

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

“Optimización de un horno de combustión de biomasa para el secado de  
arroz”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Gustavo Arturo Serrano Rivera

Carlos Ovidio Rendón García

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2020

## **DEDICATORIA**

Este proyecto se lo dedico a mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida académica, ya que sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

**Gustavo Arturo Serrano Rivera**

El presente proyecto se lo dedico a madre por el apoyo que me ha brindado durante el transcurso de mi carrera.

**Carlos Ovidio Rendon Garcia**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres, por el apoyo que brindado a lo largo de mi vida universitaria; a los profesores PhD. Emérita Delgado y PhD. Juan Peralta, por la oportunidad de trabajar con ellos y los conocimientos que nos brindaron para la realización del proyecto; a mis compañeros con quienes compartí mis años de vida académica; y a Génesis, que siempre estuvo ahí para apoyarme, esperando que esté siempre presente en mi vida, ya que sin ella esta tesis no habría sido posible.

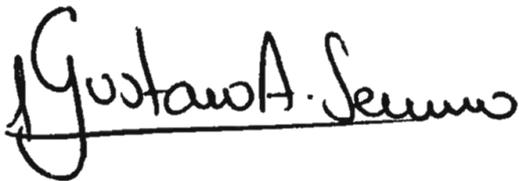
### **Gustavo Arturo Serrano Rivera**

Agradezco a mi familia por su paciencia y apoyo económico que me han otorgado durante el transcurso de la carrera, a mi papa y hermano que me han guiado con sus consejos, a mis compañeros de la universidad quienes han estado conmigo durante los diferentes desafíos académicos y sobre todo a los profesores Emérita Delgado y Juan Peralta por brindarnos asesoramiento para la elaboración del proyecto.

### **Carlos Ovidio Rendon Garcia**

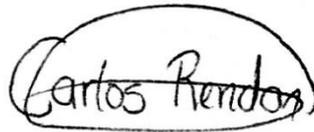
## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Gustavo Arturo Serrano Rivera



---

Carlos Ovidio Rendón García

## EVALUADORES

EMERITA  
ALEXANDR  
A  
DELGADO  
PLAZA

Firmado digitalmente por  
EMERITA ALEXANDRA  
DELGADO PLAZA  
Nombre de reconocimiento  
(DN): c=EC, o=SECURITY DATA  
S.A. 1, ou=ENTIDAD DE  
CERTIFICACION DE  
INFORMACION,  
serialNumber=280920191019,  
cn=EMERITA ALEXANDRA  
DELGADO PLAZA  
Fecha: 2021.07.14 14:50:22  
-05'00'

---

Emérita Delgado Plaza Ph.D.  
PROFESOR DE LA MATERIA

EMERITA  
ALEXANDR  
A  
DELGADO  
PLAZA

Firmado digitalmente por  
EMERITA ALEXANDRA  
DELGADO PLAZA  
Nombre de reconocimiento  
(DN): c=EC, o=SECURITY DATA  
S.A. 1, ou=ENTIDAD DE  
CERTIFICACION DE  
INFORMACION,  
serialNumber=280920191019,  
cn=EMERITA ALEXANDRA  
DELGADO PLAZA  
Fecha: 2021.07.14 14:51:27  
-05'00'

---

Emérita Delgado Plaza Ph.D.  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Existen piladoras localizadas en Guayaquil, Daule, Salitre que han empezado a cambiar su tecnología a partir del uso de hornos que utilizan la cascarilla de arroz (CA) como combustible, siendo este el principal residuo de la planta. El proyecto presente tiene como objetivo optimizar un horno de biomasa con la finalidad de aprovechar el potencial energético para un óptimo secado del arroz y mejoramiento de la producción. La metodología empleada para la realización del proyecto fue el uso de los conceptos de diseño mecánico y transferencia de calor en conjunto con una aplicación de fluidodinámica computacional (CFD) que permitió realizar el diseño de forma del horno que se encontraba en las instalaciones para luego realizar las debidas modificaciones que, por medio de iteraciones simuladas validaron al diseño. Como resultado se corrigió las líneas de flujo evitando que ingresen en la cámara de ceniza y en la tolva, se redujo la temperatura de las paredes a un rango de 50 y 90 °C; se logró una correcta deposición de la ceniza; se obtuvo una combustión completa de la CA aprovechando la capacidad calorífica que ofrece obteniendo una temperatura de 60 °C, en la cámara de secado de arroz. Finalmente, con la implementación del proyecto se obtiene beneficios para los sectores donde la producción de arroz es de menor a mediana escala disminuyendo los costos de producción al obtener el combustible en la disposición final de los residuos, además de reducir el impacto ambiental al usar de energías limpias.

**Palabras Clave:** horno de biomasa, transferencia de calor, cascarilla de arroz, líneas de flujo, energías limpias.

## **ABSTRACT**

*There are rice mills located in Guayaquil, Daule and Salitre, that started to change their technology by using ovens which use rice husk (RH) as fuel, this being the main residue of the plant. This project has as objective to optimize a biomass oven to take fully advantage of the energetic potential of the RH for an optimal rice drying process and a production improvement. We used mechanical design and heat transfer concepts together with Computational Fluid Dynamics (CFD) to develop a form design of the oven and then make the modifications that we previously validated by simulation. As results, the flow lines were corrected, preventing them from going to the ash chamber and the hopper; the temperature of the walls was reduced from a range of 100-150 °C to 50-90 °C with the addition of insulation; the new combustion chamber managed a correct ash deposition and it achieved a complete combustion of the RH, taking advantage of its heat capacity, reaching a temperature of 60 °C at the heat exchanger exit, optimal for the rice drying chamber. This project shows benefits in sectors where the rice production is in a small to medium scale, reducing production costs by obtaining fuel in the final disposal of agricultural waste, in addition to reduce the environmental impact by using clean energy.*

