

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Rediseño de un horno de pirolisis para pruebas de biomasa vegetal

INGE-2800

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentado por:

Juan José Jacho Yáñez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## Dedicatoria

---

El presente proyecto es dedicado a mis padres, quienes, con su esfuerzo, sacrificio me dieron las herramientas para llegar hasta aquí. Su guía y apoyo han sido la base de todo lo que soy, aunque en ocasiones desearía haber hecho más para devolverles todo lo que me han dado. Cada logro que alcanzo es tan suyo como mío, y aunque el tiempo es implacable, espero haber estado a la altura de sus expectativas.

## Agradecimientos

---

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis profesores y tutores, cuya guía y conocimiento han sido fundamentales en la realización de este trabajo. Su dedicación, exigencia y orientación han enriquecido mi formación académica y profesional, impulsándome a alcanzar nuevos desafíos. A todos ustedes, mi más profundo reconocimiento.

## Declaración Expresa

---

Yo Juan José Jacho Yáñez acuerdo y reconozco que:

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

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

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

Guayaquil, \_\_14 de octubre \_del 2024.



Juan José Jacho Yáñez

Autor

## Evaluadores

---

**Ing. Macias Zambrano José**

**Alberto**

Profesor de Materia

---

**P.hD Peralta Jaramillo Juan**

**Manuel**

Tutor de proyecto

---

**P.hD Delgado Plaza Emérita**

**Alexandra**

Tutor de proyecto

## **Resumen**

El proyecto tiene como objetivo analizar térmicamente un horno modificado en desuso para la producción de biocarbón como parte de una futura investigación académica. Este enfoque reconoce la importancia de aprovechar los residuos agrícolas y forestales del Ecuador, desarrollar una economía circular y reducir el impacto ambiental. Un procesamiento adecuado permite alcanzar condiciones óptimas de pirólisis que contribuyen a la gestión sostenible de la biomasa residual.

El proceso incluye un análisis de la estructura existente, diseño conceptual y simulaciones térmicas realizadas en Flow Simulation de SolidWorks para verificar si es apto para soportar altas temperaturas. Para garantizar una distribución uniforme del calor se utilizan materiales como el acero A36 y ladrillos refractarios para una mejor estratificación de la temperatura. Además, se evaluaron los cambios en la potencia calórica, con tres condiciones diferentes probadas en simulación para determinar la tasa de trabajo óptima (+/- 25% de la energía basal).

Obteniendo una temperatura promedio en el interior de la cámara de combustión de 672 °C, lo que está dentro del rango de temperatura ideal de 500 a 700 °C para la pirólisis. Determinando así que el prototipo si cumple con las condiciones para trabajar a altas temperatura, cumpliendo con los requisitos propuestos para que se obtengan resultados efectivos y eficientes para promover el aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales.

**Palabras clave:** biochar, pirólisis, temperatura, simulación.

## **Abstract**

The project aims to build a prototype of a pyrolysis furnace using a modified boiler for the production of biochar as part of future academic research. This approach recognizes the importance of utilizing agricultural and forestry residues in Ecuador, developing a circular economy, and reducing environmental impact. Proper processing allows for achieving optimal pyrolysis conditions, contributing to the sustainable management of residual biomass.

The process includes an analysis of the existing structure, conceptual design, and thermal simulations performed in SolidWorks Flow Simulation to verify its suitability for withstanding high temperatures. To ensure uniform heat distribution, materials such as A36 steel and refractory bricks are used for better temperature stratification. Additionally, changes in calorific power were evaluated, with three different conditions tested in the simulation to determine the optimal working rate (+/- 25% of the baseline energy).

An average temperature of 672 °C was achieved inside the combustion chamber, which falls within the ideal temperature range of 500 to 700 °C for pyrolysis. This determines that the prototype meets the conditions to operate at high temperatures, fulfilling the proposed requirements to achieve effective and efficient results for promoting the utilization of agricultural and forestry residues.

**Keywords:** biochar, pyrolysis, temperature, simulation.

## Índice general

Resumen .....	i
Abstract .....	ii
Índice general.....	iii
Abreviaturas .....	vi
Simbología .....	vii
Índice de figuras .....	viii
Indice de planos .....	x
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción del Problema .....	1
1.3 Justificación del Problema.....	1
1.4 Objetivos.....	2
<i>1.4.1 Objetivo general</i> .....	2
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i> .....	2
1.5 Marco teórico .....	2
<i>1.5.1 Tipos de biomasa</i> .....	3
<i>1.5.2.1 Pirolisis lenta:</i> .....	6
<i>1.5.2.2 Pirolisis rápida:</i> .....	7
<i>1.5.2.3 Pirolisis flash ó ultrarrápido:</i> .....	7
<i>1.5.3 Ventajas del biochar en el suelo</i> .....	9
<i>1.5.4 Tipos de horno</i> .....	10
<i>1.5.4.1 Ventajas de los hornos metálicos</i> .....	10
<i>1.5.4.2 Desventajas de los hornos metálicos</i> .....	11
<i>1.5.4.3 Balance térmico en hornos pirolíticos</i> .....	11
<i>1.5.5 Evaporización de combustible</i> .....	11

1.5.6 Sistemas de agitación .....	13
1.5.7 Transferencia de calor .....	15
1.5.8 Ley de Fourier (conducción) .....	15
1.5.9 Ley de Newton (convección) .....	16
Capítulo 2 .....	16
2. Metodología.....	16
2.1 Matriz de selección .....	19
2.2 Diagrama de flujo:.....	21
2.3 Criterios de funcionamiento .....	21
2.4 Temperatura de funcionamiento.....	21
2.5 Software.....	22
2.6 SolidWorks Flow Simulation.....	22
2.7 Control de entrada de aire.....	23
2.8 Mantenimiento .....	23
2.9 Material .....	23
2.10 Carga .....	24
2.11 Restricciones .....	25
2.11.1 peso .....	25
2.11.2 Costo del producto .....	25
2.11.3 Eficiencia .....	26
2.11.4 Instalación .....	26
2.12 Cálculos del dimensionamiento y perdidas de calor .....	26
2.12.1 Masa real por consumir .....	27
2.12.2 Balance de masa: .....	27
2.12.3 Masa de combustible: .....	27
2.12.4 Masa de aire .....	27
2.12.5 Masa de cenizas .....	29

2.12.6 Masa de gases .....	30
2.12.7 Balance de energía .....	30
2.12.8 Perdidas de calor: .....	33
2.12.9 Calor por convección .....	34
2.12.10 Coeficiente convectivo .....	38
2.12.11 Eficiencia .....	39
2.13 Condiciones de temperatura en Flow Simulation de SolidWorks .....	40
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>41</b>
3.1 Simulación térmica de la cámara interior del horno pirolítico y análisis de temperatura.....	41
3.2 Valoración del horno en rehusó .....	42
3.3 Simulación térmica .....	45
3.3.1 CASO 1 .....	46
3.3.2 CASO 2: .....	48
3.3.3 CASO 3: .....	50
3.4 Potencia de ventilador .....	51
3.5 Análisis de resultados .....	52
3.6 Costos de componentes.....	53
<b>CAPITULO 4</b> .....	<b>55</b>
4.1 Conclusiones.....	55
4.2 Recomendaciones.....	56
Referencias .....	56
<b>APENDICES</b> .....	<b>60</b>

## **Abreviaturas**

AISI: American Iron and Steel Institute

ASTM American Society for Testing and Materials

ATM Atmosfera

CAD Diseño Asistido por Computadora

CDTS Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ISIMA Instituto de Silvicultura Industria de la Madera

PSIA Libras por pulgada cuadrada absoluta

## Simbología

m	Metro
kg	Kilogramo
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo
pH	Potencial de Hidrógeno
Atm	Atmosfera
h	coeficiente de transferencia de calor por convección
W	vatio
K	kelvin
$\rho$	densidad
$\varepsilon$	emisividad
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann
Nu	Nusselt
Gr	numero de Grashof
Ra	numero de Rayleigh
Pr	Prandtl
R	constante de gases
\$	dólar

## Índice de figuras

Figura 1.1	Proceso termoquímico de pirolisis .....	9
Figura 1.2	Balace de energía .....	11
Figura 1.3	Gradiente de calor .....	15
Figura 2.1	Microgasificador Toucan para producción de biochar.....	17
Figura 2.2	Diagrama de flujo.....	21
Figura 2.3	Temperatura del aire entre el cilindro interior y exterior del horno 634°C .	40
Figura 2.4	Convergencia de temperatura de aire entre cilindro interior y exterior .....	41
Figura 2.5	Velocidad promedio de entrada de aire.....	41
Figura 3.1	Cilindro interior y exterior del horno en rehúso .....	43
Figura 3.2	Modelos CAD de horno en CDTS-ESPOL.....	43
Figura 3.3	Selección de material para simulación en software .....	45
Figura 3.4	Simulación térmica convectiva de cilindro interior a 672°C .....	46
Figura 3.5	Convergencia de temperatura en estado estable a 672°C .....	46
Figura 3.6	Simulación térmica convectiva de cilindro interior a 505°C .....	48
Figura 3.7	Convergencia de temperatura en estado estable a 505°C .....	48
Figura 3.8	Simulación térmica convectiva de cilindro interior a 940°C .....	50
Figura 3.9	Convergencia de temperatura en estado estable a 940°C .....	50

## Índice de tablas

Tabla 1.1 <i>Tipos de biomasa y sus residuos</i> .....	3
Tabla 1.2 <i>Propiedades de algunos residuos agroforestales y del carbón vegetal</i> .....	4
Tabla 1.3 <i>Matriz del proceso de pirolisis y sus resultados:</i> .....	7
Tabla 1.4 <i>Tipos de agitadores usados para hornos estáticos</i> .....	13
Tabla 2.1 <i>Matriz comparativa</i> .....	19
Tabla 2.2 <i>Propiedades mecánicas y térmicas del acero ASTM A36</i> .....	23
Tabla 2.3 <i>Duración de ensayo y porcentaje de elongación para espesores de 5mm a 8mm a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650 °C.</i> .....	24
Tabla 2.4 <i>Deformación instantánea para espesores de 5mm a 8mm a altas temperaturas</i> .....	25
Tabla 3.1 <i>Componentes de horno en desuso</i> .....	44
Tabla 3.2 <i>Comparación de los Tres Casos de Simulación Térmica</i> .....	53
Tabla 3.3 <i>Tabla de costos de adquisición</i> .....	54

## Índice de planos

Plano 1 <i>Vista explosionada y de sección del prototipo</i> .....	1
Plano 2 <i>Vista isométrica de cilindro exterior</i> .....	2
Plano 3 <i>Vista isométrica de cilindro interior</i> .....	3
Plano 4 <i>Vista isométrica de tapa de cilindro interior</i> .....	4
Plano 5 <i>Vista isométrica de ventilador</i> .....	5

## Capítulo 1

### 1.1 Introducción

Un horno de pirólisis es un diseño viable, económico y sostenible para la gestión de desechos agroforestales donde se genera una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y un producto final, el carbón vegetal, que es un subproducto comerciable, estos beneficios de flujo de residuos y recirculación de gases son posibles al quemar biomasa en la ausencia de oxígeno dándose la posibilidad de reemplazar el producto final con carbón mineral. La construcción de este prototipo podrá tomar en consideración los principios de transferencia de calor y un diseño mecánico orientado y en adherencia a las normas.

El primer capítulo describirá las definiciones del proceso de convertir los residuos agroforestales en energía térmica y describirá la tipología de biomasa y la pirólisis.

### 1.2 Descripción del Problema

En el centro de desarrollo tecnológico y sostenible (CDTS) de Espol en conjunto con Instituto de Silvicultura Industria de la Madera (ISIMA), de México, se encuentra realizando investigaciones conjuntas sobre uso de los residuos forestales específicamente para la generación de biochar. A partir de la aplicación economía circular partir, el CDTS se ha propuesto adaptar un horno de combustión que fue dejado en desuso hacía varios años, en un horno de pirolisis. Para ello, se realizar el rediseño del equipo que servirá para futuras investigaciones entre ambos grupos.

### 1.3 Justificación del Problema

En la actualidad en Ecuador existe una gran cantidad de residuos orgánicos fuentes generadoras de biomasa que no se reutilizan, solo en Guayaquil se generan alrededor de

19 toneladas de residuos forestales al año, con una estimación de 380 Terajulios al año, y solo de ese sector. A diferencia de los combustibles fósiles, la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero, ya que el carbono que se libera y forma parte de la atmósfera actual, es aquel que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento. Este biocarbón se puede obtener de diferentes fuentes de residuos como del sector agroindustrial (bagazo de caña, cascara de arroz, hojas de plátano, cáscara de cacao, etc.), forestal (restos de plantaciones, ramas secas, raíces) pecuario (metano) empleando descomposición térmica (pirólisis), teniendo gran potencial en la industria agrícola, energética, alimenticia y farmacéutica.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

- Analizar térmicamente un horno en desuso a través de un software CAD para el desarrollo de futuras investigaciones académicas.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Realizar la valorización de la infraestructura del horno actual con la finalidad del desarrollo de alternativa del diseño térmico, estructural y sistema de control de baja costo.
2. Dimensionar los componentes necesarios para el diseño del prototipo
3. Realizar la validación termodinámica del horno mediante simulaciones en Flow Simulation de SolidWorks para la generación de biochar.

## **1.5 Marco teórico**

La biomasa, que corresponde a la materia orgánica reservada, reciclada y no fosilizada, es la energía renovada de origen solar. Esta materia contiene energía durante períodos prolongados hasta que se descompone completamente y pierde su valor

de contenido energético. Sin embargo, a través de procesos que incluyen la combustión, esta energía puede ser recuperada y convertida en combustibles de bioconversión. Las biomasa pueden presentarse en forma de sólidos, líquidos o gases, y es la fuente de energía renovable más utilizada en todo el mundo. Según la Agencia Internacional de Energía, la biomasa representa entre el 10 y el 14 por ciento del consumo energético mundial y, por lo tanto, es un recurso clave en la transición hacia fuentes de energía más limpias. Este recurso es importante no solo por su abundancia, sino también por su potencial para reemplazar combustibles fósiles y disminuir el daño ambiental. Los residuos incluyen productos de desecho agroforestales como madera, cáscaras de coco y salvado de arroz, que son biomasa de origen lignocelulósico. Estos subproductos de madera tienen beneficios económicos en la industria de energía renovable, pero existe una oportunidad infrutilizada para su utilización en términos de eficiencia energética térmica que no se ha agotado completamente. (IDAE, 2007)

### ***1.5.1 Tipos de biomasa***

La biomasa tiene múltiples orígenes, como la biomasa terrestre, acuática y los residuos provenientes de los sectores municipales, agrícolas, forestales e industriales. En resumen, la biomasa primaria o virgen proviene directamente de las plantas. (Basu, 2010)

**Tabla 1.1**

*Tipos de biomasa y sus residuos*

Origen	Residuos
Biomasa terrestre	Biomasa Forestal Pasto Cultivos
	Energéticos Cultivos
Biomasa acuáticas	Algas Plantas de Agua

Biomasa residual urbana	Residuos orgánicos de desechos domésticos, jardines, y parques.
Biomasa residual agrícola	Restos de cultivos, paja, cáscaras de frutas, residuos de poda, etc.
Biomasa residual forestal	Restos de tala, ramas, cortezas de árboles, etc.
Biomasa residual industrial	Subproductos de industrias agroalimentarias, papelera, maderera, etc.

