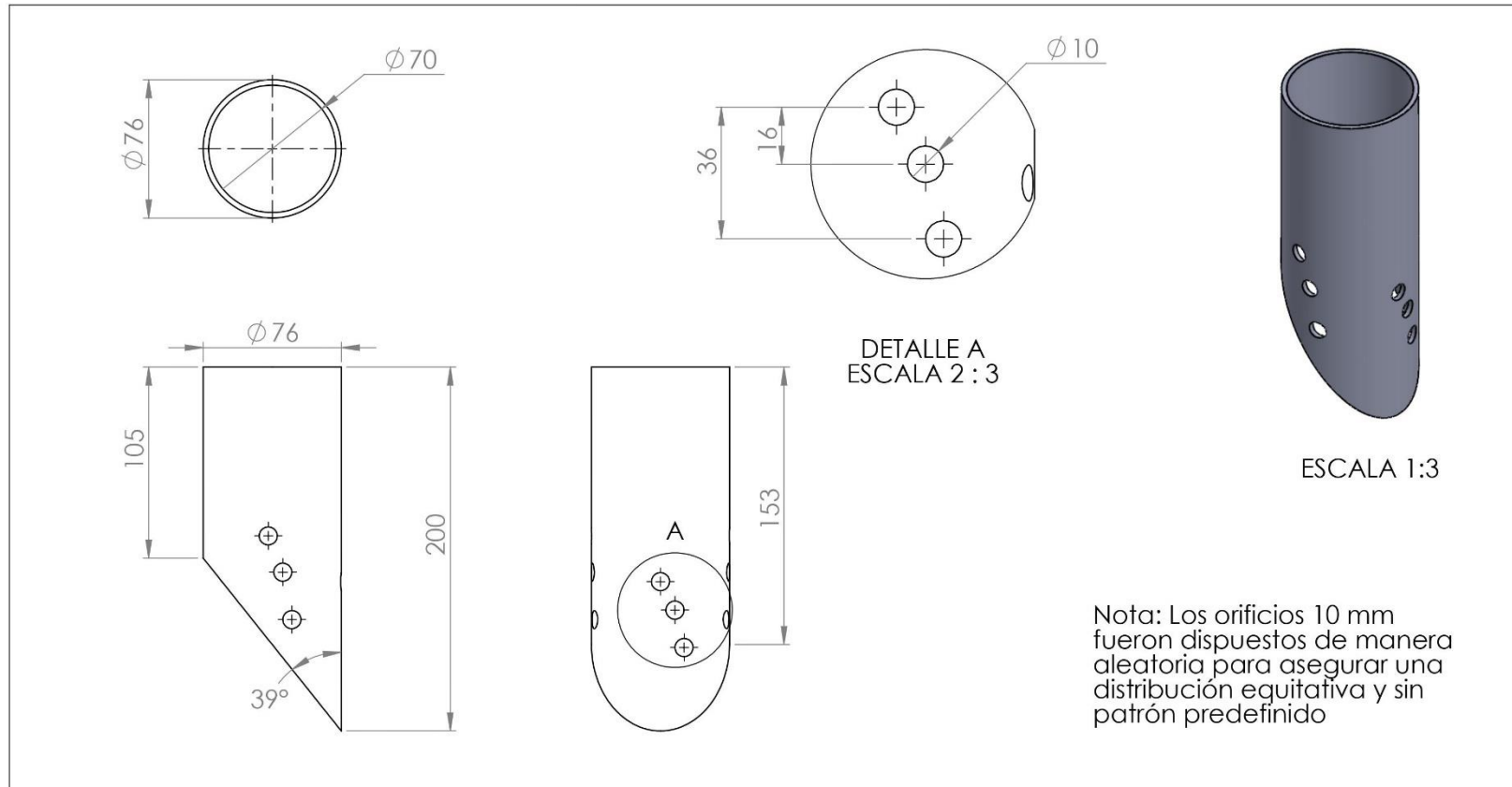
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Corte por sierra de disco de un tubo de 70 mm de diametro x 300 mm de Longitud, soldado a una lamina de 250 x 104 mm con un hueco de las mismas dimensiones del tubo.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 01/04/2024	TITULO: CHIMENEA	
ESCALA: 1:4	AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS	
UNIDADES: mm	REVISIA: Yesid Javier Rueda	HOJA 4/12
A4		