**Key words:** *biomass oven, heat transfer, rice husk, flow lines, clean energy.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Descripción del problema .....	1
1.3. Justificación del problema .....	2
1.4. Objetivos .....	2
1.4.1. Objetivo general .....	2
1.4.2. Objetivos específicos .....	3
1.5. Marco teórico .....	3
1.5.1. Arroz .....	3
1.5.1.1. Morfología y características de la planta y el grano.....	4
1.5.2. Características de la cascarilla de arroz.....	5
1.5.2.1. Disponibilidad y potencial energético de la cascarilla de arroz.....	6
1.5.2.2. Propiedades físicas y químicas de la cascarilla de arroz.....	7
1.5.3. Tecnología de hornos de combustión.....	8
1.5.3.1. Tecnología de lecho fijo.....	8
1.5.3.1.1. Hogar con parrilla fija .....	10
1.5.3.1.2. Hogar con Parrilla Plana: .....	10
1.5.3.1.3. Hogar con Parrilla Escalonada:.....	11
1.5.3.1.4. Hogar con parrilla escalonada movable: .....	12
1.5.3.2. Tecnología de lecho fluidizado.....	13
1.5.3.2.1. Lecho Fluidizado Burbujeante.....	14
1.5.3.2.2. Lecho Fluidizado Circulante.....	15
1.5.4. Análisis de los tipos de tecnologías de horno de combustión .....	15

CAPÍTULO 2 .....	17
2. Metodología .....	17
2.1. Proceso de diseño .....	17
2.2. Requerimientos del beneficiario .....	18
2.2.1. Parámetros de diseño .....	18
2.2.2. Tipo de biomasa.....	18
2.2.3. Condiciones de operación.....	18
2.2.4. Eficiencia energética .....	18
2.2.5. Control de temperatura .....	19
2.2.6. Materiales .....	19
2.2.7. Accesibilidad de mercado.....	19
2.2.8. Facilidad de uso .....	19
2.2.9. Mantenimiento.....	19
2.2.10. Seguridad.....	20
2.2.11. Costo.....	20
2.2.12. Extracción de la ceniza .....	20
2.3. Selección de la mejor alternativa.....	20
2.3.1. Matriz de decisión .....	20
2.4. Normativa.....	21
2.5. Diseño de forma.....	21
2.6. Combustión de la cascarilla de arroz.....	22
2.6.1. Fórmula para el combustible .....	22
2.6.2. Ecuación general de combustión .....	23
2.6.3. Subíndices de la fórmula química.....	23
2.6.4. Relación teórica aire-combustible.....	23
2.6.5. Relación real aire-combustible .....	24
2.7. Flujo de cascarilla de arroz para combustión continua .....	24
2.8. Flujo de gases de combustión .....	24
2.9. Calor total de la combustión .....	24
2.10. Consideración de pérdidas de calor .....	25
2.10.1. Resistencia térmica por conducción: .....	25
2.10.2. Resistencia térmica por convección en el interior del horno: .....	25
2.10.3. Resistencia térmica por convección en el exterior del horno .....	27
2.10.4. Resistencia térmica por radiación:.....	27

2.11.	Perdidas de calor en la cámara de combustión .....	27
2.12.	Calor almacenado en las paredes del horno .....	29
2.13.	Calor cedido a las cenizas.....	29
CAPÍTULO 3 .....		30
3.	Resultados y análisis .....	30
3.1.	Resultados teóricos del horno .....	30
3.2.	Simulación CFD .....	33
3.2.1.	Modelamiento dinámico del flujo en el horno, fundamentos teóricos del análisis CFD.....	33
3.2.2.	Preparación de la simulación y factores a considerar .....	34
3.2.3.	Simulación de cámara de combustión .....	37
3.3.	Selección de sopladores de aire centrifugo en la cámara de combustión.....	41
3.4.	Análisis de costos .....	42
3.4.1.	Costos de materiales de la cámara de secado .....	42
3.4.2.	Costos de mano de obra .....	42
3.4.3.	Costos de diseño.....	43
3.4.4.	Costos totales .....	43
CAPÍTULO 4 .....		44
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	44
4.1.	Conclusiones.....	44
4.2.	Recomendaciones.....	46
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GLP	Gas Licuado de Petróleo
CA	Cascarilla de Arroz
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
Ha.	Hectárea
Tm.	Tonelada métrica
CFD	Computational Fluid Dynamics
RH	Rice husk (Cascarilla de arroz)

## SIMBOLOGÍA

$Ra_L$	Número de Rayleigh
$\rho_a$	Densidad del aire
$\beta$	Coefficiente de expansión volumétrica
$m_{(\frac{a}{f})t}$	Relación teórica aire-combustible
$m_{(\frac{a}{f})r}$	Relación real aire-combustible
$EA$	Exceso de aire
$\dot{m}_{CA}$	Flujo masico de la cascarilla de arroz
$h_{i-h}$	Coefficiente de convección en el interior del horno
$c_{p_{cz}}$	Calor especifico de la ceniza
$T_{cz}$	Temperatura de la ceniza
$m_{ac}$	Masa total del acero
$T_{out}$	Temperatura ambiente
$N_u$	Numero de Nusselt
$k$	Conductividad térmica
$D$	Diámetro
$m_{aire}$	Masa del aire
$m_{combustible}$	Masa del combustible
$n$	Numero de moles
$M$	Masa molar
$\dot{m}_{aire-blower1}$	Flujo masico del blower 1
$\dot{m}_{aire-blower2}$	Flujo masico del blower 2
$\dot{m}_{combustion}$	Flujo masico de los gases de combustión
$\dot{m}_{cenizas}$	Flujo masico de la ceniza
$Q_{CA}$	Calor de la cascarilla de arroz
$P_c$	Poder calorífico de la cascarilla de arroz
$U$	Coefficiente global de transferencia de calor
$A$	Área total de las paredes del horno
$Q_c$	Calor transferido hacia el exterior
$h_{i-ir}$	Coefficiente de radiación en el interior del horno
$e_a$	Espesor del acero