(Basu, 2010)

**Tabla 1.2**

*Propiedades de algunos residuos agroforestales y del carbón vegetal*

Residuo Agroforestal	Poder C. (MJ/kg)	Humedad (%)	Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Oxígeno (%)	Cenizas (%)
Carbón vegetal	29 - 33	5 - 10	70 - 80	3 - 5	10 - 15	1 - 5
Madera	15 - 20	20 - 60	45 - 50	5 - 6	40 - 45	0.5 - 2
Cáscara de coco	17 - 20	10 - 12	48 - 51	5 - 6	40 - 42	1 - 2
Cáscara de café	16 - 18	8 - 12	45 - 48	5 - 6	42 - 44	1 - 2

Aceite de palma	37 - 39	< 1	76 - 80	10 - 12	9 - 10	< 1
Cáscara de arroz	12 - 15	8 - 10	35 - 40	4 - 6	35 - 40	15 - 20

(Higman, 2008)

*Nota:* Estas características determinan su comportamiento térmico y eficiencia en la conversión a biocarbón.

La pirolisis es un proceso termoquímico que descompone materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, mediante la aplicación de calor, lo que provoca la ruptura de enlaces químicos en la materia prima. (CEUPE, 2019)

El término "pirolisis" proviene del griego, donde "pyro" significa fuego y "lisis" se refiere a la descomposición en componentes básicos. En la práctica, es casi imposible lograr un ambiente completamente libre de oxígeno, por lo que siempre ocurrirá una mínima oxidación, aunque esta es mucho menor que en la combustión, donde la biomasa se oxida por completo, liberando mayor cantidad de CO<sub>2</sub>. (Klug, 2012)

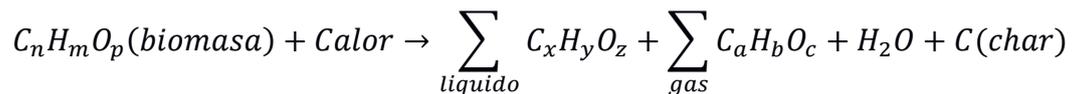
García y colaboradores aclaran que, en el transcurso de la pirólisis, la biomasa orgánica pasa por la conversión de uno de tres productos finales dominantes, a saber, un gas (gas de síntesis), un líquido (bioaceite) y un residuo sólido (biochar), siendo las proporciones relativas de estos productos diferentes según la materia prima y la periferia del proceso.

Además, la eficiencia y el rendimiento de los productos en un proceso dado están determinados por factores como la temperatura, el tiempo de residencia y la tasa de aplicación de calor, lo que hace que el proceso de conversión sea flexible y ajustable a la producción de cualquier producto deseado, ya sea para la producción de energía o

destinado a mejorar la salud del suelo mediante la aplicación de biochar. (C. García-Izquierdo, 2014)

### **1.5.2 Tipos de pirolisis**

El proceso de pirolisis puede ser representado por una reacción general presentada a continuación:



Actualmente, los tipos más comunes de pirolisis utilizados para producir biochar son los métodos de pirolisis rápida y lenta, que generan biochar, gas y bioaceite. Sin embargo, la cantidad y las características de estos productos varían según las condiciones operativas utilizadas. Además, los sistemas de gasificación también se utilizan para la producción de biochar, aunque en menor medida que los métodos de pirolisis lenta o rápida. (Balcázar, 2014).

#### **1.5.2.1 Pirolisis lenta:**

Es un proceso de descomposición que puede tener lugar a temperaturas de aproximadamente 500 °C a 700 °C con tiempos de reacción relativamente más largos que pueden durar horas o incluso días. En este tipo de pirolisis, el objetivo principal es aumentar la cantidad de material sólido, principalmente carbón o biochar, de modo que la producción de líquidos y gases sea de menor importancia.

- La carbonización se refiere al calentamiento lento de una materia prima en ausencia de aire (oxígeno) a baja temperatura (400-500 °C) durante un largo período de tiempo. Dado que la vaporización es un proceso prolongado, los vapores generados parecen seguir reaccionando entre sí, lo que aumenta el sólido final conocido como carbón.

- En el método de pirólisis convencional, el calentamiento comienza lentamente al principio y continúa hasta que se alcanza una temperatura final de 600 grados en un lapso de 1 a 3 horas. Durante este proceso, se obtienen 3 tipos de productos: gas, líquido y carbón.

**1.5.2.2 Pirolisis rápida:**

Se lleva a cabo a temperaturas entre 400 y 800°C y tiene tiempos de reacción muy cortos, de apenas segundos o minutos. Este tipo de pirólisis está diseñado para maximizar la producción de líquidos, como el bio-aceite, mientras que la cantidad de sólidos y gases es menor.

**1.5.2.3 Pirolisis flash ó ultrarrápido:**

Es un proceso que se realiza a temperaturas muy altas, entre 800 y 1000°C, en tiempos extremadamente cortos, en el orden de milisegundos. El objetivo principal es la producción de gases, como el syngas, y se utiliza en situaciones donde se requiere la mayor cantidad posible de gas combustible.

**Tabla 1.3**

*Matriz del proceso de pirolisis y sus resultados:*

---

Tipos de pirolisis	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura final	Productos obtenidos
--------------------	----------------------	----------------------------	-------------------	---------------------

---

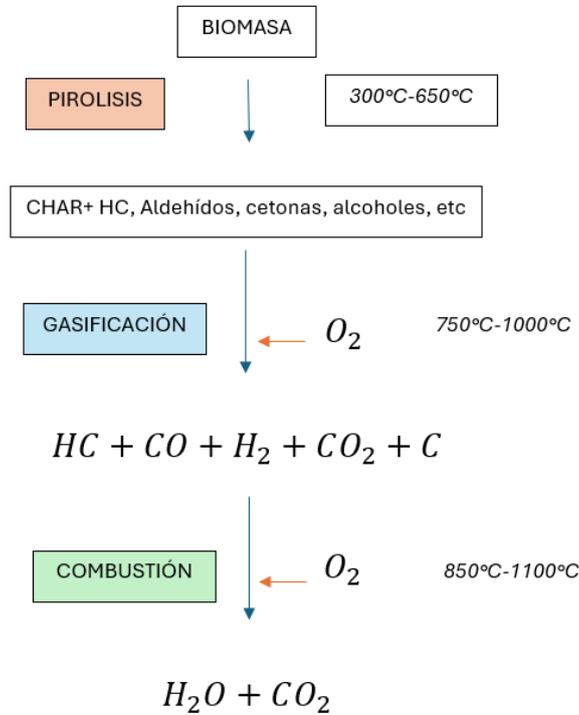
Carbonización	Días	Muy lenta	400°C- 500°C	Carbón vegetal
Convencional	1-3 horas	Lenta	600°C	Carbón líquido y gas
Rápida	Menos de 2 segundos	Rápida	Mayor que 750°C	Bioaceite, gas y carbón
Flash	Meno de 1 segundo	Muy rápida	1000°C	Gas y bioaceite

(Mayoral, 2015)

A continuación, se presenta un resumen del proceso termoquímico

**Figura 1.1**

*Proceso termoquímico de pirolisis*



(Higman, 2008)

### **1.5.3 Ventajas del biochar en el suelo**

El biocarbón, como lo conocen los especialistas, es un recurso más para la mejora del suelo que además de aumentar la producción de biomasa, también ayuda a mejorar la estructura del suelo de tal forma que la producción de biomasa es favorecida, no solo incrementa la eficiencia de los fertilizantes, sino que igualmente reduce el desperdicio de ellos. El biochar tiene múltiples efectos positivos en los suelos, tales como una mayor capacidad de retención de agua, mejor conservación de nutrientes y una mayor actividad microbiana, lo que en su conjunto incrementa la productividad agrícola.

Una ventaja clave del biochar es que puede ser usado para secuestrar carbono en el suelo por largos periodos, lo que también ayuda en el crecimiento de las plantas, entre sus efectos, se observa el impacto en la reducción de metano y óxido nitroso, una

disminución de la pérdida de nutrientes y el aumento de la fertilidad de las tierras, tal como en algunas investigaciones. (G. Torres-Sallan, 2014)

#### ***1.5.4 Tipos de horno***

Existen 2 tipos de hornos, los estáticos y los rotativos que pueden utilizarse para la producción de biochar:

Los hornos a pirólisis estáticos son dispositivos sencillos y económicos que utilizan calor para descomponer el material en una cámara estacionaria que no se mueve, de manera que la temperatura y el tiempo de residencia pueden ser controlados con precisión. Son fáciles de manejar y rendir, además son adecuados para la producción de productos de alta calidad. (Kintek, 2024)

Los hornos de pirólisis rotativos tienen un tambor giratorio para un calentamiento uniforme del material que mejora la transferencia de calor y una conversión más fácil que permiten procesar una mayor cantidad de biomasa al mismo tiempo y con menos tiempo de procesamiento. Sin embargo, su diseño es más complicado y caro que el de los estáticos. (Kintek, 2024)

##### ***1.5.4.1 Ventajas de los hornos metálicos***

Entre las ventajas de los hornos metálicos están una mejor capacidad para manejar la salida de gases durante el pirólisis porque la materia prima se coloca en un recipiente hermético. Además, toda la cantidad de biochar es utilizable, la facilidad de transporte, el bajo costo y un nivel insignificante de mantenimiento. Una ventaja importante es una eficiencia constante de la carbonización y la completitud de la aplicación de carbón. (Anchaluisa, 2013)

#### ***1.5.4.2 Desventajas de los hornos metálicos***

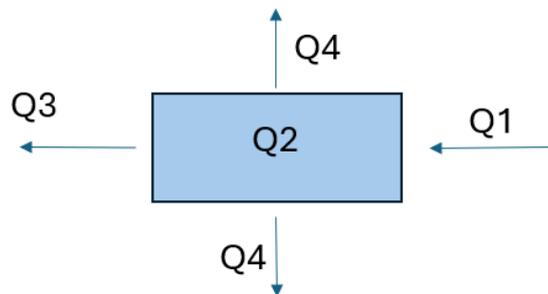
Sus principales desventajas incluyen la necesidad de cortar la madera en trozos medianos y secarla durante al menos tres semanas. Además, tienen una vida útil corta de 2 a 3 años, ofrecen bajo aislamiento térmico, lo que causa pérdida de calor, y requieren medios de transporte como camiones o remolques. (Anchaluisa, 2013)

#### ***1.5.4.3 Balance térmico en hornos pirolíticos***

El balance térmico de estos hornos se basa en igualar el calor aportado con el utilizado y las pérdidas. El calor aportado ( $Q_1$ ) debe ser igual al calor consumido en el proceso ( $Q_2$ ) más las pérdidas por los gases ( $Q_3$ ) y las paredes del horno ( $Q_4$ ).

**Figura 1.2**

*Balance de energía*



#### ***1.5.5 Evaporización de combustible***

En el caso de los combustibles líquidos, la presión parcial de vapor del combustible en irradiar proximidad a la superficie del líquido está en equilibrio con la fase líquida. La presión de saturación del líquido es la presión que determina la fracción molar del combustible en la superficie del líquido. Existen tablas de la presión de saturación y la temperatura para muchos comburentes. De ser el caso que no se cuente

con tal tabla, es razonable usar las ecuaciones de los científicos Clausius-Clapeyron o Antoine. (Fernandez-Pello, 2011)

$$m_F = A_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

*Ecuación de Clausius-Clapeyron*

Donde,  $A_0$  es un factor pre-exponencial,  $E_a$  es la energía de activación para pirolisis, siendo estas propiedades del material, también la velocidad de pirólisis depende en gran medida de la temperatura, es muy lenta a bajas temperaturas, pero a temperaturas suficientemente altas, la velocidad de la pirólisis aumenta drásticamente, y la temperatura correspondiente se llama temperatura de pirólisis. Si se conoce el perfil de la temperatura, dentro del sólido, el caudal másico de combustible que sale de la superficie del combustible se puede calcular con la siguiente ecuación: (Fernandez-Pello, 2011)

$$m_F = \int_0^{\delta_{py}} A_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} dx$$

*Ecuación de caudal masico de combustible*

Donde  $\delta_{py}$  es la profundidad de la capa solida calentada lo cual, en última instancia, da como resultado los gradientes de concentración de combustible y aire en la superficie del combustible condensado. El desafío radica en que el pirólisis de la madera es un proceso de descomposición que produce biocombustibles, la madera se descompone con calor para producir biocombustibles a través del proceso de pirolisis. Esto resulta ser ventajoso energéticamente porque genera calor al descomponer los productos de pirolisis mayor al calor requerido para descomponer la madera por pirólisis lo que implica que los productos resultantes en su mayoría son gaseosos y difíciles de condensar y muestran relativamente bajos valores energéticos. (Fernandez-Pello, 2011)

### 1.5.6 Sistemas de agitación

La agitación se utiliza principalmente en procesos industriales para homogeneizar mezclas de dos o más componentes, también tiene otros usos prácticos como: Suspensión de sólidos en líquidos lo cual evita la concentración de sólidos en determinadas zonas del recipiente, favoreciendo así su disolución en el líquido; Intercambio de calor entre líquidos lo cual ayuda a mantener una temperatura uniforme de la mezcla; Mejora la fermentación la cual permite una distribución uniforme de microorganismos en procesos aeróbicos y anaeróbicos.

La selección del agitador apropiado depende de factores como el tipo de material, las características del proceso, el movimiento (axial, radial, tangencial), la viscosidad del componente y la geometría del recipiente, esto le brinda la oportunidad de elegir una amplia variedad de agitadores diseñados específicamente para estos requisitos. (Castillo Uribe, 2013)

#### Tabla 1.4

##### *Tipos de agitadores usados para hornos estáticos*

---

Agitador de palas	Su impulsor suele ser paralelo al eje y produce movimientos principalmente radiales y tangenciales, a bajas velocidades proporciona un movimiento suave, pero a altas velocidades se requiere un deflector para controlar el movimiento de la masa.	
-------------------	---	---

---

trabaja cerca de las paredes del recipiente y evita que el material se adhiera a las paredes, lo que lo hace ideal para mezclas viscosas, su movimiento es casi circular, lo que limita su capacidad de mezcla.

Agitador de ancla



Produce principalmente movimiento axial, promoviendo tanto la homogeneización como la transferencia de calor, lo que lo hace efectivo en mezclas de baja viscosidad y a altas velocidades.

Agitador de hélice



Produce movimientos radiales y tangenciales que forman un vórtice, además de que las hojas pueden tener una variedad de formas (rectas, curvas, inclinadas), lo que permite un funcionamiento eficiente en una amplia gama de velocidades.

Agitador de turbina



---

*Nota: se determinará un diseño de agitador en caso de que el cilindro interior no alcance la temperatura de pirolisis*

(Mompeán, 2022)

### 1.5.7 Transferencia de calor

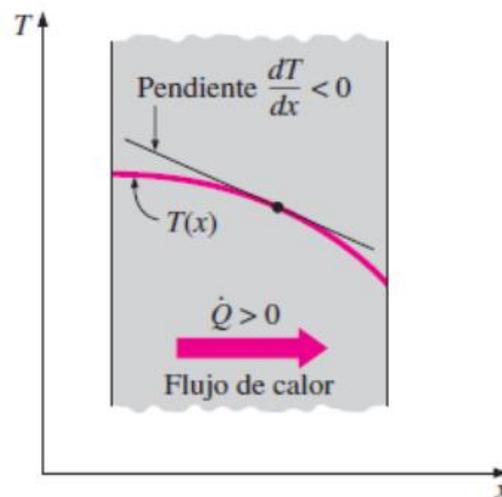
La transferencia de calor ocurre de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura, deteniéndose cuando ambas temperaturas se igualan. Los métodos de transferencia de calor incluyen conducción, convección y radiación. En la conducción, la energía se transfiere entre partículas más energéticas hacia las menos energéticas. En la convección, la energía se transfiere entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, siendo más rápida que la conducción. (Cengel, 2011)

### 1.5.8 Ley de Fourier (conducción)

La cantidad de calor transferida por conducción es proporcional al gradiente de temperatura y el área, e inversamente proporcional a la distancia. (Cengel, 2011)

**Figura 1.3**

*Gradiente de calor*



*Nota: Figura de referencia tomada de (Cengel, 2011)*

Donde

$$Q_{\text{cond}} = -k * A * \frac{dT}{dx}$$

$k$ : conducción térmica del material, [W/m · °C].