Nota: Los orificios 10 mm fueron dispuestos de manera aleatoria para asegurar una distribución equitativa y sin patrón predefinido

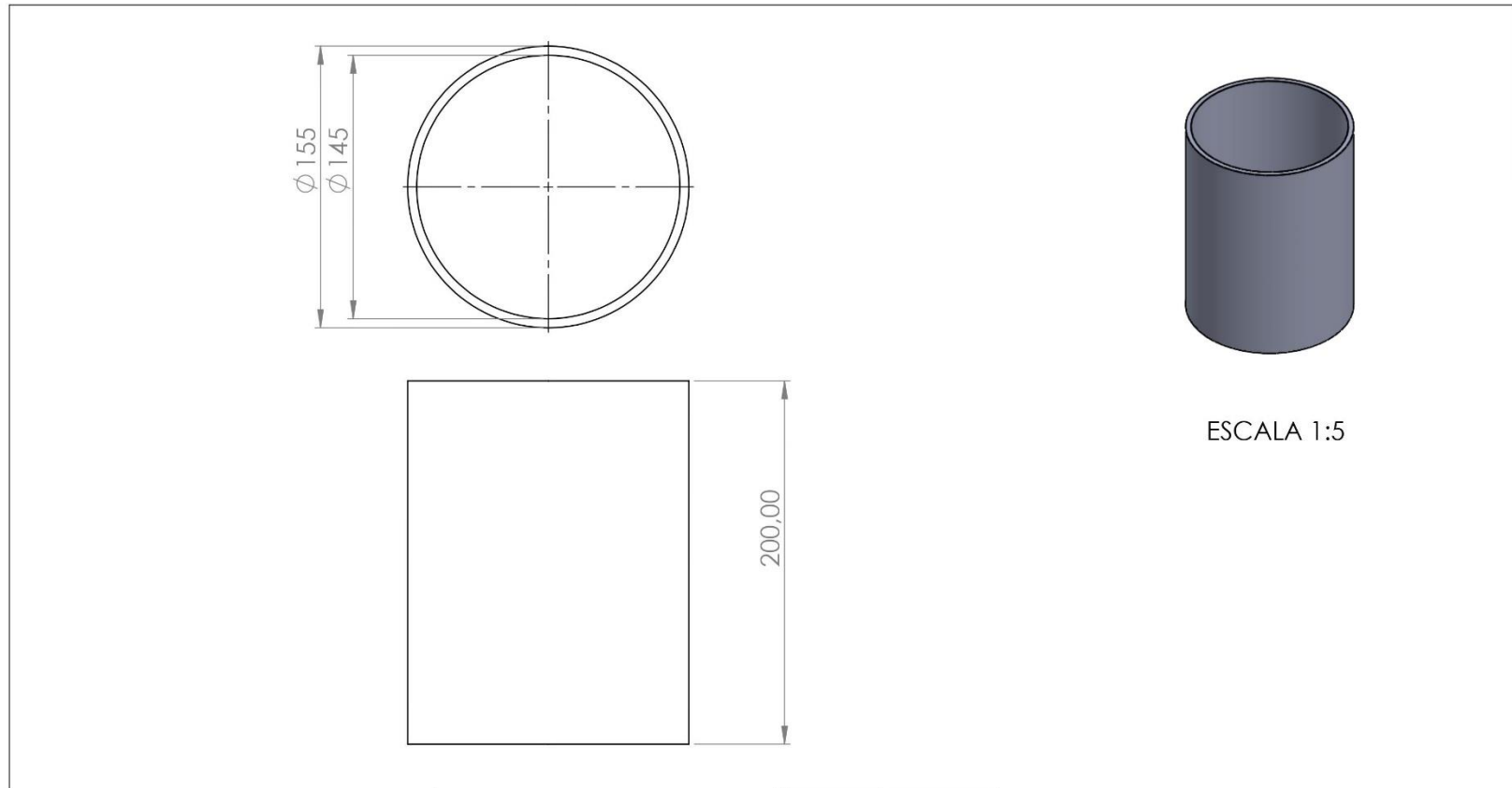
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:




Tubo cortado con sierra de disco de 70 mm de diámetro con ángulo de 39° taladrado con broca de 10 mm ubicados aleatoriamente debajo de las aspas.