$k_a$	Conductividad térmica del acero
$e_{fv}$	Espesor de la fibra de vidrio
$k_{fv}$	Conductividad térmica de la fibra de vidrio
$h_{o-h}$	Coefficiente de convección exterior del horno
$g$	Gravedad
$\nu$	Viscosidad cinemática
$L$	Longitud de la placa
$\alpha$	Difusividad térmica
$\theta$	Angulo de inclinación de la parrilla
$\varepsilon$	Emisividad
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann
$F$	Factor de forma
$Q_{ac}$	Calor almacenado en el acero
$c_{p_{ac}}$	Calor específico del acero
$T_{p_{int}}$	Temperatura interna de la pared
$T_{m_p}$	Temperatura media de la pared
$T_{p_{out}}$	Temperatura externa de la pared
$Q_{cz}$	Calor cedido a la ceniza
$m_{cz}$	Masa de la ceniza
$T_{parr}$	Temperatura de la parrilla
$\dot{Q}_{aire-blower1}$	Caudal del blower 1
$\dot{Q}_{aire-blower2}$	Caudal del blower 2
$\dot{Q}_{aire-blower3}$	Caudal del blower 3
$Q_t$	Calor total de pérdidas del sistema
$T_f$	Temperatura de película
$V_{ais}$	Volumen total del aislante
$m_{ais}$	Masa total del aislante
$\eta$	Eficiencia
$f$	Factor de fricción
$D_h$	Diámetro hidráulico
$V_g$	Velocidad de los gases de combustión
$\Delta P_f$	Perdida de presión a lo largo de la chimenea

$L$  Longitud de la chimenea  
 $Re$  Numero de Reynolds

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Etapas de proceso de quemado. [Fuente: Autores] .....	9
Figura 1.2 Hogar con parrilla plana. [Fuente: M. Echeverria, 2010] .....	10
Figura 1.3 Hogar con parrilla bajo el piso. [Fuente: M. Echeverria, 2010].....	11
Figura 1.4 Hogar a nivel del piso. [Fuente: M. Echeverria, 2010] .....	11
Figura 1.5 Hogar portátil. [Fuente: M. Echeverria, 2010] .....	12
Figura 1.6 Hogar con parrilla escalonada movable. [Fuente: M. Echeverria, 2010] .....	13
Figura 1.7 a) Lecho fluidizado burbujeante b) Lecho fluidizado con recirculación. [Fuente: M. Echeverria, 2010] .....	14
Figura 1.8 Horno de lecho fluidizado burbujeante y sus componentes. [Fuente: Toscano, 2009] .....	15
Figura 2.1 Proceso de diseño. [Fuente: Autores].....	17
Figura 2.2 Diseño de forma del horno de biomasa e intercambiador. [Fuente: Autores].....	22
Figura 2.3 Composición de las paredes de la cámara de combustión. [Fuente: Autores].....	28
Figura 3.1 Geometría exterior e interior del modelo de la cámara de combustión. [Fuente: Autores].....	33
Figura 3.2 Dominio computacional y condiciones de frontera de la simulación. [Fuente: Autores].....	37
Figura 3.3 Simulación inicial del sistema. [Fuente: Autores] .....	38
Figura 3.4 Líneas de flujo en el interior de la cámara de combustión. [Fuente: Autores].....	39
Figura 3.5 Perfil de temperatura de las paredes exteriores de la cámara de combustión. [Fuente: Autores].....	40
Figura 3.6 Líneas de flujo en el interior del intercambiador de calor. [Fuente: Autores].....	41
Figura C.1 Simulación inicial del sistema. [Fuente: Autores] .....	64
Figura C.2 Simulación tras las primeras modificaciones. [Fuente: Autores].....	64
Figura C.3 Simulación tras con una nueva orientación de la parrilla y del baffle inferior. [Fuente: Autores] .....	65

Figura C.4 Simulación con una nueva orientación de la parrilla y la inclusión de los baffles. [Fuente: Autores] .....	65
<i>Figura C.5</i> Simulación de la geometría final de la cámara de combustión. [Fuente: Autores].....	66
Figura C.6 Simulación del sistema y de la circulación de gases en la chimenea. [Fuente: Autores].....	66
Figura C.7 Simulación del flujo en el intercambiador de calor. [Fuente: Autores] .....	67
Figura C.8 Temperatura promedio de los aislantes. [Fuente: Autores] .....	67
Figura C.9 Temperatura promedio de las paredes del horno. [Fuente: Autores] .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Producción nacional a nivel provincial de arroz en el Ecuador, superficie y rendimiento. [Fuente: (Arteaga J. F., 2020) (Velázquez, 2014)] .....	4
Tabla 2.1 Matriz de decisión para la selección del horno. [Fuente: Autores] .....	21
Tabla 3.1 Resultados teóricos de los flujos masicos obtenido para la combustión completa de la CA. [Fuente: Autores].....	30
Tabla 3.2 Perdidas de calor en el equipo. [Fuente: Autores] .....	31
Tabla 3.3 Perdida de presión a lo largo de la chimenea. [Fuente: Autores] .....	33
Tabla 3.4 Condiciones iniciales de la simulación en el “Wizard de Flow Simulation”. [Fuente: Autores].....	35
Tabla 3.5 Costo de materiales para el rediseño de la cámara de secado. [Fuente: Autores].....	42
Tabla 3.6 Glosario del costo de mano de obra. [Fuente: Autores] .....	42
Tabla 3.7 Costo del diseño y simulaciones. [Fuente: Autores].....	43
Tabla 3.8 Costos totales. [Fuente: Autores].....	43
Tabla A.1 Propiedades de los gases de combustión. ....	54
Tabla A.2 Propiedades del aire a temperatura de película. ....	55
Tabla B.1 Propiedades termo físicas del aire a presión atmosférica. [Fuente: Incropera y Dewitt, 2011].....	62
Tabla B.2 Tabla periódica de los elementos. [Fuente: (Ralph Petrucci, 2011)] .....	63
Tabla B.3 Valores de la aspereza equivalente para tubo comerciales nuevos. [Fuente: (Yunus Cengel, 2011)] .....	63