$A$ : área de la pared, [m<sup>2</sup>].

$dT/dx$ : gradiente de temperatura, [°C].

### **1.5.9 Ley de Newton (convección)**

La velocidad de transferencia de calor por convección depende de la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido adyacente, y del coeficiente de transferencia de calor y se expresa como. (Cengel, 2011)

$$Q_{conv} = h * A_s * (T_s - T_{\infty})$$

$h$ : coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m<sup>2</sup> · °C].

$A_s$ : área superficial de transferencia de calor, [m<sup>2</sup>]

$T_s$ : temperatura de la superficie, [°C].

$T_{\infty}$ : temperatura del fluido lejos de la superficie. [°C].

## **Capítulo 2**

### **2. Metodología.**

Este capítulo explora el diseño tanto conceptual como complejo, siguiendo las fases de la secuencia de diseño. Inicialmente se establecen pautas y limitaciones primarias para elegir la opción óptima entre las posibles adecuaciones que se realizaran en el horno, de tal forma que se llegue a los resultados esperados

Además, se llevará a cabo el modelado del rediseño del horno y una simulación orientada a realizar un análisis térmico en Flow Simulation de SolidWorks, detallando información sobre la estructura y cualidades térmicas del mismo durante su operación. Este análisis también permitirá identificar posibles errores derivados de las fases anteriores del diseño.

De darse la situación en que el modelo térmico no llegue a la temperatura adecuada dentro del horno durante su operación, se llevara a cabo una selección de agitadores, los cuales ayudaran en la distribución térmica por toda la biomasa de tal forma que se llegue a la descomposición total del material orgánico.

Cuando el equipo cumpla con los estándares establecidos al inicio del proyecto, se crearán los planos de construcción del modelo definitivo. En última instancia, se presentará el gasto total del proyecto, según lo estimado mediante cotizaciones de los componentes u operaciones añadidos en la estructura.

Como alternativa, un diseño como microgasificador que también podría usarse para producir biocarbón de alta pureza y bajo volumen el cual consta de dos cilindros de diferentes diámetros, uno encima del otro, como se muestra en la Figura 2.1, en donde se produce pirolisis siendo un horno de tipo estacionario

### **Figura 2.1**

*Microgasificador Toucan para producción de biochar*



Nota: *figura de referencia tomada de (Roth, 2011)*

El aire primario ingresa a través del orificio ubicado en la parte inferior del cilindro de mayor diámetro, que debe estar ligeramente por encima del suelo. Utilice un soporte o elevador. Además, el flujo de aire secundario ingresa por encima del cilindro más grande a través de aberturas ubicadas en el cilindro de menor diámetro. El cilindro de mayor diámetro sirve como tanque de combustible principal y no tiene ventilación lateral, por lo tanto, colocándolo directamente sobre el suelo se cierran las aberturas de aire de su parte inferior, y cerrando la parte superior con una tapa el sistema queda completamente sellado. Esto evita que el carbón se gasifique en un ambiente rico en oxígeno, promoviendo así la formación de biocarbón. (Roth, 2011)

Por otro lado, un horno de pirólisis de lecho fijo es un dispositivo diseñado para descomponer biomasa mediante calor sin oxígeno, generando biocarbón, biocombustible y gases que se pueden quemar, la biomasa se coloca de manera fija en un lecho estable, lo que lo distingue de otros tipos como los hornos giratorios o de lecho fluidizado. Opera a temperaturas que varían entre 400 y 700 grados Celsius, según el producto que se busque, y emplea una fuente de calor externa para calentar el material, con estructura simple, incluyendo una cámara para la combustión, aislantes térmicos y sistemas básicos que regulan el calor y la circulación del aire, lo que lo hace económico y fácil de manejar, además es particularmente efectivo para crear biocarbón de alta calidad, que se utiliza para mejorar suelos o en la captura de carbono, permitiendo también el uso de residuos orgánicos. Sin embargo, su capacidad suele ser restringida y demanda un diseño meticuloso para asegurar una adecuada distribución del calor y prevenir áreas frías. Su bajo costo y simplicidad lo hacen perfecto para usos locales o proyectos piloto que promueven la sostenibilidad. (KINTEK, 2025)

## 2.1 Matriz de selección

Por medio de la matriz de la tabla 1 se realizara una comparacion entre los tipos de gasificador más parecidos a la estructura del horno en rehuso para proceder a su adaptación, en donde se cuenta con criterios de selección tales como:

- Eficiencia térmica (25%): Capacidad de generar calor uniforme y suficiente para el proceso de pirólisis.
- Producción de biochar (20%): Rendimiento y calidad del biochar producido.
- Facilidad de integración (15%): Compatibilidad con el diseño del horno actual.
- Costo de implementación (20%): Inversión requerida para el rediseño.
- Durabilidad y mantenimiento (10%): Resistencia estructural y facilidad de mantenimiento.
- Impacto ambiental (10%): Nivel de emisiones y sostenibilidad del sistema.

**Tabla 2.1**

*Matriz comparativa*

Criterio	Peso (%)	1G Toucan	Microgasificador de Lecho Fijo	Comentarios
Eficiencia térmica	25	9/10	8/10	El 1G Toucan tiene mayor control del flujo de aire
Producción de biochar	20	8/10	9/10	El lecho fijo tiene un rendimiento más uniforme de biochar
Facilidad de integración	15	7/10	6/10	El diseño de lecho fijo requiere más

				modificaciones en el horno actual.
Costo de implementación	20	7/10	8/10	El lecho fijo tiene un diseño más simple y económico.
Durabilidad y mantenimiento	10	8/10	9/10	El lecho fijo es más resistente y tiene menos partes móviles.
Impacto ambiental	10	9/10	7/10	El 1G Toucan genera menos emisiones

Obteniendo así un resultado de 7.95 para el 1G Toucan y 7.90 para el microgasificador de lecho fijo, por lo tanto, para el rediseño del horno pirolítico de doble tambor, se adaptará el horno en desuso para que sea de tipo estacionario ya que el horno que se reusara se asemeja a un 1G Toucan pero de lecho fijo, que presentan las siguientes características principales como se indica en la tabla 2.1:

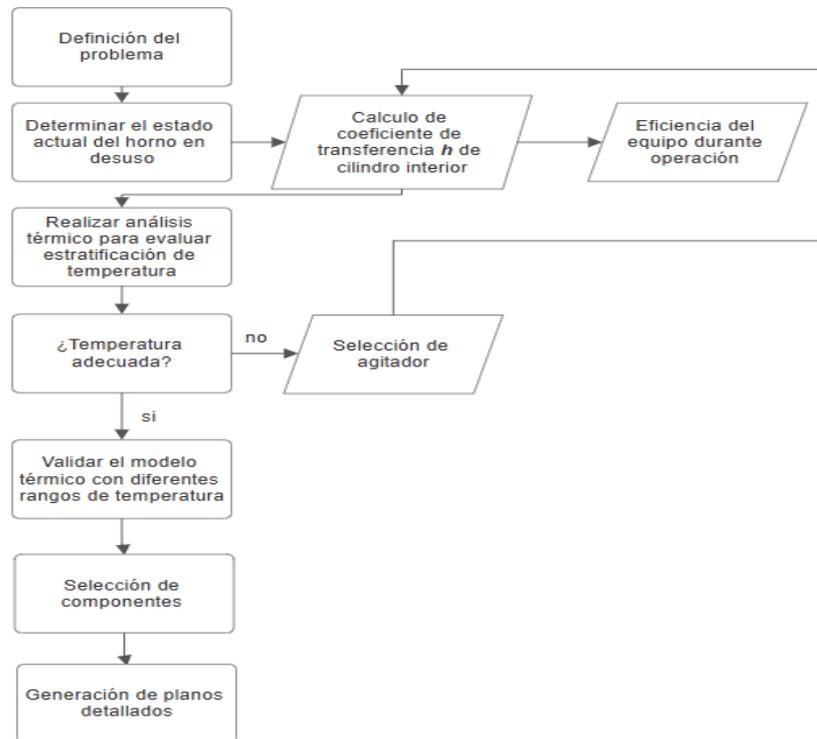
- Las dimensiones de las secciones principales se ajustan para una capacidad aproximada de 35 litros.
- Las dos partes fundamentales del horno tienen forma cilíndrica.
- El material empleado es acero A36 de 7mm, adecuado para soportar condiciones de intemperie y altas temperaturas.
- Los orificios de entrada de aire están ubicados tanto en la parte superior como en la inferior del horno.

- La tapa superior del horno incluye una abertura cilíndrica que permite la liberación de gases hacia la atmósfera.

## 2.2 Diagrama de flujo:

**Figura 2.2**

*Diagrama de flujo*



## 2.3 Criterios de funcionamiento

Es necesario establecer previamente ciertos criterios de funcionamiento para realizar las adaptaciones de los componentes correspondientes, son generalmente indicadas por el cliente o el usuario del producto, en este caso, los docentes del CDTS.

## 2.4 Temperatura de funcionamiento

Es esencial que el horno de pirólisis funcione a una temperatura específica para descomponer los materiales por el calor en la atmósfera sin oxígeno. Los rangos variarán de 500 °C a 700 °C. Al mismo tiempo, es necesaria una distribución de

temperatura a lo largo del sistema. Es vital para la eficiencia del proceso y los productos finales homogéneos.

## **2.5 Software**

Hoy en día, se utilizan medios computacionales especiales para crear simulaciones, que son como versiones virtuales de situaciones de la vida real. La simulación en SolidWorks, parte del paquete SolidWorks Flow Simulation, es una herramienta popular utilizada por empresas y estudiantes para analizar modelos CAD, calcular y validar diversos aspectos de su trabajo, pero la desventaja es que requiere muchos recursos, lo que puede ser un desafío para las computadoras que no tienen mucha potencia para procesamiento de datos (Ferreira, 2021)

## **2.6 SolidWorks Flow Simulation**

Este programa de análisis y verificación somete a los prototipos a escenarios que replican condiciones reales, mejorando la calidad del producto y, simultáneamente, disminuyendo los gastos de fabricación de prototipos donde sus funciones principales son las siguientes.

- Gracias a la capacidad de configurar y comprobar productos mediante ordenador antes de fabricarlos, se reducen los errores y se evita la necesidad de numerosas versiones de prueba.
- Ayuda a comprobar el rendimiento del producto y a mejorar la eficiencia desde el principio. Esto significa gestionar su vida útil y mejorarlos mediante comprobaciones por ordenador, modificándolos posteriormente en base a las comprobaciones.

- Estas comprobaciones añadidas a la fabricación de productos nos ayudan a acelerar el lanzamiento al reducir el uso de muestras reales y mejorar la velocidad de fabricación.

## **2.7 Control de entrada de aire**

Los sopladores especiales permiten que el proceso de pirólisis se desarrolle de manera más eficiente. El proceso requiere un ambiente anaeróbico para que la descomposición termoquímica de sustancias se desarrolle de manera ordenada y eficiente donde para garantizar estas condiciones, es necesario considerar un ventilador para el ingreso de aire, de tal forma que se produzca la combustión y temperatura necesaria para el proceso

## **2.8 Mantenimiento**

Se requiere que el ventilador siga un plan de mantenimiento. La operación tiene como objetivo extender la vida útil de la maquinaria y sus componentes, además el mantenimiento de sus piezas no debe realizarse sin un plan de mantenimiento preventivo y llevar un registro detallado de las actividades realizadas, incluyendo fechas, problemas detectado y tiempo de operación.

## **2.9 Material**

El tipo de material debe soportar altas temperaturas además debe ser rígido y de alta dureza, resistente al desgaste y a la corrosión, por lo que se considerara al acero A36 por sus propiedades térmicas y mecánicas.

### **Tabla 2.2**

*Propiedades mecánicas y térmicas del acero ASTM A36*

Propiedad	Valor	Unidades
-----------	-------	----------

Densidad	7,850	kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad (E)	200,000	MPa
Límite elástico (Sy)	250	MPa
Resistencia a la tracción	400 - 550	MPa
Ductilidad (alargamiento)	20 - 23	%
Coefficiente de Poisson	0.26 - 0.30	-
Dureza Brinell (HB)	119 - 159	-
Conductividad térmica	47 - 51	W/m·K
Capacidad calorífica específica (a 20 °C)	486	J/kg·K
Coefficiente de expansión térmica lineal	12.2 x 10 <sup>-6</sup>	m/m·°C
Temperatura de fusión	1,425 - 1,538	°C

Nota: *datos de propiedades mecánicas y térmicas tomadas de (COMPRACO, 2024)*

## 2.10 Carga

Se espera que el equipo trabaje de forma satisfactorio con diferentes tipos de biomasa disponible, por lo que para este estudio se considerara la biomasa forestal que se someterá a temperaturas superiores a 500°C, en donde el material de cilindro interior de 7mm tendrá un porcentaje de elongación como se muestra en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3**

*Duración de ensayo y porcentaje de elongación para espesores de 5mm a 8mm a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650 °C.*

Ensayo °C	Duración Ensayo (min)	Reducción Área (%)	Elongación (%)
500	4320	4.93	2.82

550	2503	82.84	39.01
600	239	87.73	44.06
650	29	91.47	47.60

Nota: *datos sobre porcentaje de elongación en acero A36 de 5mm a 8mm*

(Chávez, 2017)

Esto quiere decir que la deformación instantánea que presentará en los ensayos será mínima de acuerdo con la tabla 2.4

#### **Tabla 2.4**

*Deformación instantánea para espesores de 5mm a 8mm a altas temperaturas*

Temperatura (°C)	500	550	600	650
Deformación instantánea (mm)	0.70	0.90	1.20	2.50

Nota: *datos sobre deformación instantánea en acero A36 Fuente: (Chávez, 2017)*

### **2.11 Restricciones**

#### **2.11.1 peso**

Se requiere que el peso del equipo no sea excesivo, de manera que el accionamiento no requiera de grandes potencias. Además de facilitar la movilidad del equipo a otra locación.

#### **2.11.2 Costo del producto**

El costo de los componentes a implementar debe de ser de bajo costo, pero se debe asegurar que el proceso de descomposición de la biomasa lignocelulósica sea eficiente

### 2.11.3 Eficiencia

El rendimiento del reactor debe ser lo suficientemente bueno para que sea económicamente rentable realizar pruebas de pirólisis. De otra manera la adaptación del equipo no justificaría su uso debido a que la biomasa, calor y energía eléctrica que se utilizan para el funcionamiento del equipo se desperdiciarían llegando a ningún resultado.

### 2.11.4 Instalación

La línea de montaje debe ser sencilla de utilizar, con el objetivo de ahorrar dinero y no necesitar empleados calificados para hacer funcionar el equipo.