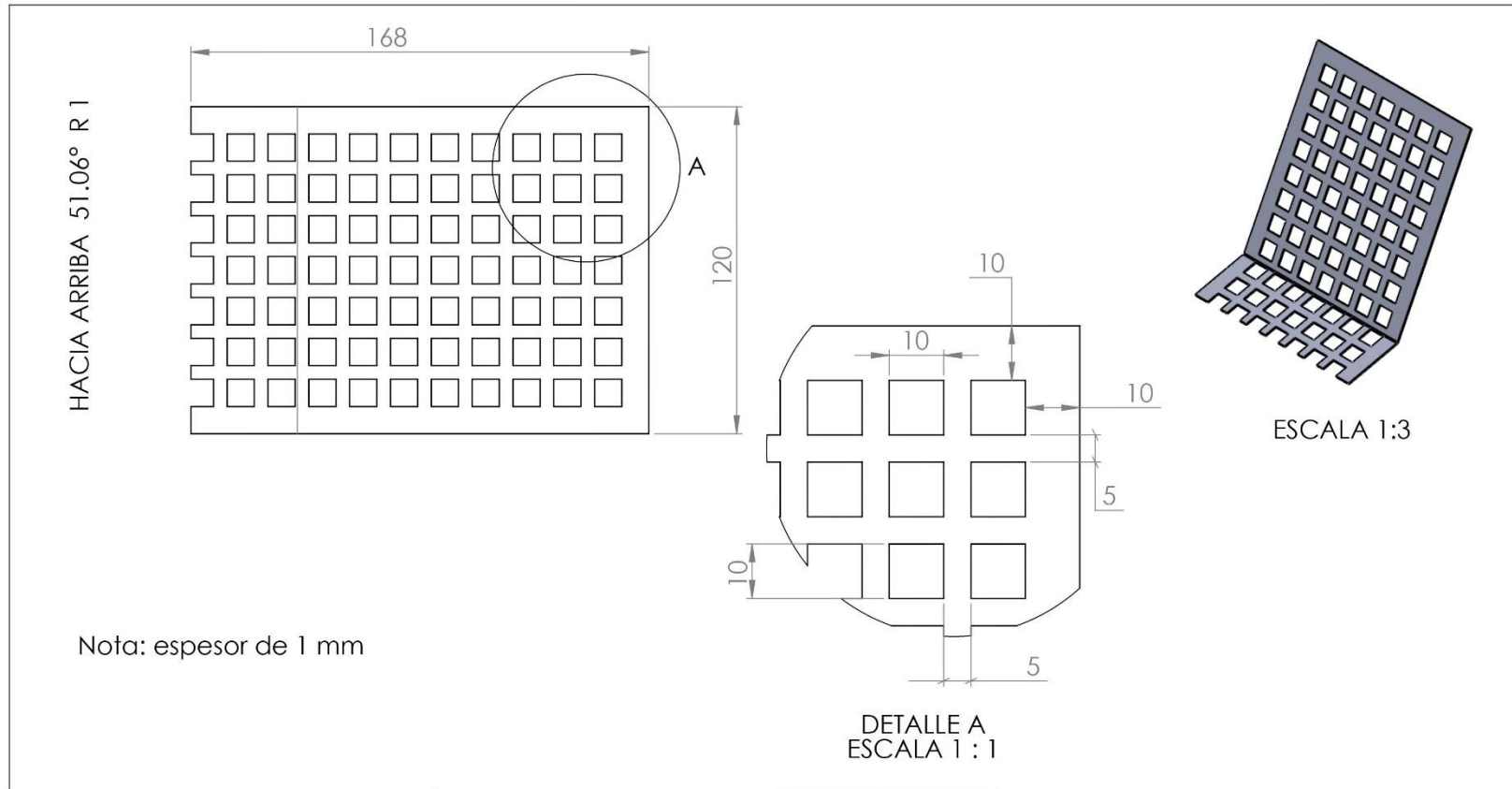


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 01/04/2024	TÍTULO: CÁMARA DE COMBUSTIÓN
ESCALA: 1:3	AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS
UNIDADES: mm	REVISÓ: Yesid Javier Rojas Rojas
A4	HOJA 5/12