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En la actualidad, alrededor de 100 millones de toneladas de cascarilla de arroz (CA) son producidas anualmente a nivel mundial (Martinez, Acevedo, & Espinal, 2005). Además, una de las características de este producto, es que posee una lenta biodegradación, que puede durar hasta 5 años, lo que provoca que se acumule en el suelo, generando grandes cantidades de metano ( $CH_4$ ) uno de los principales causantes del efecto invernadero. Habría que decir también, que la CA constituye una de las biomásas con mayor disponibilidad y con la posibilidad de usarla para generar energía.

### 1.2. Descripción del problema

La empresa Soinsó S.A cuenta con un horno de biomasa en el que se realiza el proceso del secado de arroz, este a su vez se abastece con cascarilla de arroz para generar calor. Se determinó que, durante el proceso de combustión, apenas el 80% de la CA se consume. Así mismo, se han encontrado fallas en el sistema de combustión, que no permiten alcanzar las temperaturas adecuadas, produciéndose ceniza en exceso y material particulado que se mezcla con el ambiente.

Se propondrá el rediseño de este horno, que permita la quema controlada de la CA, aprovechando así el valor energético de la biomasa. La combustión controlada permitirá la obtención de ceniza, lo que constituye un producto capaz de ser comercializado en diferentes industrias, como son la cerámica y la construcción, lo que sugiere que de este residuo podría obtenerse cierto beneficio económico.

El secado es uno de los procesos que exige mayor demanda de energía, ya que se debe extraer el porcentaje de agua asociado al producto y la humedad

de la superficie. (E. Delgado, 2018). Los secadores utilizados en la industria del arroz utilizan comúnmente GLP de uso industrial como fuente principal de combustible, la mayoría de estos presentan un flujo variante de aire caliente que oscila entre los 35 °C y 80 °C de temperatura, siendo este un principal problema en cuanto a calidad final del producto por motivo que la temperatura que debe alcanzar el secador oscila entre los 40 °C a 50 °C.

Existen piladoras localizadas en Guayaquil, Daule, Salitre que han empezado a cambiar su tecnología a partir del uso de hornos de combustión que utilizan cascarilla de arroz, siendo este el principal residuo de la planta.

Es importante mencionar que el proyecto va dirigido a sectores donde la producción del secado de arroz es de pequeña a mediana escala.

### **1.3. Justificación del problema**

El presente proyecto se realiza con el objetivo principal de proporcionar un espacio a los biocombustibles sólidos y de esta manera aprovechar un recurso que se ha estado desperdiciando durante años. Al usar la cascarilla de arroz como combustible se disminuye los costos de producción al obtenerlo en la disposición final de los residuos de los procesos agrícolas, además, de reducir el impacto ambiental al usar de energías limpias.

Con el uso adecuado de baffles y de los parámetros de entrada del flujo del aire, se espera que el proyecto resuelva los problemas de contraflujo que existen en el horno de combustión y de esta manera aumentar la eficiencia aprovechando en su totalidad la capacidad calorífica que ofrece este residuo agrícola.

### **1.4. Objetivos**

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

- Optimizar el diseño de un horno de combustión de biomasa a partir de la aplicación de CFD para un mejor aprovechamiento de la cascarilla de arroz como biocombustible y el mejoramiento de la producción.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar el tipo de horno de combustión de cascarilla de arroz más adecuado para la escala del proyecto.
- Determinar los materiales para el cumplimiento de los parámetros que aseguren la optimización del nuevo diseño a partir de la aplicación de los conceptos de ingeniería mecánica y normativa de funcionamiento de los hornos.
- Validar el nuevo diseño, utilizando la aplicación de la simulación de los principios de dinámica de fluidos y calentamiento térmico, para la comprobación de las líneas de flujo de los gases de combustión.
- Demostrar la optimización del horno de biomasa propuesto en el aprovechamiento de la cascarilla de arroz como biocombustible.

## **1.5. Marco teórico**

### **1.5.1. Arroz**

El arroz es uno de los granos más consumidos desde la antigüedad. En la actualidad este grano lo consume más de la mitad de la población mundial. Este es un cereal y alimento indispensable para contar con una dieta equilibrada; es el alimento principal en Asia, cuya producción asciende a más de 400 millones de toneladas al año. (Arteaga J. F., 2020)

Según el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), el Ecuador produce alrededor de 1'714912 toneladas anuales, ocupando el quinto puesto en Latinoamérica como productor de arroz. Este ocupa un 15.34% del área para siembra y es considerado como un producto agrícola autosustentable, pues satisface la demanda nacional para su consumo. Su producción se centra en las provincias del Guayas y Los Ríos, con un 60% y 34% respectivamente, correspondiente al 94% aproximado de la siembra que corresponde a la región Costa, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). La Tabla 1, muestra la producción a nivel provincial de arroz en el Ecuador.