## 2.12 Cálculos del dimensionamiento y pérdidas de calor

Para determinar el volumen del cilindro interior, se tomaron las medidas correspondientes para determinar el volumen de este, las cuales se las reemplazan en la ecuación 2.1

$$V = A_{cilindro} * h_{cilindro} \quad (2.1)$$

$$V = \frac{\pi * (0.313)^2}{4} * 0.410 = 0.03154m^3$$

$$V = 0.03154m^3 * \frac{1000l}{1m^3} = 31.54l$$

El prototipo de horno tendrá un volumen aproximado de 31.5 litros

La cantidad de biomasa que se procesara es aproximadamente un 34% del total del volumen, debido al proceso de combustión se utilizara la ecuación 2.3, siendo la madera forestal la seleccionada para este estudio en donde se determinara la masa de madera que entra en ese volumen usando la ecuación 2.2

$$masa_{lignocelulosica} = Volumen * \rho \quad (2.2)$$

$$masa_{lignocelulosica} = 0.03154m^3 * 450 \frac{kg}{m^3} = 14.2kg$$

### 2.12.1 Masa real por consumir

$$masa \ a \ consumir = volumen * 0.34 * 450 \frac{kg}{m^3} \quad (2.3)$$

$$masa \ a \ consumir = 0.03154m^3 * 0.34 * 450 \frac{kg}{m^3} = 4.83kg$$

### 2.12.2 Balance de masa:

El balance de materia que se realiza en el equipo es la igualdad entre la masa de combustible y aire, igualado a la masa de gases y cenizas, obteniendo la ecuación 2.4

$$m_{aire} + m_{combustible} = m_{gases \ de \ combustion} + m_{cenizas} \quad (2.4)$$

### 2.12.3 Masa de combustible:

Para determinar la cantidad de combustible a utilizar, se resta la cantidad de biomasa total menos la cantidad de biomasa a producirse, obteniendo así una masa de combustible necesaria para todo el proceso de pirolisis.

$$m_{combustible} = 14.2kg - 4.83kg = 9.32kg$$

### 2.12.4 Masa de aire

Para determinar la cantidad de aire necesaria para realizar la combustión de la biomasa, se utiliza la ecuación 2.5

$$m_{aire} = 11.53C + 34.54(H - \left(\frac{O}{8}\right) + 4.295 S) \quad (2.5)$$

Donde:

C: % de carbono de madera forestal.

H: % de hidrógeno de madera forestal.

O: % de oxígeno de madera forestal.

S: % de azufre de madera forestal.

Revisando la tabla 1.2, obtenemos valores aproximados en porcentaje de los componentes químicos como carbono, oxígeno, hidrogeno y azufre de la biomasa seleccionada (madera forestal).

Carbono= 50%

Oxígenos=42%

Hidrogeno=6%

Azufre= 0%

por lo tanto, reemplazando en 2.5, obtenemos:

$$m_{aire} = 11.53(0.5) + 34.54 \left( 0.06 - \left( \frac{0.42}{8} \right) + 4.295 * 0 \right) = 6.02 \frac{\text{libra aire}}{\text{libra biomasa}}$$

Ahora, se determinará el volumen específico del aire necesario para efectuar la combustión, por lo tanto, se hará uso de la ecuación 2.6.

$$V_{especifico} = m_{aire} * R * \frac{t_a + 460}{P_a * 144} \quad (2.6)$$

Donde

$M_{aire}$  = cantidad de aire necesaria

R = constante de gases  $\frac{kJ}{kg * K}$

$t_a$ =temperatura ambiente °F

$P_a$ =presión atmosférica hPa

De los datos obtenidos, la temperatura es aproximada a 30°C ya que el estudio se realiza en Guayaquil-Ecuador y el valor de presión de 14.72 Psia (1015 hPa) es proporcionado por (INAMHI, 2024), y la constante de los gases de  $0.2870 \frac{kJ}{kg \cdot K}$  obtenidos de Cengel 7 edición, reemplazando valores obtenemos en la ecuación 2.6 se obtiene:

$$V_{especifico} = 6.02 * 53.33 \frac{ft * lbf}{lbm * R} * \frac{86 + 460}{14.7 * 144} = 82.80 \frac{ft^3}{lb}$$

$$82.80 \frac{ft^3}{lb} * \frac{2.2lb}{kg} * \frac{0.304m^3}{ft^3} = 5.17 \frac{m^3}{kg}$$

por lo tanto, para determinar la cantidad de masa de aire necesaria, se debe multiplicar el resultado de la ecuación 2.6 por la cantidad de biomasa que se va a consumir teóricamente

$$V = 5.17 \frac{m^3}{kg} * 9.32kg = 48.19m^3$$

Usando la densidad de aire proporcionada del Cengel, de despeja la masa de aire necesaria para que se efectuó la combustión.

$$m_{aire} = 48.19m^3 * 1.209 \frac{kg}{m^3} = 58.26kg$$

### **2.12.5 Masa de cenizas**

Para este cálculo se utilizó un prototipo semejante de 50 litros como referencia para la medición de masa de la ceniza producida después de la combustión, necesario para determinar una proporción

$$\text{Proporción} = \frac{\text{volumen prototipo}}{\text{volomen referencia}} = \frac{31.54}{50} = 0.63$$

Según datos proporcionados, el prototipo de referencia (Espinosa C. G.-M., 2016) genera un aproximado de 0.62 kg de cenizas y 0.32 kg de residuos de combustión, por lo tanto, se obtiene.

$$m_{\text{cenizas}} = (0.62 + 0.32) * 0.63 = 0.5922kg$$

### 2.12.6 Masa de gases

Para determinar la masa de gases, se despega de la ecuación 2.4 de balance de masas, obteniendo

$$m_{\text{aire}} + m_{\text{combustible}} = m_{\text{gases de combustion}} + m_{\text{cenizas}}$$

$$m_{\text{gases de combustion}} = m_{\text{aire}} + m_{\text{combustible}} - m_{\text{cenizas}}$$

$$m_{\text{gases de combustion}} = 58.26 + 9.32 + 0.592 = 66.98kg$$

### 2.12.7 Balance de energía

El balance de energía determina que la cantidad de energía disponible es igual a la suma de la energía utilizable más la sumatoria de las pérdidas teóricas como se representa en la ecuación 2.7.

$$Q_{\text{disponible}} = Q_{\text{utilizado}} + \sum Q_{\text{perdidas}} \quad (2.7)$$

Donde:

$Q_{\text{disponible}}$  : calor disponible Mj

$Q_{\text{utilizado}}$ : calor utilizable Mj

$\sum Q_{\text{perdidas}}$ : pérdidas de calor Mj

El calor disponible está representado por la ecuación 2.8 como la energía que ingresa al prototipo, otorgado por el combustible, el aire y la biomasa.

$$Q_{disponible} = Q_{combustible} + Q_{aire} + Q_{carbon\ remanente} \quad (2.8)$$

Para determinar el calor suministrado por el combustible, se utiliza la ecuación 2.9 en donde el porcentaje de humedad es considerado debido a que afecta en la disponibilidad del combustible, la temperatura de la llama e incluso la composición de los gases de combustión

$$Q_{combustible} = Pc * m_{combustible} * (1 - \%H) \quad (2.9)$$

Donde:

Pc: poder calorífico  $\frac{kJ}{kg}$

$m_{combustible}$ : masa de combustible

$\%H$ = porcentaje de humedad

De la tabla 4, obtenemos que el poder calorífico de la madera forestal es aproximado a  $20000 \frac{kJ}{kg}$ , con un porcentaje de humedad de 30%, por lo tanto, reemplazando 2.9 obtenemos el siguiente valor.

$$Q_{combustible} = 20000 * 9.32 * (1 - 0.3) = 130.48MJ$$

Para determinar el calor suministrado por el aire se utilizó su entalpía a 30°C, de tablas termodinámicas de Cengel, obteniendo un valor de  $304.7 \frac{kJ}{kg}$ , el cual se lo reemplaza en la ecuación 2.10 donde se obtiene.

$$Q_{aire} = m_{aire} * h \quad (2.10)$$

$$Q_{aire} = 58.26 \text{ kg} * 304.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 17.75 \text{ MJ}$$

Para determinar el calor remanente en el carbón, se utiliza la misma ecuación 2.9, la diferencia es que ahora obtenemos una humedad de 0% y un poder calorífico un poco más alto, además de que la masa de carbón remanente es el 30% de la masa de combustible a suministrar

$$Q_{carbon \text{ remanente}} = 28000 * 2.8 * (1 - 0) = 78.28 \text{ MJ}$$

De esta forma se obtiene el calor disponible para el prototipo reemplazando datos en la ecuación 2.7.

$$Q_{disponible} = 130.48 + 17.75 + 78.28 = 226.51 \text{ MJ}$$

El calor a utilizar este dado por la ecuación 2.11 que representa la suma del calor necesario para realizar la descomposición de la biomasa y el calor de vaporización, donde se obtiene:

$$Q_{utilizado} = Q_{biomasa} + Q_{vaporizacion} \quad (2.11)$$

Donde  $Q_{vaporizacion}$  está dada por la ecuación 2.12:

$$Q_{vaporizacion} = m_{combustible} * \%H * CV \quad (2.12)$$

Donde:

$m_{combustible}$ : masa de combustible kg

$\%H$ : porcentaje de humedad

$CV$ : calor de vaporización del agua en  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Reemplazando 2.12, obtenemos:

$$Q_{vaporizacion} = 9.32 * 0.3 * 2257 = 6.31MJ$$

Para determinar la cantidad de energía necesaria para descomponer 4.88 kg de biomasa se utiliza la misma ecuación 2.9:

$$Q_{biomasa} = 28000 * 4.88 * (1 - 0.3) = 83.49MJ$$

Por lo tanto, el calor a utilizar para la descomposición de biomasa es:

$$Q_{utilizado} = 83.49 + 6.31 = 89.8 MJ$$

### 2.12.8 Perdidas de calor:

Para este cálculo se toma en cuenta la pérdida de calor por combustión incompleta, influyendo en pérdidas en gases, convección y radiación, obteniendo la ecuación 2.13:

$$\sum Q_{perdidas} = Q_{gases} + Q_{conveccion} + Q_{radiacion} \quad (KJ) \quad (2.13)$$

El calor producido por las paredes del equipo debido a la emisividad del material se determina mediante la ecuación 2.14 de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{radiacion} = \varepsilon * \sigma * Area * (T_{superficie}^4 - T_{aire}^4) \quad (2.14)$$

Donde:

$\varepsilon$ : emisividad del material

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$ )

Área: área superficial  $m^2$

$T_s$ : temperatura superficial °C

$T_{aire}$ : temperatura ambiente °C

Se determina el área superficial del cilindro interior se usará la ecuación 2.15.

$$Area = \pi * \phi * h \quad (2.15)$$

$$Area = \pi * \phi * h = \pi * 0.410 * 0.313 = 0.4031 \text{ m}^2$$

El acero a una temperatura aproximada de 500°C tiene una emisividad de 0.84, este valor se lo obtiene de tablas de (SRC, 2019)

Por lo tanto, teniendo estos valores, se procede a reemplazar en 2.14.

$$Q_{radiacion} = 0.84 * 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} * 0.4031 * (774^4 - 303^4)$$

$$Q_{radiacion} = 6.692 \text{ kW}$$

Estimando un tiempo de operación de 4 horas, lo cual equivale a 14400 segundos, se determina la cantidad de calor por radiación producido por el equipo.

$$Q_{radiacion} = 6692.94 \frac{J}{s} * 14400 \text{ s} = 96.3 \text{ MJ}$$

### 2.12.9 Calor por convección

Se determina como el calor perdido por el equipo hacia el ambiente, es decir, el calor proporcionado por convección al ambiente, mediante la expresión 2.16

$$Q_{conveccion} = h * Area * (T_{superficial} - T_{\infty}) \quad (2.16)$$

Donde:

h= coeficiente convectivo  $\frac{W}{m^2 * K}$

Área: área superficial  $m^2$

$T_s$ : temperatura superficial °C

$T_{\infty}$ : temperatura del fluido °C

El coeficiente convectivo, o coeficiente de transferencia de calor por convección (h), no es una propiedad intrínseca del fluido, este factor se determina experimentalmente y depende de diversos elementos que influyen en la transferencia de calor. Estos incluyen la forma de la superficie, la naturaleza del flujo del fluido, sus características físicas y su velocidad. Es decir, h se define mediante la ecuación 2.17 que considera estos factores.

$$Nu = \frac{h * Lc}{k} \quad (2.17)$$

Donde:

Nu: número de Nusselt

Lc: longitud característica

Dado que el equipo se trata de un cilindro, se considera tomarlo como un caso de placa vertical según Cengel, donde para demostrarlo, se debe cumplir la siguiente condición de la ecuación 2.18

$$D \geq \frac{35 * L}{Gr^{\frac{1}{4}}} \quad (2.18)$$

Donde:

D: diámetro del cilindro

L: altura del cilindro

Gr: numero de Grashof

El número de Grashof representa una variable adimensional para situaciones de convección natural representada por la ecuación 2.19.

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2} \quad (2.19)$$

Donde:

$g$ : aceleración de la gravedad  $9.81 \frac{m}{s^2}$

$\beta$ : coeficiente de expansión volumétrica,  $\frac{1}{T_f}$

$T_s$ : temperatura superficial °C

$T_\infty$ : temperatura del fluido °C

$L_c$ : longitud característica m

$\nu$ : viscosidad cinemática  $\frac{m^2}{s}$

la longitud característica se determina mediante la ecuación 2.20:

$$L_c = \frac{V}{A} = \frac{A_s * h_{cilindro}}{A_s} \quad (2.20)$$

$$L_c = h_{cilindro}$$

Por lo tanto, se obtiene que la longitud característica del cilindro es de 0.410 m para determinar de numero de Grashof, primero se debe de determinar la temperatura de capa  $T_f$ , y la longitud característica del cilindro por medio de la ecuación 2.21.