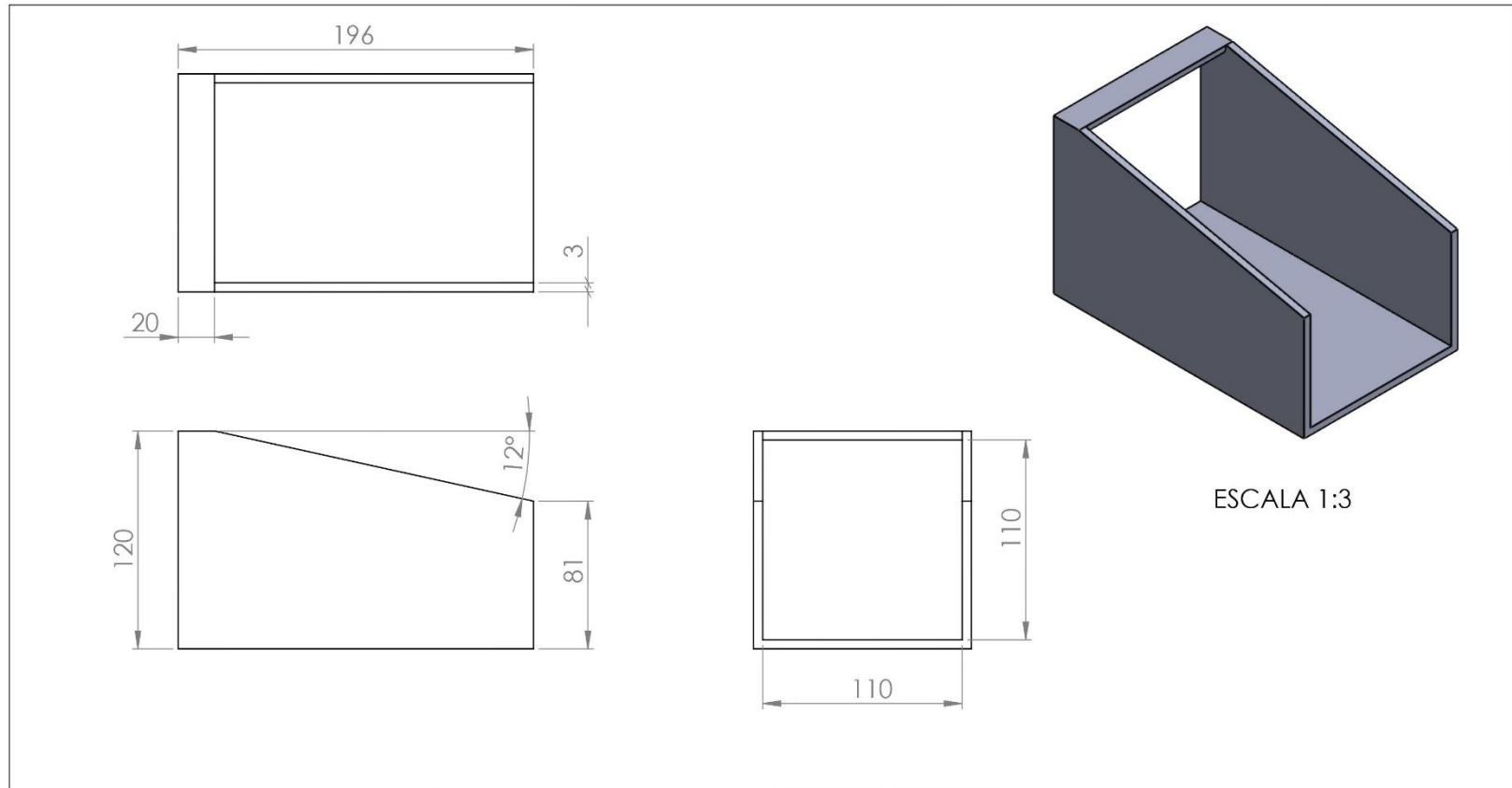
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:			UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
	FECHA: 01/04/2024	TÍTULO: Elevador		
Tubo de 145 mm x 300 mm cortado con sierra de disco	ESCALA: 1:3	AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS		
	UNIDADES: mm	REVISAR: Yesid Javier Rueda		
	A4			HOJA 6/12



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Corte de lamina de 120 X 180 mm por chorro y doblada con prensa hidraulica a 50°

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 01/04/2024	ESCALA: 1:3	TITULO: Rejilla	
UNIDADES: mm	A4	AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS	
		REVISAR: Yesid Javier Rueda	HOJA 7/12



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Tubo rectangular de 110 x 110 mm cortado con sierra de disco a 12°