**Tabla 1.1 Producción nacional a nivel provincial de arroz en el Ecuador, superficie y rendimiento. [Fuente: (Arteaga J. F., 2020) (Velázquez, 2014)]**

Provincia	2014						
	Superficie sembrada (Ha.)		Superficie cosechada (Ha.)		Producción de arroz en cáscara, húmedo y sucio (Tm.)		Rendimiento (Tm./Ha.)
Guayas	251.010	63,07%	239.770	63,74%	968.168	66,84%	4,04
Los Ríos	118.090	29,67%	109.280	29,05%	410.909	28,37%	3,76
Manabí	15.580	3,91%	14.310	3,80%	45.624	3,15%	3,19
Otros	13.278	3,34%	12.822	3,41%	23.691	1,64%	1,85
Total, Nacional	397.958		376.182		1.448.392		

La gran producción que existe a nivel nacional significa una alta producción de CA, lo que deja a disposición una gran cantidad de biomasa disponible y viable.

#### **1.5.1.1. Morfología y características de la planta y el grano**

Su planta (*Oryza Sativa L.*), posee tallos muy ramificados y puede llegar a alcanzar entre 0,6 y 1,8 metros de altura. Los tallos terminan en una inflorescencia, una panícula de 20 a 30 cm de largo. Cada una se compone de entre 50 y 300 flores o espiguillas, de las cuales se forman los granos. (Rodríguez, 2007) (UNCTAD, 2006)

El grano de arroz está compuesto por una cubierta exterior, la cáscara y el fruto del arroz. El 20% del peso del grano es compuesto por la cascarilla; el pericarpio contribuye al 1-2%; la aleurona, nucela y cubierta seminal el 4-6%; germen 1%; escutelo 2%; y el endospermo un 90-91%. Sus dimensiones varían entre 5 y 10 mm de largo y 1 a 5mm de ancho. (Rodríguez, 2007) (Juliano, 1994) Las dimensiones del grano, así como su transparencia, color y envejecimiento, son indicadores del grado de calidad de este, y pueden tener gran importancia comercial según el mercado.

El arroz elaborado entero posee un rendimiento variable a nivel industrial, depende de la variedad que se use, los métodos de cosecha, los tratamientos post cosecha que se apliquen y la calidad del proceso industrial al cual sea sometido.

El procesamiento del arroz sucio conlleva una serie de etapas después de la cosecha, estas empiezan con la limpieza de los granos cosechados, para después, mediante un proceso de molienda, se deshace de la CA. Luego, el producto es tamizado, donde se separan las partículas más pequeñas, para poder retirar los residuos. El siguiente paso es el blanqueamiento, el cual se realiza en hornos, allí se separa el salvado del grano blanco; el número de equipos blanqueadores dependerá del grado de blancura que se desee, esto también aumentará la cantidad de salvado que se obtiene. El arroz blanqueado es llevado al pulidor, el cual funciona como el blanqueador, con la excepción de que este sirve para dar brillo y separar las partículas de salvado que puedan haber quedado rezagadas.

### **1.5.2. Características de la cascarilla de arroz**

La CA presenta características que hacen que su manipulación y uso sea difícil. Posee un bajo peso específico y alta abrasividad, es de naturaleza fuerte y leñosa; por lo cual, es resistente a factores ambientales, protegiendo al grano de arroz de sufrir deterioro durante el tiempo de desarrollo de la planta. La cascarilla no es apta para el consumo humano, pues contiene sílice en altos grados, aunque ha sido utilizada como alimento para animales en ciertas ocasiones, esta no aporta fibra y provoca irritación en el tracto digestivo de los animales que la consumen. (Rodríguez, 2007)

La cascarilla es considerada un residuo y una fuente de inconvenientes para los productores, pero, poco a poco, se fue convirtiendo en una alternativa interesante, de la cual se pueden obtener beneficios

económicos. Algunas de las aplicaciones que se le puede dar a este subproducto se pueden encontrar en el sector avícola, floricultor, ganadero, en la construcción y la producción de combustibles, entre otros.

En la actualidad, se siguen buscando métodos para la disposición de este material, como la combustión controlada, método de preocupación ambiental, ya que no se aprovechan las cenizas ni el calor generado y las emisiones de CO (monóxido de carbono) que resultan de este proceso.

#### 1.5.2.1. Disponibilidad y potencial energético de la cascarilla de arroz

El MAGAP, tras diversos cálculos y basados en la experiencia, asigna un porcentaje de 20% de contenido de CA en el arroz seco sin pilar. El poder calorífico de la cascarilla de arroz es de 15,58 MJ/kg, y su potencial energético bruto a nivel nacional alcanza los 3 PJ/año. El valor puede ser mayor dependiendo del volumen de arroz que se produzcan. (Pelaez-Samaniego, M.R.; Garcia-Perez, Manuel; Martí-Hertrero, Jaime; Montero-Izquierdo, Andres, 2015) En la tabla 1.2 se ilustra el poder calorífico de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad

**Tabla 1.2 Poder calorífico de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad. [Fuente: (Agustin Valverde G., 2007)]**

Contenido de humedad	Poder calorífico (kJ/kg)
0	19880
10	17644
20	15412
30	13580
40	10947
50	8715
60	6413

Luego del proceso de pilado, existen aproximadamente 342000 toneladas de cascarilla utilizable. Este producto, actualmente, posee un uso limitado. Su demanda para ser usado como combustible es pequeña, y se lo ve, principalmente, en granjas avícolas y

floricultoras. En un cálculo estimado, las piladoras usan el 50% de la cascarilla como combustible, en casos excepcionales el 100% de la misma, como el caso de la piladora de Pronaca en Babahoyo; el 35% de la cascarilla es utilizada en otros procesos. (Pelaez-Samaniego et al, 2015)

#### **1.5.2.2. Propiedades físicas y químicas de la cascarilla de arroz**

En el análisis de la CA que realizaron Pelaez-Samaniego et al, se enviaron muestras obtenidas en Los Ríos y Guayas a laboratorios de la Asociación Brasileña de Cementos Portland (ABCP), en Sao Paulo, Brasil. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.3 y se maneja como una referencia en la industria arrocera de Ecuador.