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (2.21)$$

Considerando una temperatura idónea para la pirolisis de 500°C, y una temperatura ambiente de capa aproximada de 30°C.

$$T_f = \frac{500 - 30}{2} = 235^\circ C = 508K$$

Con esta temperatura obtenida de 235°C, se procede a determinar las propiedades del aire a 1 atm en las tablas obtenidas del Cengel, por medio de interpolación se obtiene:

$$Pr=0.6949$$

$$K=0.040 \frac{W}{m \cdot k}$$

$$v: 3.89 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\beta: \frac{1}{508K} = 1.9685 \times 10^{-3} K^{-1}$$

Reemplazando en la ecuación 2.19 se obtiene:

$$Gr = \frac{9.81 * 1.9685 \times 10^{-3} * (500 - 30) * 0.410^3}{(3.89 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 413.38 \times 10^6$$

Reemplazando los datos en 2.18 para realizar la comprobación de placa vertical se obtiene:

$$0.313 \geq \frac{35 * 0.410}{(413.38 \times 10^6)^{\frac{1}{4}}}$$

$$0.313 \geq 0.100$$

Con este resultado, se puede considerar al cilindro como placa vertical para este estudio y por ende, determinar el Nusselt, usando la ecuación 2.22 para mayor aproximación.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (2.22)$$

Donde:

$Ra$ : numero de Rayleigh

$Pr$ : numero de Prandtl

El número de Rayleigh ( $Ra$ ) es un parámetro obtenido de la ecuación 2.23 que nos permite comprender el movimiento de masas de aire caliente o frío en sistemas como los océanos o la atmósfera terrestre, cuando existe un gradiente de temperatura. Simboliza la interacción entre las fuerzas de empuje ascendente, que impulsan el movimiento del fluido, y las fuerzas resistivas, análogas a la viscosidad y la dispersión térmica.

$$Ra = Gr * Pr \quad (2.23)$$

$$Ra = 413.38 \times 10^6 * 0.6949$$

$$Ra = 287.25 \times 10^6$$

Reemplazando los valores en la ecuación 2.22 de Nusselt, se obtiene:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 * (287.25 \times 10^6)^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{0.6949} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 83.63$$

### 2.12.10 Coeficiente convectivo

De donde obtenemos el coeficiente convectivo de la misma ecuación de Nusselt, despejando:

$$h = \frac{Nu * k}{Lc} \quad (2.17.1)$$

$$h = \frac{83.3 * 0.040}{0.410} = 8.15 \frac{W}{m^2 * K}$$

por lo tanto, obtenemos las pérdidas de calor por convección reemplazando en la ecuación 2.24:

$$Q_{conveccion} = h * Area * (Tf - Ti) \quad (2.24)$$

$$Q_{conveccion} = 8.15 * 0.4031 * (500 - 30)$$

$$Q_{conveccion} = 1544.07 W$$

En un lapso de 4 horas de operación obtenemos:

$$Q_{conveccion} = 1544.07 \frac{J}{s} * 14400 s = 22.23 MJ$$

Con este resultado, podemos obtener la pérdida de calor por los gases de combustión con la ecuación 7, por lo tanto:

$$Q_{disponible} = Q_{utilizado} + Q_{gases} + Q_{conveccion} + Q_{radiacion}$$

$$Q_{gases} = Q_{disponible} - Q_{utilizado} - Q_{conveccion} - Q_{radiacion}$$

$$Q_{gases} = 226.51 - 89.8 - 22.23 - 96.3 = 18.18 MJ$$

La eficiencia térmica del horno se expresa como la división entre el calor total absorbido sobre el calor total entregado, de tal forma que obtenemos la ecuación 2.25

### 2.12.11 Eficiencia

La eficiencia del prototipo se lo determina como la relación entre el calor absorbido y el entregado, lo que garantiza un rendimiento adecuado para pruebas y analisis

$$eficiencia \% = \frac{calor\ absorbido}{calor\ entregado} = \frac{Q_{entregado} - Q_{perdido}}{Q_{entregado}} \quad (2.25)$$

$$\frac{226.51 - (18.18 + 2.42 + 96.3)}{226.51} * 100\% = 48.4\%$$

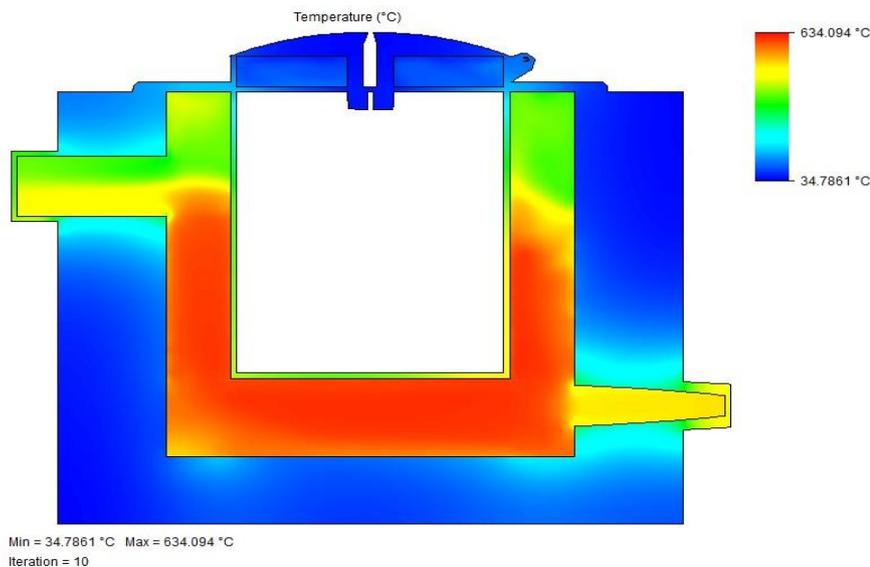
Obteniendo así una eficiencia teórica aproximada del 50% del equipo considerando sus pérdidas y balance de energía apropiadas para el análisis

### 2.13 Condiciones de temperatura en Flow Simulation de SolidWorks

Las simulaciones obtenidas en Flow Simulation de SolidWorks buscan determinar cuál es la temperatura en los alrededores del cilindro interior cuando se esté realizando la combustión, por lo que se determina dentro de un tiempo estacionario de 4 horas, es decir, 14400 segundos que el aire en el interior alcanza un aproximado de 634°C como se observa en la figura 2.3.

**Figura 2.3**

*Temperatura del aire entre el cilindro interior y exterior del horno 634°C*

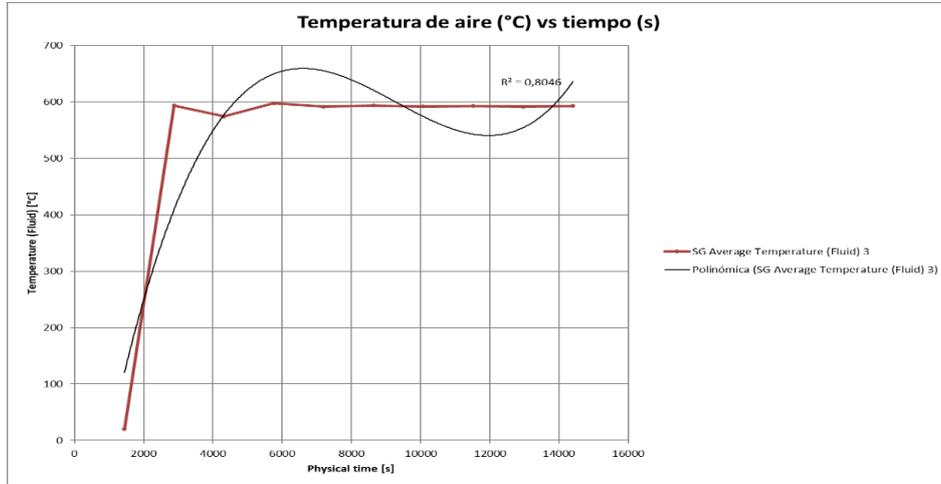


*Nota: temperatura dentro del rango de pirolisis lenta para horno estacionario*

Dado que es una simulación en estado estacionario, se observará una estratificación de la temperatura en el cilindro interior hasta llegar a un punto de convergencia como se observa en la figura 2.4, al igual que en la velocidad de aire de entrada en donde se obtiene la figura 2.5

**Figura 2.4**

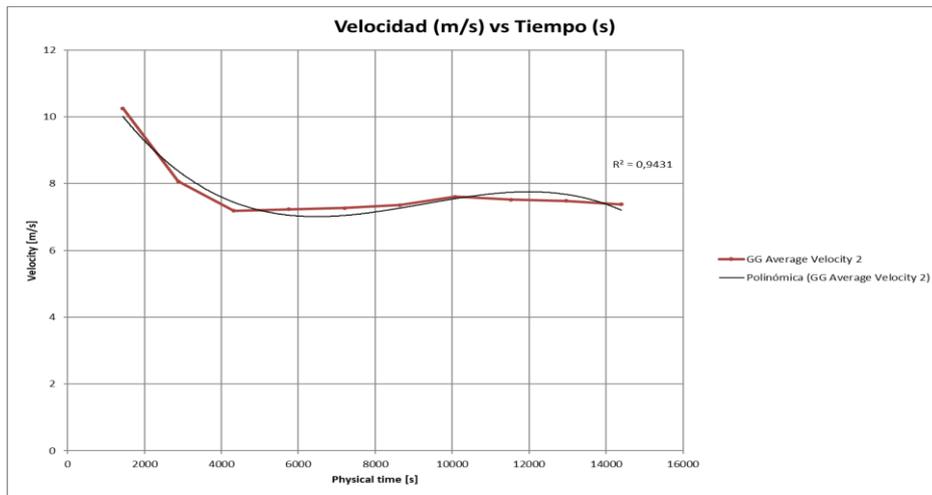
*Convergencia de temperatura de aire entre cilindro interior y exterior*



**Nota:** la temperatura es cercana a 600°C dentro de la simulación

**Figura 2.5**

*velocidad promedio de entrada de aire*



**Nota:** la velocidad de entrada de aire entra en convergencia cerca de 7,5m/s

## CAPITULO 3

### 3.1 Simulación térmica de la cámara interior del horno pirolítico y análisis de temperatura

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos mediante la simulación térmica en SolidWorks del cilindro interior de un horno pirolítico de 35 litros de

capacidad máxima se detallan en este capítulo. Las variaciones de la temperatura en las simulaciones se deciden por la cantidad de calor generada por la biomasa lignocelulósica, así como el tiempo de operación en el sistema

Se ejecutarán tres simulaciones en total.

- Se toma la energía del calor producido por la biomasa para operar el sistema, considerando las pérdidas de calor calculadas antes. El sistema funciona durante 4 horas de manera continua, y la temperatura ambiente es de 30°C ya que representa el promedio diario común en Guayaquil.
- Reduciendo el calor generado por el combustible en un 25% de la inicial, con tiempo y temperatura de operación inicial iguales a 4 horas y 30°C respectivamente.
- Aumentando el calor generado por el combustible en un 25% de la inicial, con tiempo y temperatura de operación inicial iguales a 4 horas y 30°C respectivamente.

### ***3.2 Valoración del horno en rehusó***

A partir de las dimensiones obtenidas del horno que se muestra en la figura 3.1 que está situado en el CDTS, se realizó un modelo CAD como se muestra en la figura 3.2 donde es posible realizar diferentes simulaciones en Flow Simulation con el fin de determinar cómo se comporta un fluido caliente dentro del cilindro interior y exterior durante la operación.

**Figura 3.1**

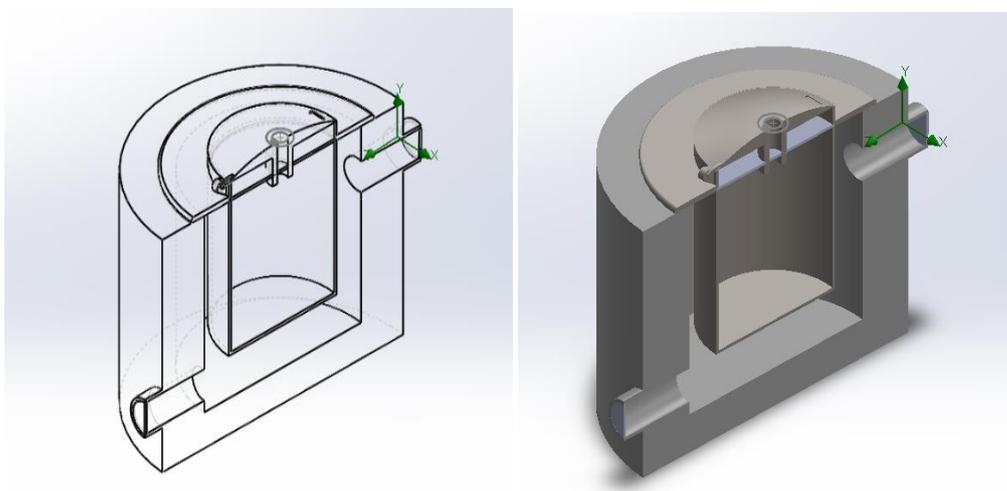
*Cilindro interior y exterior del horno en rehúso*

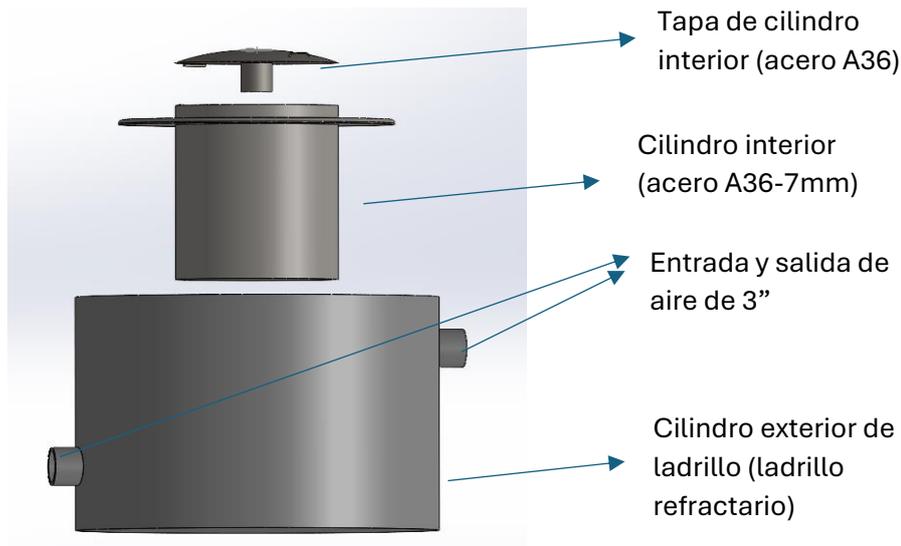


*Nota: medidas tomadas despues de realizar mantenimiento*

**Figura 3.2**

*Modelos CAD de horno en CDTS-ESPOL*





Nota: *vista en corte isometricas y vista explocionada de diseño*

Obteniendo así los componentes de 3.1 que conforman el prototipo los cuales son

**Tabla 3.1**

*Componentes del horno en desuso*

Componente	Descripción	Detalle
Cilindro interior	Recipiente principal donde se realiza la pirólisis de la biomasa.	acero A36, espesor de 7 mm con volumen máximo de 35 litros
Cilindro exterior	Estructura que rodea al cilindro interior, diseñada para contener el aislamiento térmico.	72 ladrillo refractario, asegura la conservación del calor y minimiza las pérdidas térmicas.
Ubicación de orificios de aire	Parte superior e inferior del horno	Orificios de 3 pulgadas donde entra el aire para combustión
Tapa de cilindro interior	Cubierta que sella el sistema durante el proceso	Acero A36. Incluye orificios para la salida de gases.

Nota: *las características mostradas son obtenidas después de mantenimiento*

### 3.3 Simulación térmica

A continuación, se muestra el proceso de simulación que se realizó al cilindro interior del horno mediante la herramienta de SolidWorks (Flow Simulation), tomando en cuenta las dimensiones preestablecidas y material correspondiente.

Se asigno el material el cual es el AISI A36 donde se colocaron sus respectivas propiedades mecánicas de acuerdo con su condición de operación.

#### Figura 3.3

Selección de material para simulación en software

The screenshot shows the 'Material' dialog box in SolidWorks. The left pane shows a tree view of material libraries, with 'ASTM A36 Acero' selected under 'aceros para horno'. The right pane shows the 'Propiedades de material' tab, which is read-only. It displays the following properties:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+11	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.26	N/D
Módulo cortante	7.93e+10	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	7850	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	400000000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión	250000000	N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	250000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	1.17e-05	/K
Conductividad térmica	52.6	W/(m·K)
Calor específico	486	J/(kg·K)

At the bottom of the dialog, there are buttons for 'Guardar', 'Config...', 'Aplicar', 'Cerrar', and 'Ayuda'. A link at the bottom left says 'Acceder a más materiales desde el portal web de materiales de SOLIDWORKS'.