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 01/04/2024

ESCALA: 1:3

UNIDADES: mm

A4



TÍTULO:

BASE HOLLÍN

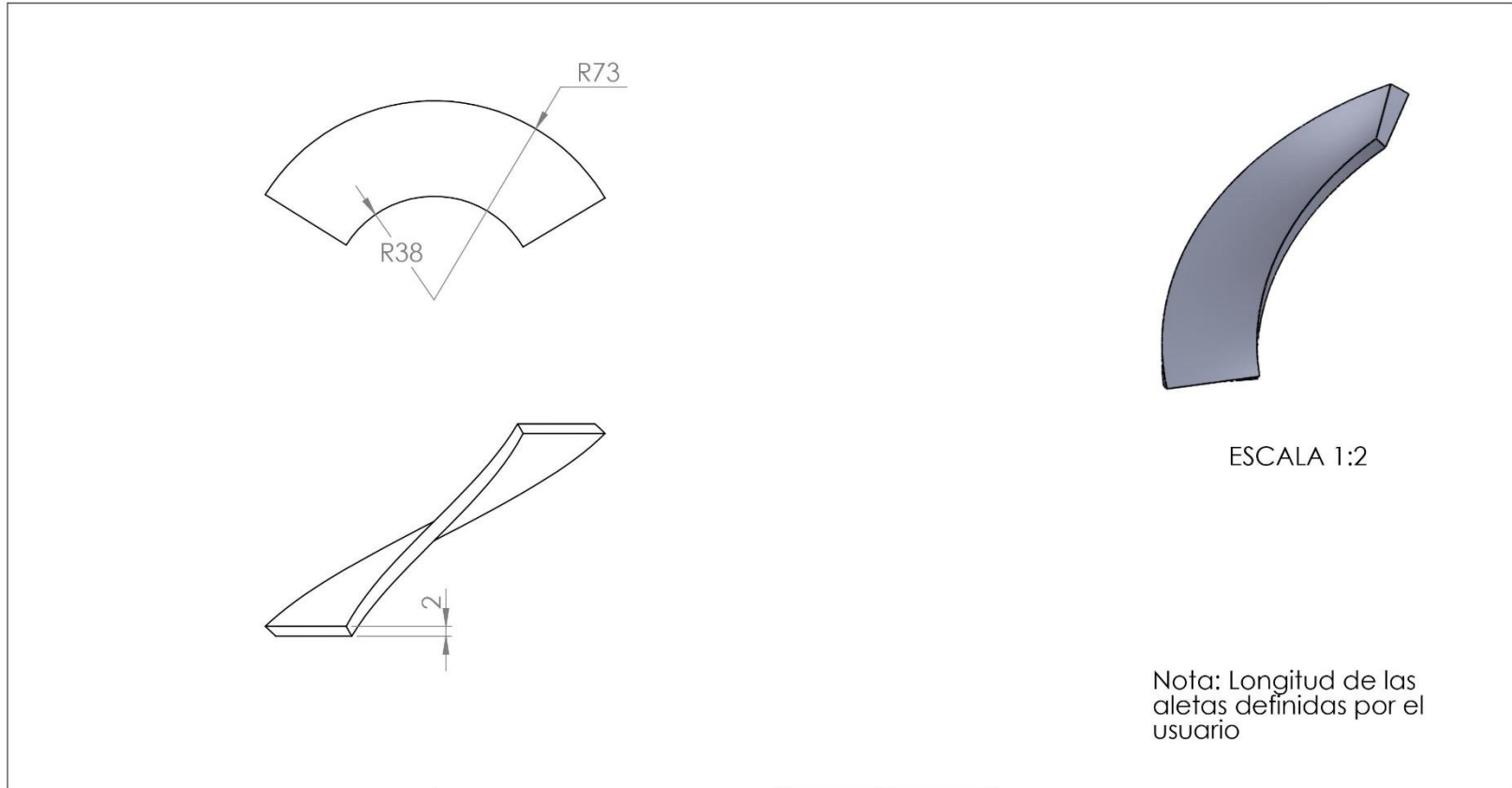
AUTOR:

OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS

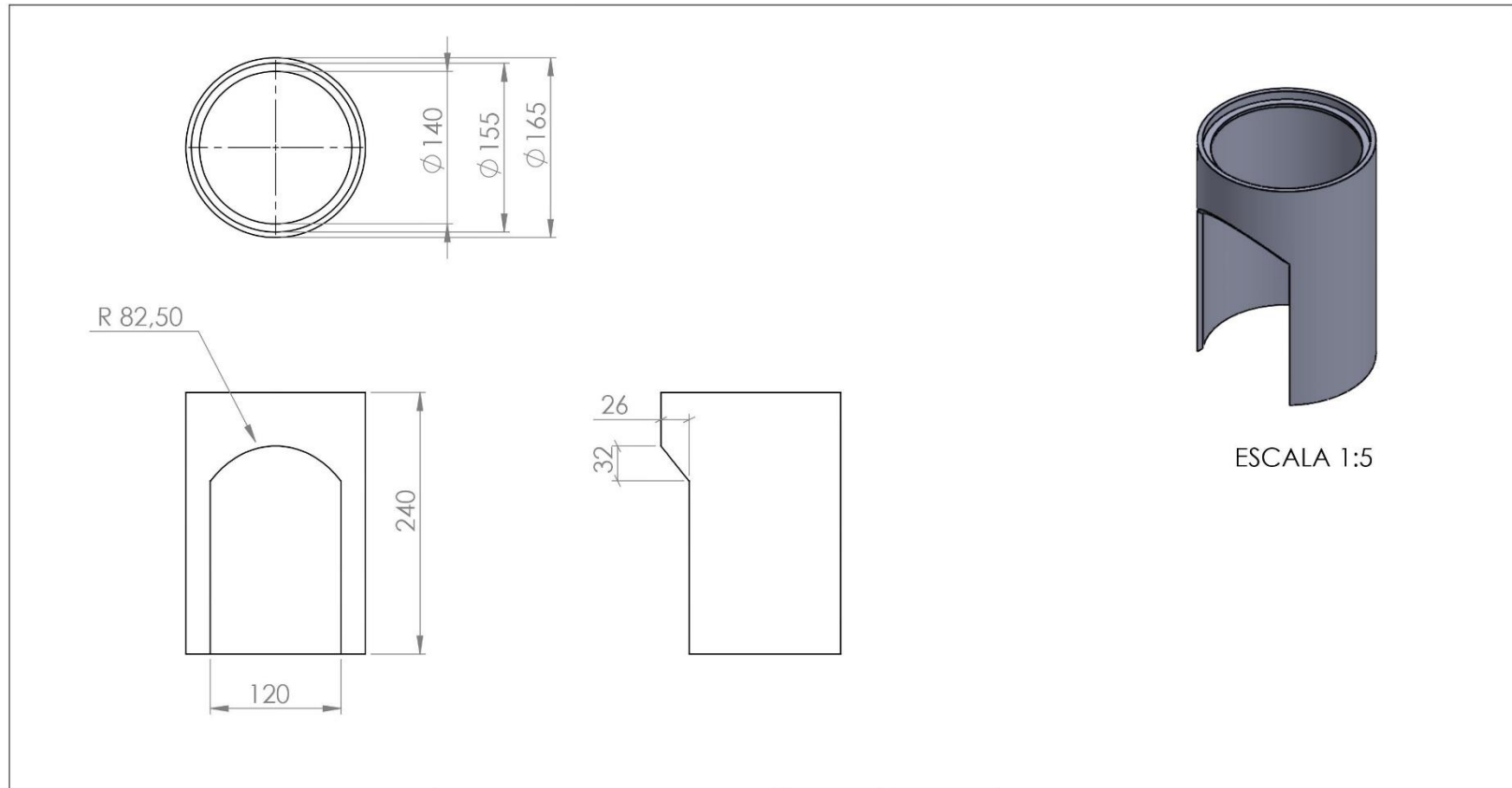
REVISÁ:

Yesid Javier Rueda

HOJA 8/12



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:			UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
Recortada con sierra plana y doblada en forma de "flange" con ayuda de prensa hidráulica	FECHA: 01/04/2024	TÍTULO: ALETA		
	ESCALA: 1:2	AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS		
	UNIDADES: mm	REVISAR: Yesid Javier Rueda		HOJA 9/12
	A4			



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Tubo redonde de 155 mm cortado con sierra de disco con la ayuda de guías de cinta y soldado una lamina circular de diametro 140 mm a 20 mm de la boca superior