La temperatura máxima que se consigue en la combustión de la cascarilla de arroz depende de la condición: Se tiene de 970°C para CA seca, 650°C con porcentaje de humedad y hasta los 1000°C combinada con combustible. (Abelardo Prada, 2010)

La cantidad de cenizas generadas de la combustión corresponde a 14-25% de la CA dependiendo de su variedad, clima y suelo de la región. (J. Martinez, 2009). Esta se compone de sílice, potasio, carbón, calcio, fósforo y otros elementos, siendo muchos de estos perjudiciales para la salud, por lo que se resalta la importancia de un adecuado manejo de este residuo. (Pelaez-Samaniego et al, 2015) Los componentes químicos de la ceniza se presentan en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4 Composición química de las cenizas de la combustión de la cascarilla de arroz. [Fuente: (Pelaez-Samaniego et al, 2015)]**

Componente	Composición
SiO <sub>2</sub> (%)	93,88
K <sub>2</sub> O (%)	1,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,65
CaO (%)	0,70
MgO (%)	0,35
Na <sub>2</sub> O (%)	0,19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,14
SO <sub>3</sub> (%)	0,72
MnO (%)	0,16
NiO (%)	0,01
CuO (%)	0,02
ZnO (%)	0,04
PbO (%)	0,08

### **1.5.3. Tecnología de hornos de combustión**

Actualmente existen diferentes tecnologías de hornos para la combustión de biomasa, dadas las condiciones físicas, químicas y factores externos, entre otros, sin embargo, para el uso de la CA, se presentan características similares en contraste a las demás tecnologías de combustión existentes. (M. Echeverria, 2010). Estas se categorizan en dos grupos:

- Tecnología de lecho fijo
- Tecnología de lecho fluidizado

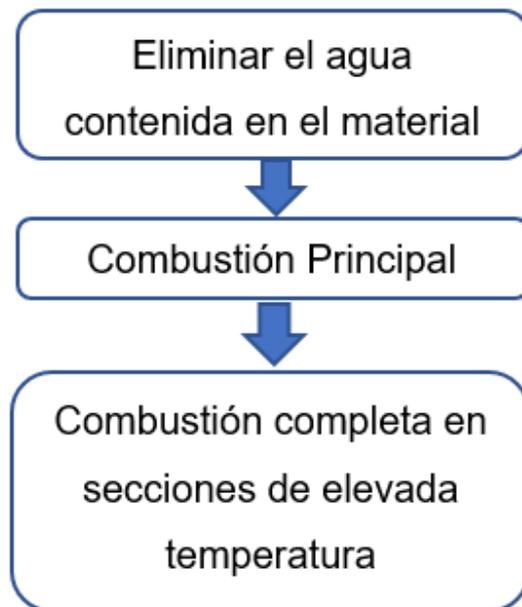
#### **1.5.3.1. Tecnología de lecho fijo**

Dentro de esta tecnología se encuentran los hornos de parrilla, siendo el más utilizado actualmente para la generación de energía eléctrica usando combustibles tipo biomásicos debido al fácil manejo, mantenimiento y control del proceso.

El procedimiento consiste en el movimiento relativo del combustible por medio de unos elementos que lo sostienen (sistema de

alimentación) hacia la parrilla, según el avance, se administra aire necesario para la combustión de manera que a la salida el porcentaje de inquemado sea mínimo. En el proceso de quemado se produce en tres etapas:

**Figura 1.1 Etapas de proceso de quemado.**  
[Fuente: Autores]



Se alimenta aire por medio de unos sopladores introduciéndose en la cámara de combustión por debajo de la parrilla, pero a menudo también suele introducirse por la zona de pre-combustión. Es necesario tener un segundo soplador de aire para obtener una excelente combustión de los volátiles desprendidos de la biomasa, este se introduce por la parte superior de la cámara de combustión.

Para los métodos de alimentación de biomasa se tiene los tornillos sin fin que permiten regular la velocidad de flujo del combustible, las válvulas alveolares que permiten obtener un flujo homogéneo y de pistón hidráulico. Estas se pueden combinar para obtener un sistema de alimentación eficiente. Existen diferentes tipos de diseños de hogar con parrilla que han utilizado como combustible la cascarilla de arroz los cuales se detallan a continuación.

#### 1.5.3.1.1. Hogar con parilla fija

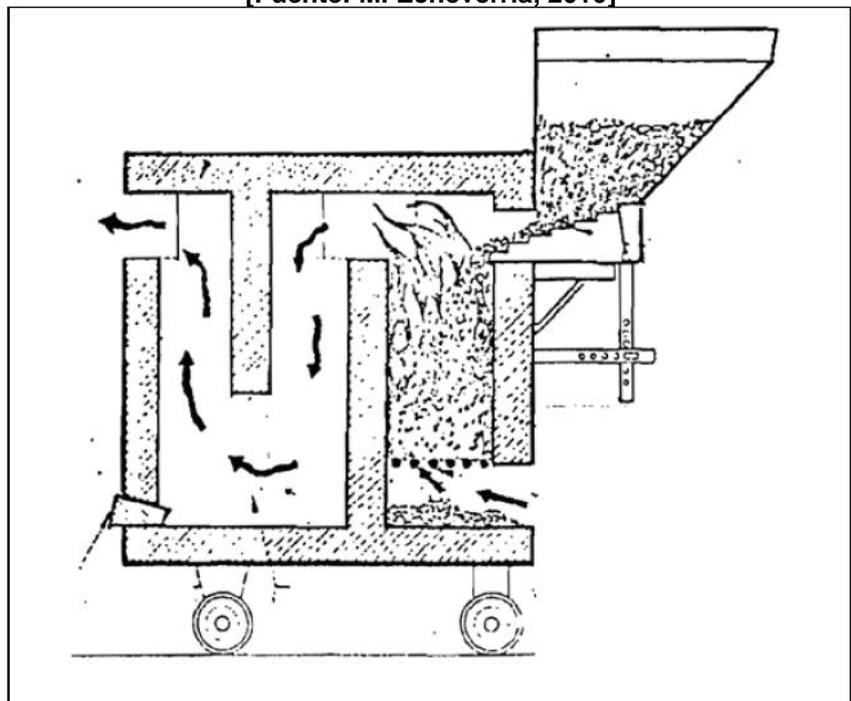
Se realiza el quemado de la cascarilla de arroz en pila sobre alguna superficie horizontal que por lo general suele ser tierra o algún otro tipo de material resistente a la temperatura, la ceniza es removida mecánicamente.