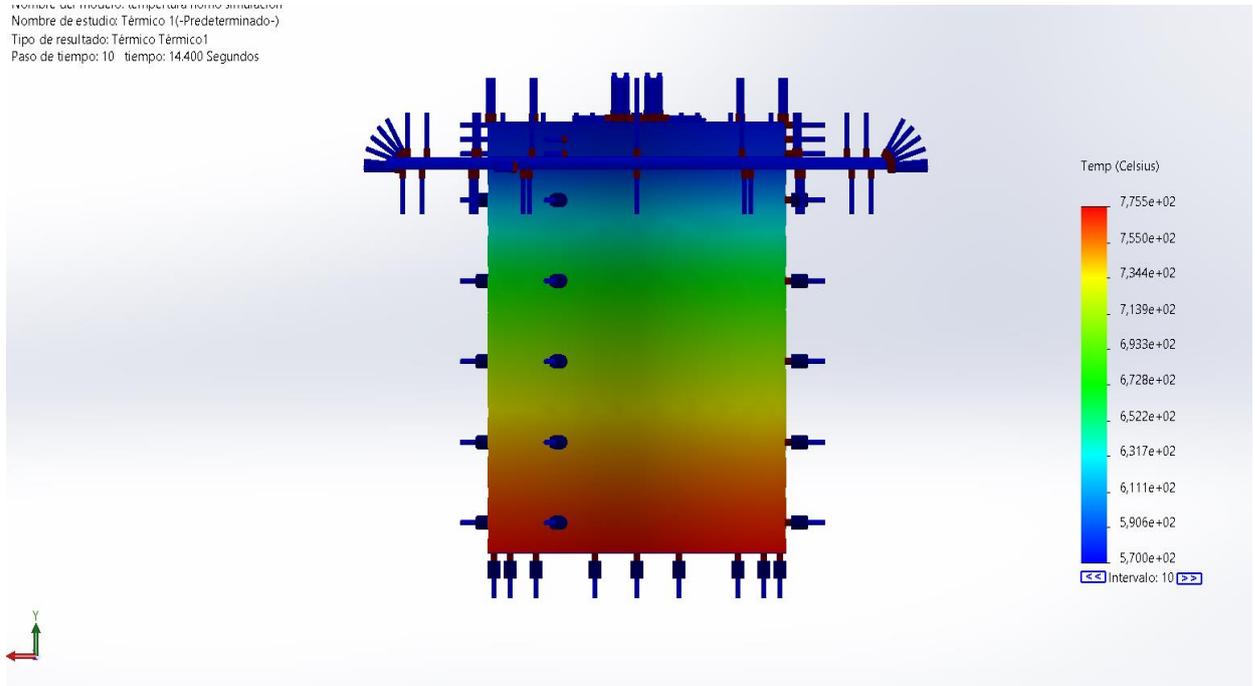
*Nota: datos obtenidos de estudio realizado a acero A36 (QUILCA, 2024)*

3.3.1 CASO 1

**Figura 3.4**

*Simulación térmica convectiva de cilindro interior a 672°C*

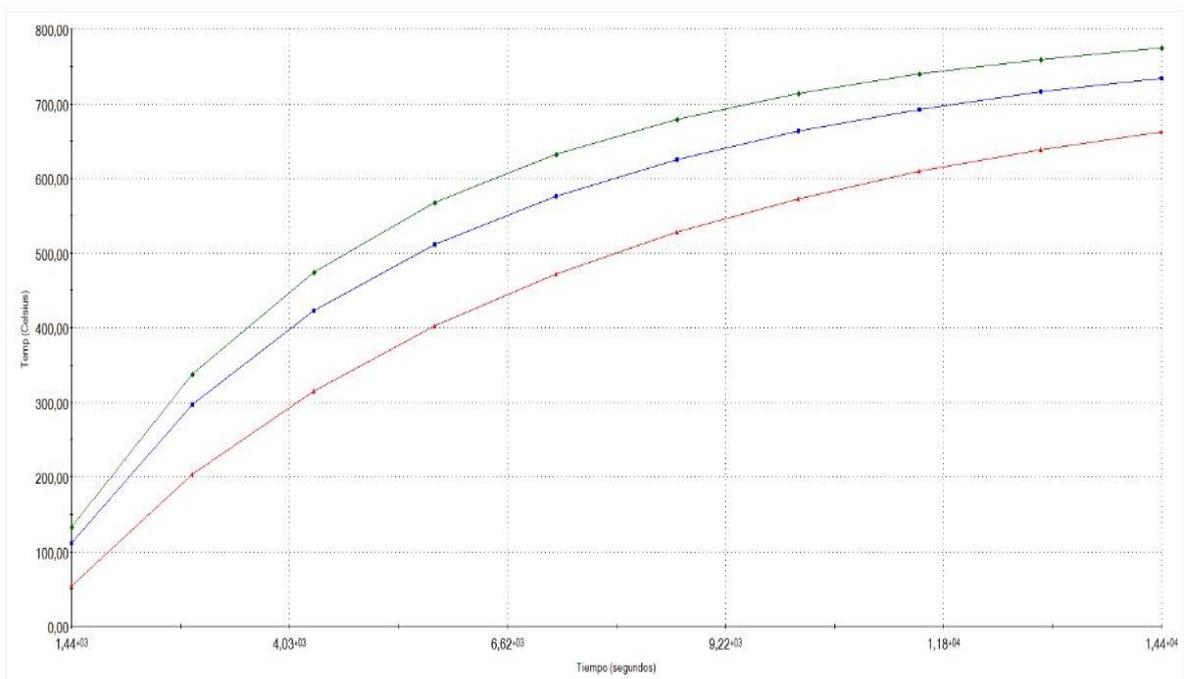
Nombre de estudio: Térmico 1(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Térmico Térmico1  
Paso de tiempo: 10 tiempo: 14.400 Segundos



**Figura 3.5**

*Convergencia de temperatura en estado estable a 672°C*

Nombre de estudio: Térmico 1(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Térmico Térmico1



Por lo tanto, para la primera simulación se tienen los siguientes datos de diseño

- Coeficiente convectivo:  $8.23 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
- Temperatura ambiente: 30°C
- Potencia calórica: 2800 W
- Material: acero AISI A36

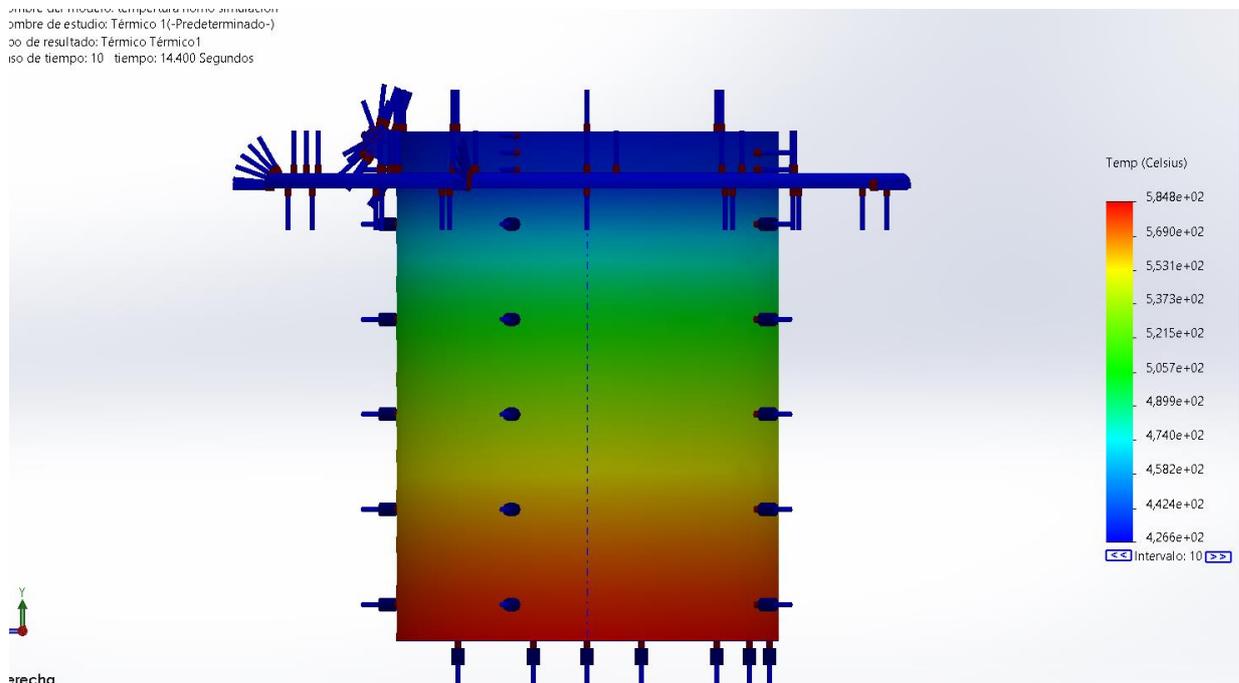
En este caso, la potencia calórica para la simulación se la obtuvo de los cálculos realizados previamente, que representa el calor generado por convección de la biomasa y el calor generado por los gases donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Por lo tanto, se puede determinar en la figura 3.4 y figura 3.5 que la temperatura mínima y máxima que llegara en el interior del horno en operación en un tiempo determinado de 4 horas serán de 570°C y 775°C respectivamente, obteniendo una temperatura media de 672°C, el cual se encuentra dentro del rango de deseado para llevar a cabo la pirolisis que es de 500°C y 700°C

3.3.2 CASO 2:

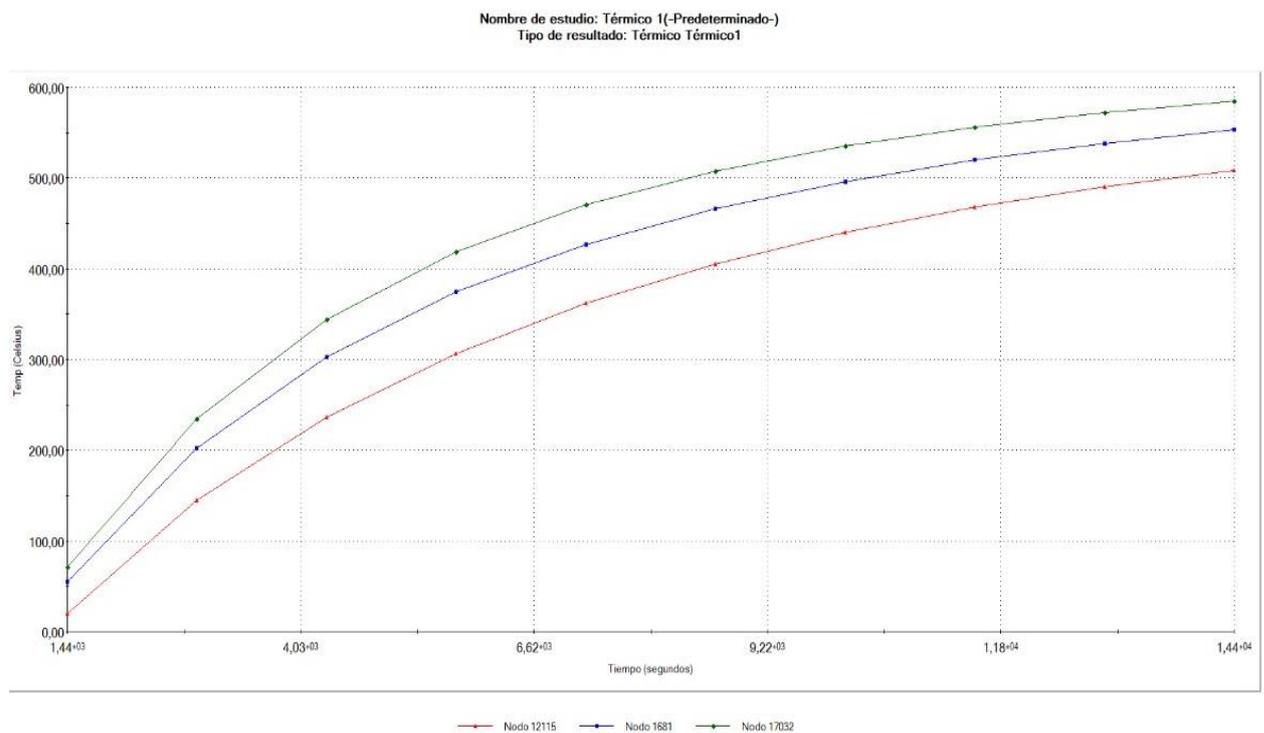
**Figura 3.6**

*Simulación térmica convectiva de cilindro interior a 505°C*



**Figura 3.7**

*Convergencia de temperatura en estado estable a 505°C*



Por otro lado, al disminuir la potencia calorífica en un 25% del interior con el mismo tiempo de operación, se tienen los siguientes datos

- Coeficiente convectivo:  $8.23 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
- Temperatura ambiente: 30°C
- Potencia calorífica: 2100 W
- Material: acero AISI A36

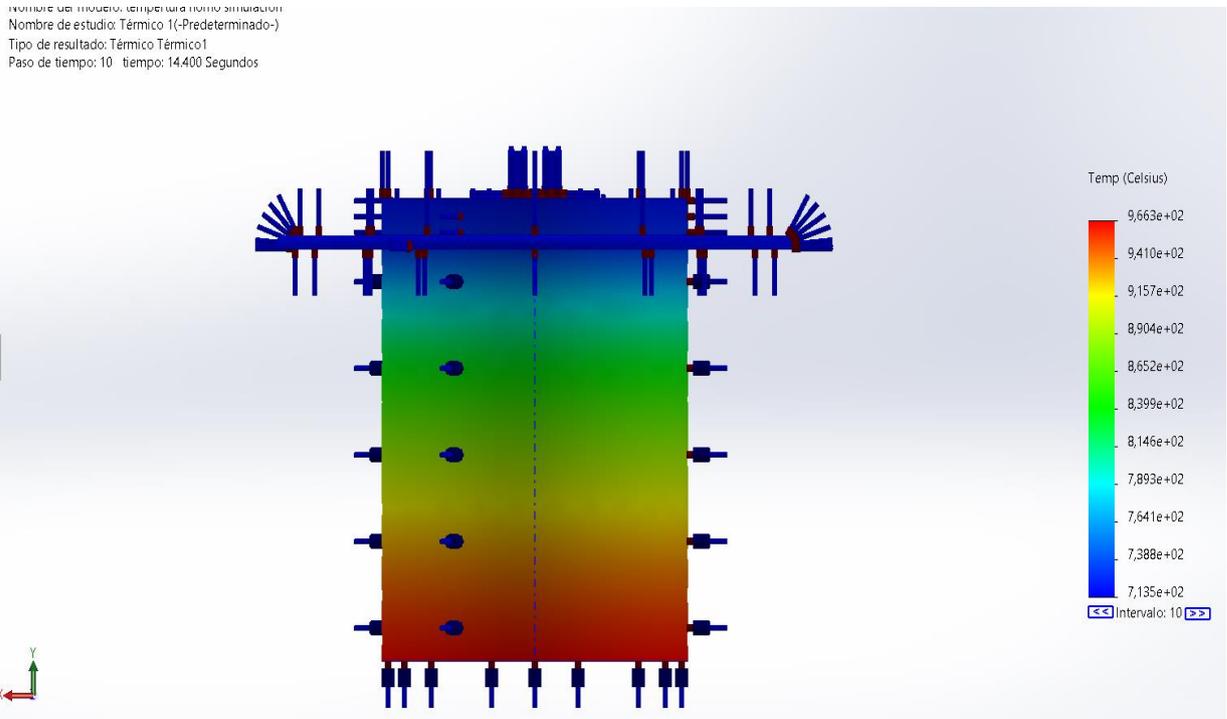
En la figura 3.6 se puede determinar que la temperatura mínima y máxima en el cilindro reduciendo en un 25% la potencia calorífica es de 426°C y 585°C respectivamente obteniendo una temperatura promedio de 505 °C, un valor muy cercano al rango de temperatura para el proceso de pirolisis