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 01/04/2024

ESCALA: 1:5

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

Ducto entrada de aire

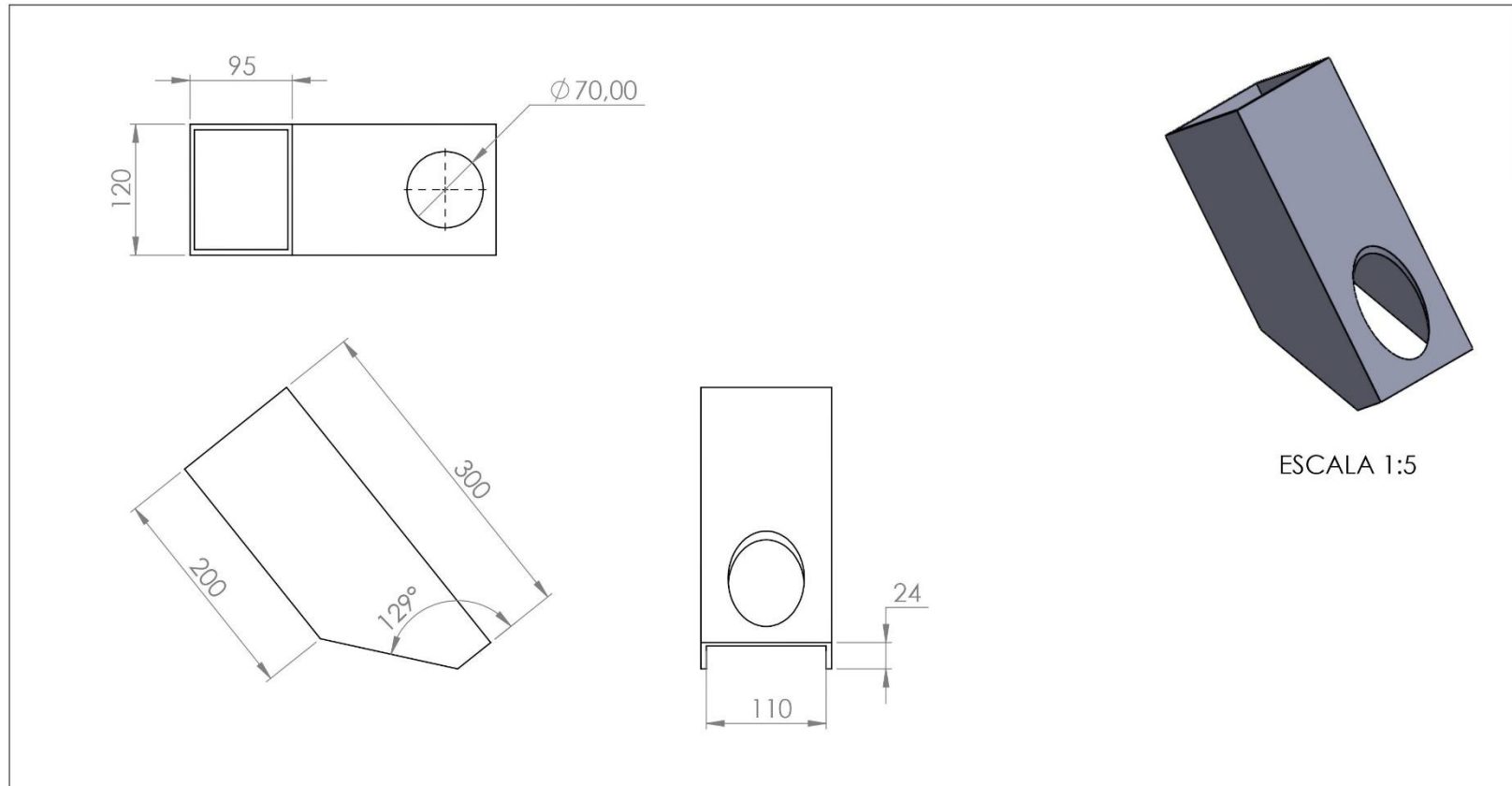
AUTOR:

OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS

REVISA:

Yesid Javier Rueda

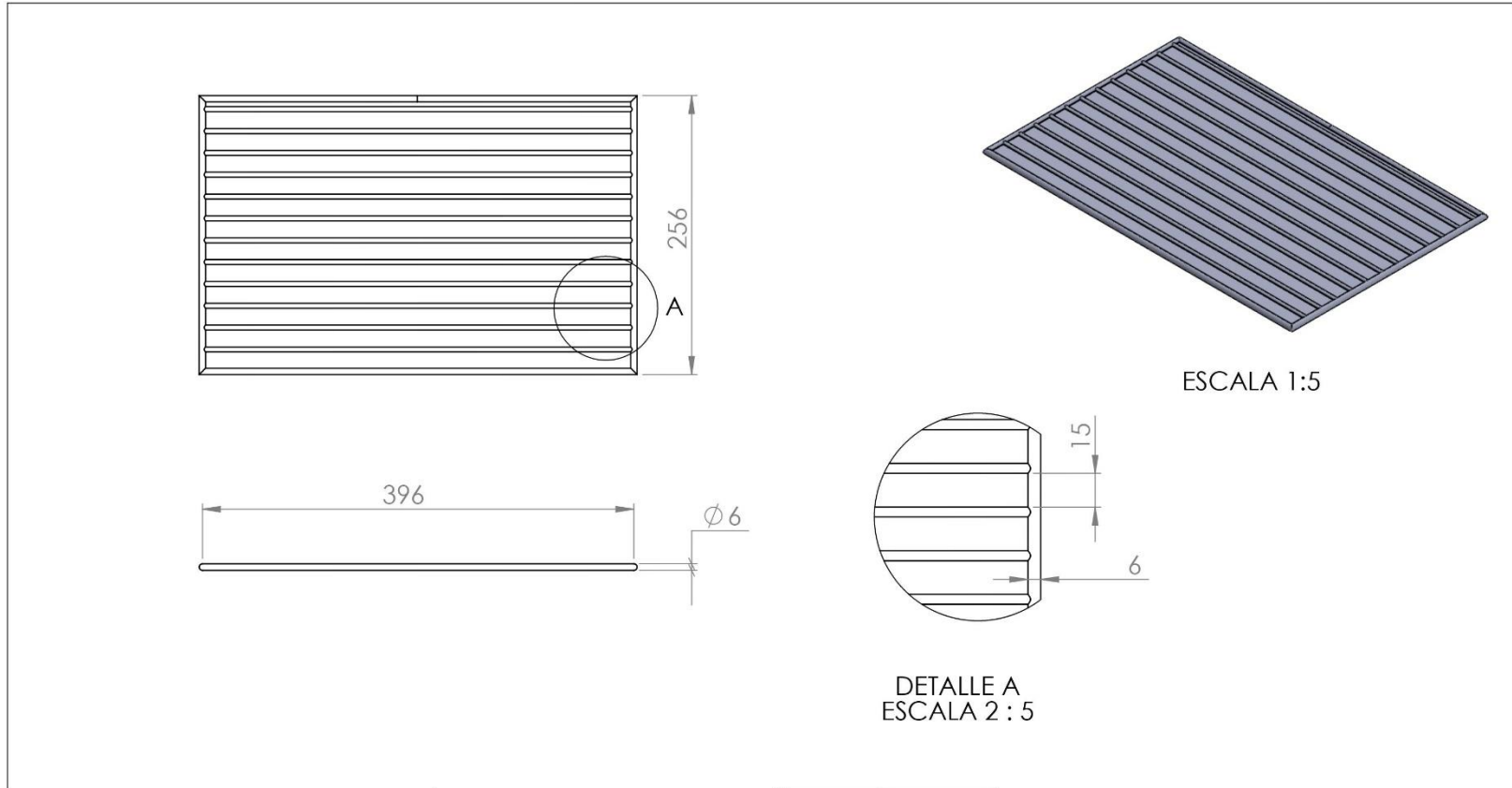
HOJA 10/12



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Tubo rectangular de 120 X 95 mm cortado a 120 ° y plantillado con tinta azul cortado con chorro

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
		FECHA: 01/04/2024	TITULO: ALIMENTADOR
		ESCALA: 1:5	AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS
		UNIDADES: mm	REVISAR: Yesid Javier Rueda
A4		HOJA 11/12	



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:			UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
Fundición gris en molde de arena	FECHA: 01/04/2024	TÍTULO: PARRILLA		
	ESCALA: 1:5	AUTOR: OSCAR JAVIER ROJAS ROJAS		
	UNIDADES: mm	REVISÓ: Yesid Javier Rueda		HOJA 12/12
	A4			