#### 1.5.3.1.2. Hogar con Parrilla Plana:

Al usar la cascarilla de arroz como combustible en este tipo de sistemas se encontró que presenta deficiencias debido a que no se estabiliza la llama y requiere de una presión elevada de aire para que el oxígeno se mezcle con la cascarilla. Además, para el inicio de la combustión se requiere de una buena camada de lena o carbón y la parrilla debe ser movida constantemente porque se produce grandes cantidades de cenizas

**Figura 1.2 Hogar con parrilla plana.**

[Fuente: M. Echeverria, 2010]

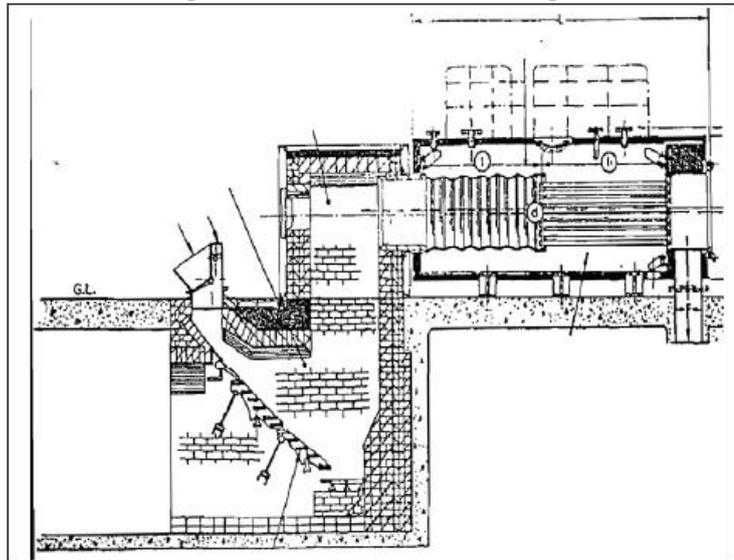


### 1.5.3.1.3. Hogar con Parrilla Escalonada:

Diseño tradicional que fue introducido por BURMA en 1880 y existen tres tipos de variaciones:

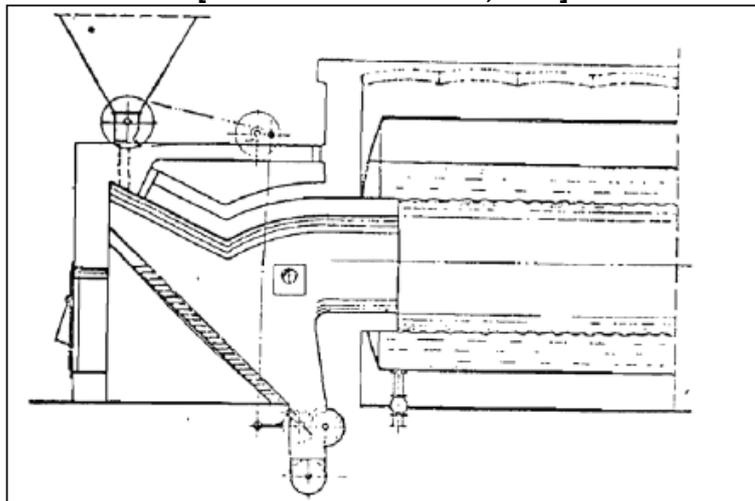
- a) Bajo el piso. - Como se muestra en la figura es posible acoplar a nivel con una caldera

**Figura 1.3 Hogar con parrilla bajo el piso.**  
[Fuente: M. Echeverria, 2010]



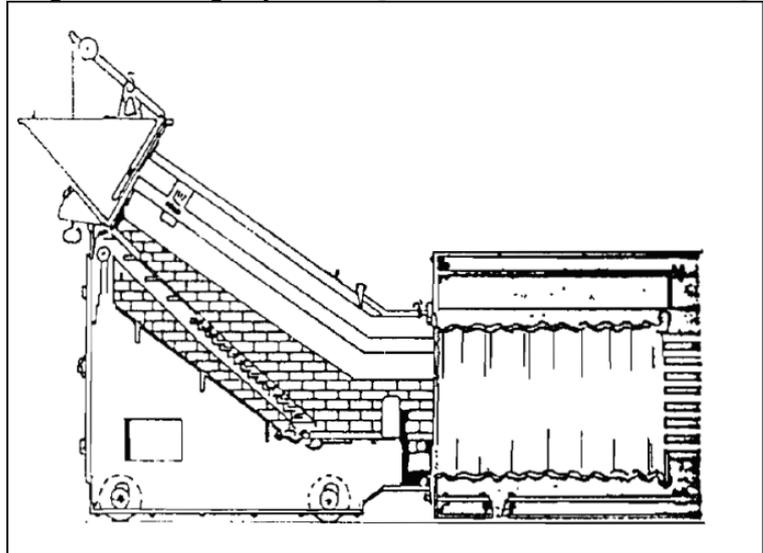
- a) A nivel del piso. - Cuenta con un sistema de remoción de cenizas por hundimiento con un sistema de poleas

**Figura 1.4 Hogar a nivel del piso.**  
[Fuente: M. Echeverria, 2010]



- b) Hogar Portátil. - Cuenta con un fogón desmontable lo que permite realizar las operaciones de mantenimiento periódico más accesibles.