Por lo tanto, la disminución del combustible no garantiza que se cumpla el proceso de pirolisis ya que las temperaturas indicadas en la parte superior en inferior del cilindro no alcanzan el rango de temperatura deseado

3.3.3 CASO 3:

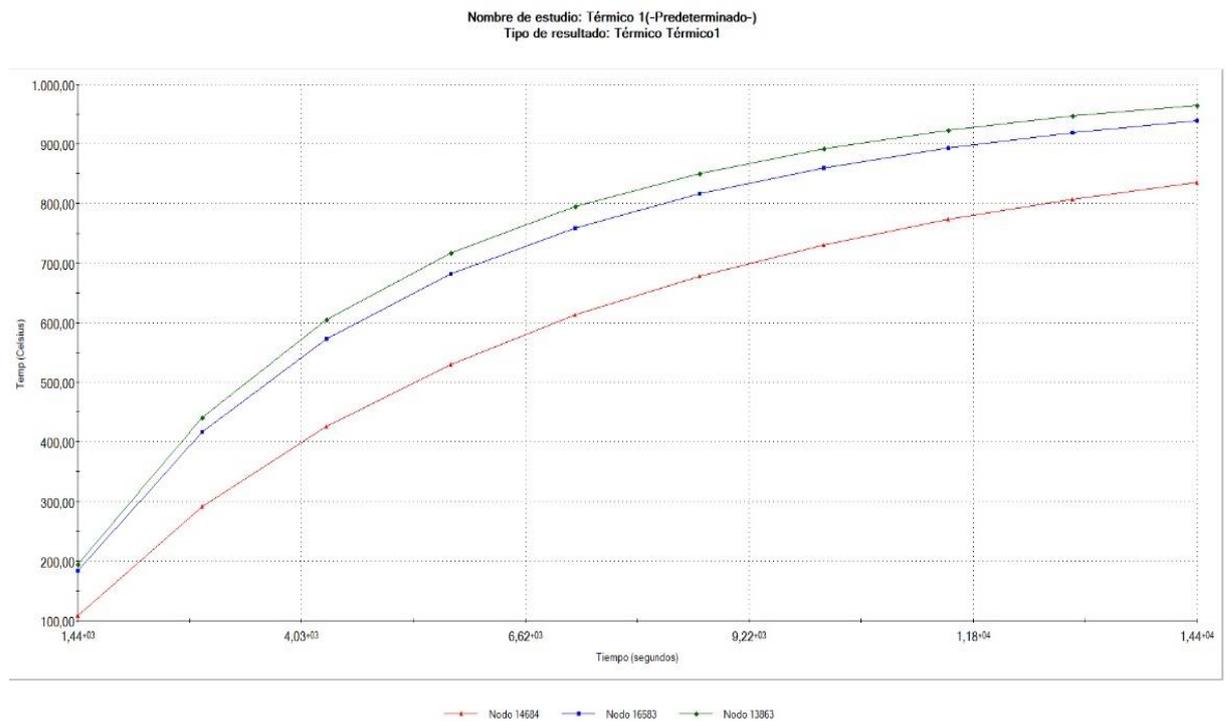
**Figura 3.8**

*Simulación térmica convectiva de cilindro interior a 940°C*



**Figura 3.9**

*Convergencia de temperatura en estado estable a 940°C*



Finalmente, al aumentar la potencia calórica en un 25% de la inicial con el mismo tiempo y temperatura ambiente de la anterior simulación, se tienen los siguientes datos

- Coeficiente convectivo: 8.23 w/m<sup>2</sup>.K
- Temperatura ambiente: 30°C
- Potencia calórica: 3500 W
- Material: acero AISI A36

En la figura 3.8 se puede determinar que la temperatura mínima y máxima en el cilindro interior, aumentando un 25% de poder calorífico es de 714°C y 966°C respectivamente, obteniendo así una temperatura promedio de 840°C lo cual está muy por encima del rango de temperatura para el proceso de pirolisis, es decir, se obtendrá biochar con propiedades microscópicas no deseadas para estudio o uso.

Dados los diferentes casos mostrados anteriormente, se adecuará el horno para que se mantengan los parámetros del caso 1 en donde cumple con el rango de temperatura que se efectuó la pirolisis.

### **3.4 Potencia de ventilador**

Para determinar la potencia del ventilador que se necesita en el horno, es necesario saber cuál es la velocidad del aire que entra por el cilindro exterior, por lo que se utiliza la ecuación:

$$\dot{V} = \text{velocidad} * \text{seccion}$$

Donde la velocidad promedio teórica es de 7.38 m/s y el diámetro en la entrada del horno es de 75mm, se reemplazan valores y se obtiene:

$$\dot{V} = 7,38 \frac{m}{s} * \frac{\pi * (0.075)^2}{4} m^2 = 0.03260 \frac{m^3}{s}$$

con el resultado de  $5.17 \frac{m^3}{kg}$  de volumen específico de la ecuación 2.6, el cual determina la masa de aire necesaria para el proceso, se obtiene una potencia estimada del ventilador

$$\Delta_{E.sistema} = \frac{1}{2} * \frac{\dot{V}}{v.esp} * (v.final^2 - v.inicial^2)$$
$$\Delta_{E.sistema} = \frac{1}{2} * \frac{0.03260 \frac{m^3}{s}}{5.17 \frac{m^3}{kg}} * \left( (7.38 \frac{m}{s})^2 - 0^2 \right) = 0.17W$$

Obteniendo así una potencia baja debido a que el proceso requiere poco flujo de aire, lo que equivale a una potencia del ventilador de aproximadamente de ¼ HP que es la de más baja potencia disponible en el mercado, donde para este estudio se lo considera para futuras investigaciones o proyectos a realizarse en el prototipo

### 3.5 Análisis de resultados

Entre los tres escenarios presentados, el caso 1, se identifica como el más adecuado para el proceso de pirólisis, ya que logra una temperatura promedio de 672°C, dentro del rango óptimo de 500°C a 700°C, en contraste, el caso 2 (reducción del 25% de la potencia calórica) produce temperaturas promedio de 505°C, acercándose al límite inferior del rango deseado, pero insuficientes en ciertas zonas del cilindro interior para garantizar la continuidad del proceso. Por otro lado, el caso 3 (incremento del 25% de la potencia calórica) supera significativamente el rango óptimo, alcanzando una temperatura promedio de 840°C, lo que genera condiciones adversas para la obtención de biochar con propiedades uniformes y deseadas.

El objetivo principal del análisis es determinar los requerimientos ideales de potencia calórica en la cámara de combustión para garantizar la obtención de biochar

con propiedades uniformes por lo que los tres escenarios analizados presentan variaciones en la potencia calórica y su impacto en la temperatura promedio del horno.

**Tabla 3.2**

*Comparación de los Tres Casos de Simulación Térmica*

<b>Parámetro</b>	<b>Caso 1 (Base)</b>	<b>Caso 2 (-25% Potencia)</b>	<b>Caso 3 (+25% Potencia)</b>
Potencia calórica (W)	2800	2100	3500
Coeficiente convectivo (W/m <sup>2</sup> ·K)	8.23	8.23	8.23
Temperatura ambiente (°C)	30	30	30
Temperatura mínima (°C)	570	426	714
Temperatura máxima (°C)	775	585	966
Temperatura promedio (°C)	672	505	840
Dentro del rango óptimo (500°C a 700°C)	Sí	Parcial	No
Impacto en el proceso	Temperatura adecuada para pirolisis uniforme	Insuficiente en ciertas zonas, afecta la estratificación de temperatura.	Sobrecalentamiento, calidad del biochar comprometida.

### 3.6 Costos de componentes

El objetivo de este estudio es realizar una evaluación de los gastos relacionados con la instalación e implementación de componentes en el prototipo de horno de pirolisis. Esto incluye la adquisición de elementos cruciales como un ventilador de 0.25 HP, cemento refractario para el aislamiento de temperatura, pintura para alta temperatura, etc.

La importancia de esta evaluación radica en ofrecer una base sólida para tomar decisiones técnicas y financieras, optimizar la utilización de recursos y garantizar la

longevidad del proyecto. Además, se tienen en cuenta aspectos importantes como la calidad duradera de los materiales y la regularidad del mantenimiento para calcular con precisión el costo total de poseer dicho elemento.

**Tabla 3.3**

*Tabla de costos de adquisición*

Elemento	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)	Componente
Blower 1/4 HP (1750 rpm)	1 unidad	250.00	250.00	
Cemento refractario	20 kg	38.40	76.80	
Pintura resistente al calor	1 litros	30.00	30.00	
Pernos de 3/16	8 unidades	0.50	4.00	
Termocupla	1 unidad	120.00	120.00	

---

Total - Costos de Adquisición	-	-	480.80
----------------------------------	---	---	--------

---

## CAPITULO 4

### 4.1 Conclusiones

- Las simulaciones realizadas validaron que el horno puede alcanzar temperaturas dentro del rango óptimo de temperatura de 500°C a 700°C, asegurando una estratificación uniforme de la temperatura para un proceso de pirólisis eficiente y una calidad adecuada del biochar.
- Se determinó que la infraestructura del horno en desuso puede adaptarse para operar de manera eficiente a través de rediseños específicos en su estructura térmica y aislamiento lo cual permite reducir costos al reutilizar componentes existentes y simplificar el mantenimiento.
- El dimensionamiento y selección de materiales como el acero A36 y cemento refractario garantizan la resistencia a altas temperaturas y la durabilidad del prototipo además de que las dimensiones determinadas son las adecuadas para cumplir con los requisitos de operación y producción de biochar.
- Una limitación clave del software es su dependencia de las propiedades térmicas y mecánicas, lo que puede presentar errores si los datos del material no son completamente precisos debido a que las simulaciones no consideran factores dinámicos del entorno real, como fluctuaciones en las condiciones ambientales o irregularidades en la combustión, lo que limita la predicción exacta del comportamiento operativo del horno.

## 4.2 Recomendaciones

- Realizar mejoras en el aislamiento térmico del horno, como el uso de materiales refractarios mucho más avanzados. Esto reducirá las pérdidas de calor y conducirá a una eficiencia energética mucho mejor del prototipo en su conjunto.
- Realizar distintas pruebas de varios tipos de biomasa para determinar su comportamiento y rendimiento, siendo factible maximizar la aplicabilidad del prototipo en múltiples industrias cercanas.
- Establecer rutinas de mantenimiento regular para el ventilador y otros componentes clave, prolongando la vida útil del equipo y asegurando su funcionamiento óptimo en el tiempo.

## Referencias

- Anchaluisa, S. (2013). *Efectos del fuego sobre la estructura, microclima y funciones ecosistémicas de plantaciones de eucalipto (Eucalyptus globulus; Myrtaceae)*. Quito-Ecuador.
- Balcázar, G. B. (2014). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis de combustión lenta con una capacidad de 10Kg a escala de laboratorio para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradables*. Guayaquil-Ecuador .
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis*. Oxford: Elsevier.
- C. García-Izquierdo, J. G.-M.-M.-F. (2014). *Enmiendas orgánicas de nueva generación: Biochar y otras biomoléculas*. Mundi-Prensa.
- Castillo Uribe, V. (2013). *DISEÑO Y CÁLCULO DE UN AGITADOR DE FLUIDOS*. Chile: Departamento de Ingeniería Mecánica-Universidad del Bio-Bio.
- CEUPE. (13 de Septiembre de 2019). *¿Qué es la pirólisis?* Obtenido de ¿Qué es la pirólisis?: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>
- Chávez, J. I.-J. (2017). *Resistencia De Materiales-Ingeniería Mecánica Estudio De Caso: Degradación Del Acero Astm A36 Sometido Al Fenómeno De Termofluencia*. Chimborazo-Ecuador.
- COMPRACO. (2 de Febrero de 2024). *Propiedades del acero ASTM A36, elasticidad, límite elástico, densidad del material, dureza y equivalencia*. Obtenido de Propiedades del acero A36: <https://compraco.com.br/es/blogs/especificacoes-do->

aco/propiedades-do-aco-astm-a36-modulo-de-elasticidade-resistencia-ao-escoamento-densidade-do-material-dureza-e-equivalente?srsId=AfmBOoq1heDqtNrbh1GaGBwZzKktJDL3JbCLV\_J413JxGkJ61yxGcHY-

- Espinosa, C. G.-M. (2016). *Diseño de un Reactor de Pirólisis Experimental para pruebas de biomasa agroforestal*. Guayaquil: ESPOL.
- Espinosa, C. G.-M. (2016). *Diseño de un reactor de pirolisis experimental para pruebas de biomasa agroforestal*. Guayaquil-Ecuador.
- Fernandez-Pello, S. M.-J.-Y.-A. (2011). Fundamentals of Combustion Processes. En S. M.-J.-Y.-A. Fernandez-Pello, *Fundamentals of Combustion Processes* (págs. 98-99). Austin-Texas: Springer.
- Ferreira, N. (24 de Marzo de 2021). *Conceptos Básicos de SOLIDWORKS Simulation*. Obtenido de CIMWORKS Smart Base: <https://www.cimworks.es/knowledge-base/conceptos-basicos-de-solidworks-simulation/>
- G. Torres-Sallan, O. O. (2014). *El biocarbon, una forma de secuestrar carbon y de transferir menos contaminantes al subsuelo y acuíferos*.
- González, Á. C.-A. (2016). *Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamerica*. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia: Revista Academia & Virtualidad.
- Higman, v. d. (2008). *Gasification*. Oxford: Elsevier.
- IDAE. (2007). FUTURO DE LA BIOMASA. En I. p. energia, *ENERGIA DE LA BIOMASA* (págs. 103-105-108). MADRID.
- INAMHI. (29 de Noviembre de 2024). *CONDICIONES METEOROLOGICAS GUAYAQUIL - DURAN*. Obtenido de CONDICIONES METEOROLOGICAS GUAYAQUIL - DURAN: <https://www.inamhi.gob.ec/guayaquil/registrody.pdf>
- Kintek. (11 de Octubre de 2024). *¿Cuáles son los distintos tipos de equipos de pirólisis?* Obtenido de *¿Cuáles son los distintos tipos de equipos de pirólisis?*: <https://es.kindle-tech.com/faqs/what-are-the-different-types-of-pyrolysis-equipment>
- KINTEK. (19 de Enero de 2025). *Kintek Solution*. Obtenido de *¿Qué es un reactor de pirólisis de lecho fijo? (5 puntos clave explicados)*: <https://es.kindle-tech.com/faqs/what-is-fixed-bed-pyrolysis-reactor>
- Klug, M. (2012). Pirolisis, un proceso para derretir biomasa. En M. Klug.
- Mayoral, J. G. (2015). Produccion de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirolisis en reactor a escala piloto y en reactor movil energeticamente sostenible. En J. G. Mayoral, *Produccion de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirolisis en reactor a escala piloto y en reactor movil energeticamente sostenible* (pág. 231).

Mompeán, J. A. (20 de septiembre de 2022). *Tipos de agitadores y mezcladores industriales*. Obtenido de Diferencia entre los agitadores y los mezcladores:  
<https://gargil.es/tipos-de-agitadores-y-mezcladores-industriales/>

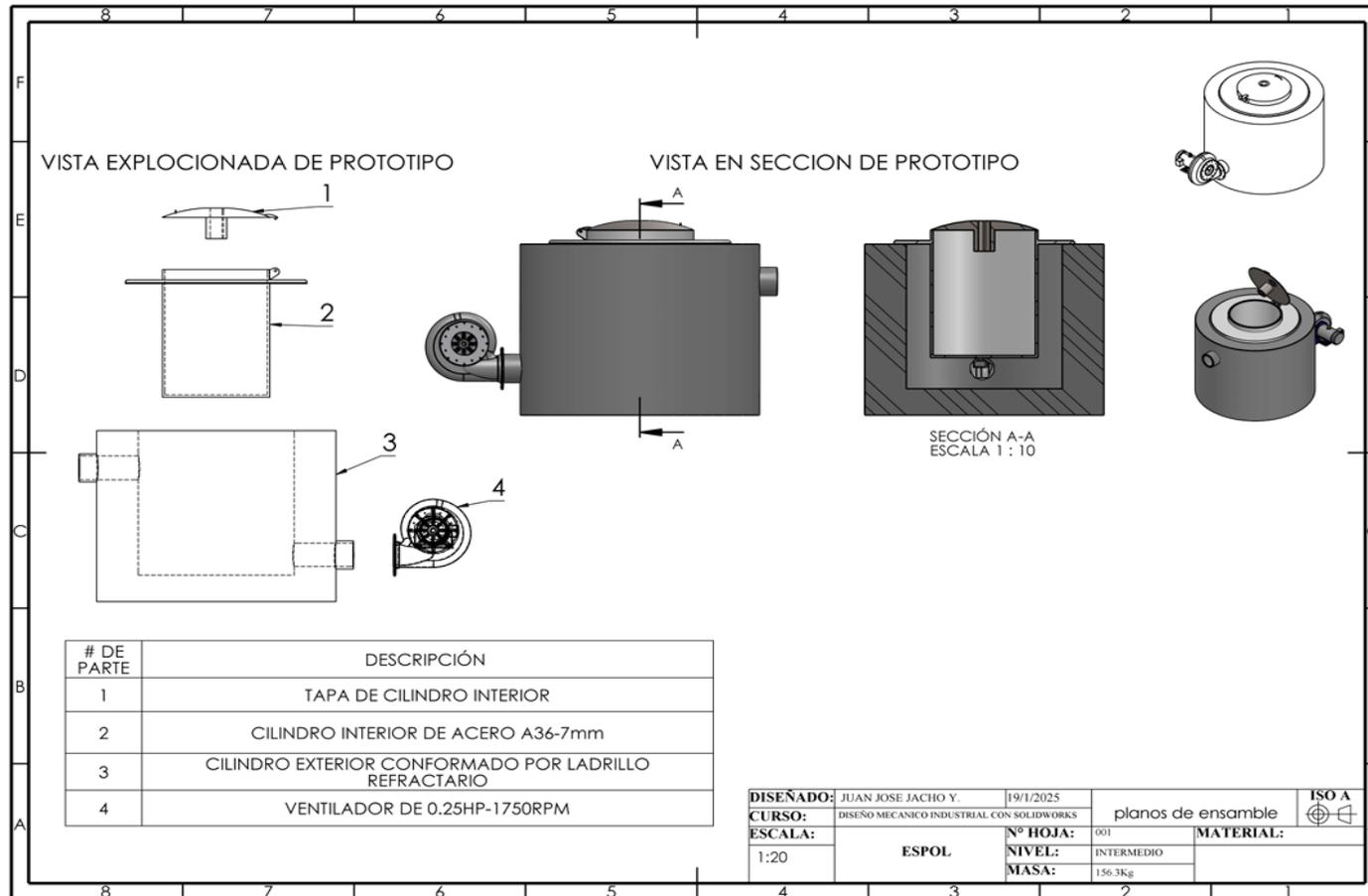
QUILCA, M. A. (2024). *ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE TALADRADO DE PLANCHAS DE ACERO ASTM A36*. QUITO: UPN.

Roth, G.-H.-C. (2011). *Micro-Gasification: Cooking with gas from biomass*. Honduras: Universidad Agrícola Panamericana Zamorano.

**APENDICES**

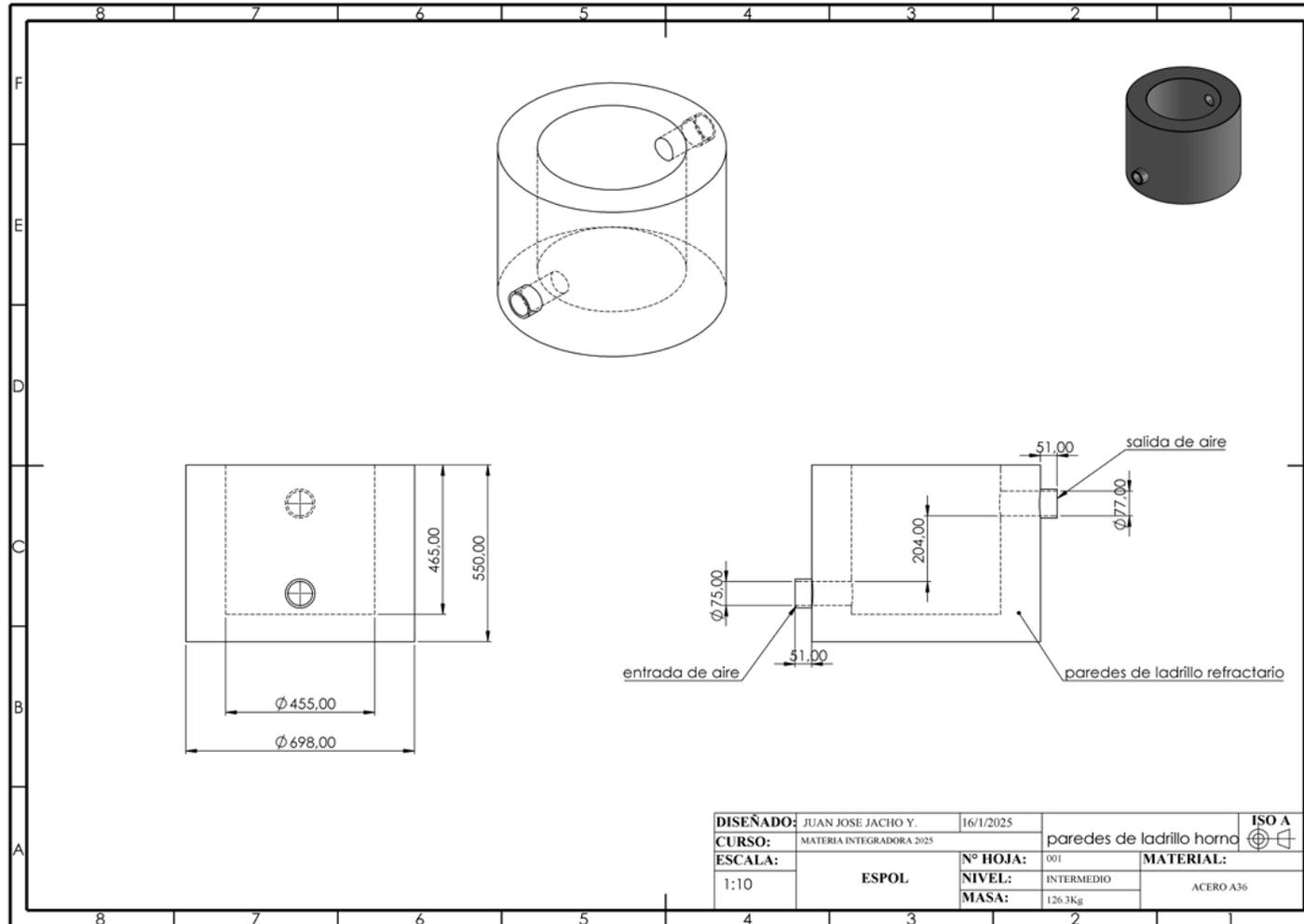
**Plano 1**

*Vista explosionada y de sección del prototipo*



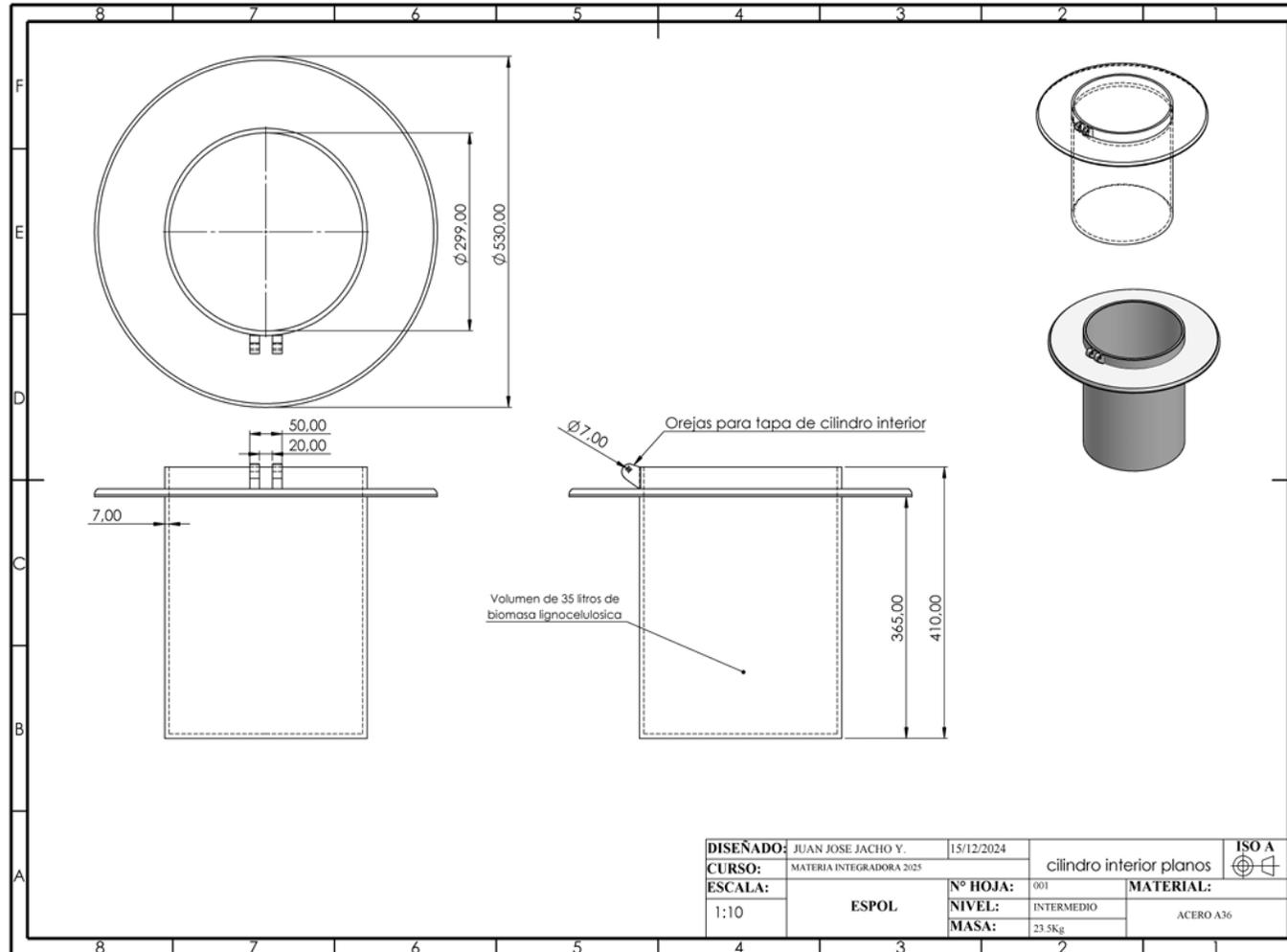
**Plano 2**

*Vista isométrica de cilindro exterior*



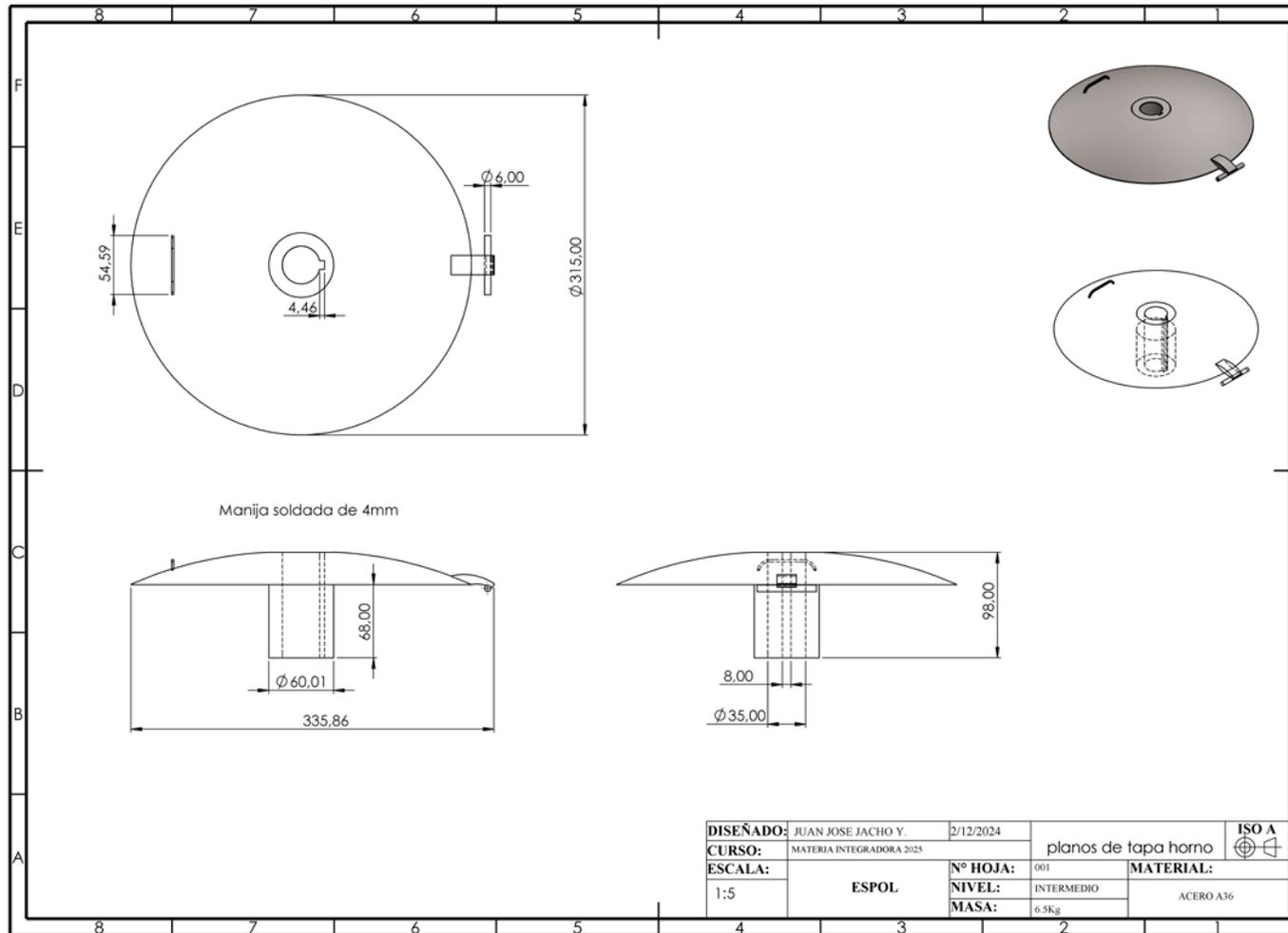
**Plano 3**

Vista isométrica de cilindro interior



**Plano 4**

*Vista isométrica de tapa de cilindro interior*



**Plano 5**

*Vista isométrica de ventilador*