**Figura 1.5 Hogar portátil. [Fuente: M. Echeverria, 2010]**

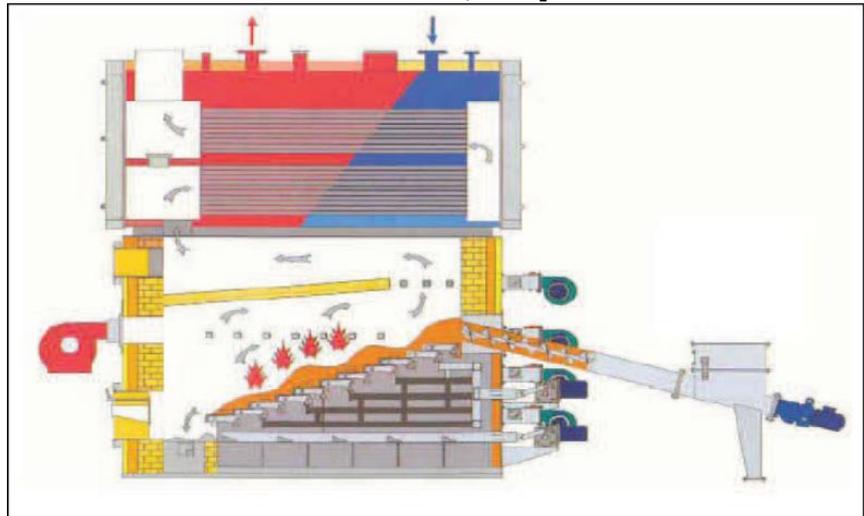


En este tipo de parrillas se debe de tomar en cuenta el grado de inclinación que dependerá de la densidad de la cascarilla al suministro, el porcentaje de humedad, tamaño, cantidad de partículas desconocidas, y si la cascarilla viene precocida o cruda.

#### **1.5.3.1.4. Hogar con parrilla escalonada movable:**

Permite manipular las zonas de alimentación, combustión y expulsión de las cenizas. Experiencias previas comprueban que este sistema tiene una alta eficiencia en combustión con cascarilla de arroz debido a que alcanzan alta razón de conversión de energía. Sin embargo, el inconveniente es su elevado costo.

**Figura 1.6 Hogar con parrilla escalonada móvil. [Fuente: M. Echeverría, 2010]**



### **1.5.3.2. Tecnología de lecho fluidizado**

Consisten en la suspensión de un lecho compuesto por partículas sólidas de combustible y un material inerte (arena), que actúa como si fuera un líquido debido a una corriente de aire ascendente que pasa a través del lecho, forzando a las partículas un movimiento ascendente lo que origina una expansión, razón por la cual se denomina lecho fluidizado. El lecho está compuesto de entre un 2 y 3 % de biomasa y el resto es de material inerte, dicha proporción otorga a la mezcla una gran capacidad de almacenamiento de calor en la cámara de combustión evitando que las variaciones de humedad tengan efecto en un entorno turbulento, produciéndose instantáneamente la evaporación y la combustión de la biomasa. Esta tecnología mantiene a un intervalo de velocidad crítica, si excede, el lecho pierde su cohesión y el material asciende con el flujo de aire, por otro lado, si la velocidad es menor que la crítica, el lecho se sedimenta sin generar ningún efecto. (Degremont, 2011)

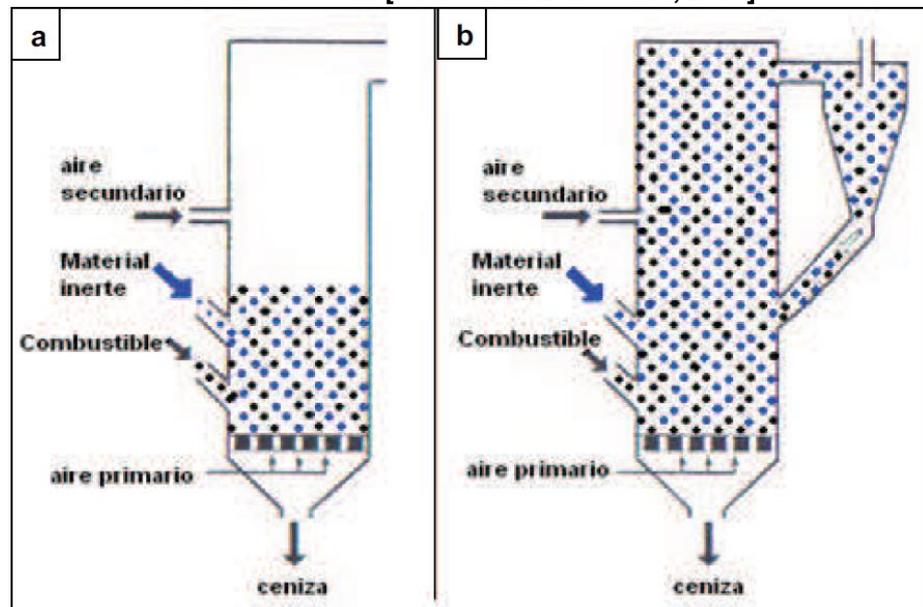
Gracias a las condiciones isotermas a lo largo de la cámara, la generación de gases calientes tiene un bajo contenido de contaminantes y una ceniza rica en sílice de alta potencialidad para otros procesos industriales. Por otro lado, sus desventajas son un

consumo mayor de energía, menor capacidad y un alto costo de inversión.

Dado el grado de velocidad de fluidización estos se pueden dividir en dos tipos de lecho fluidizado que son:

- Lecho fluidizado burbujeante (LFB)
- Lecho fluidizado con recirculación (LFR)

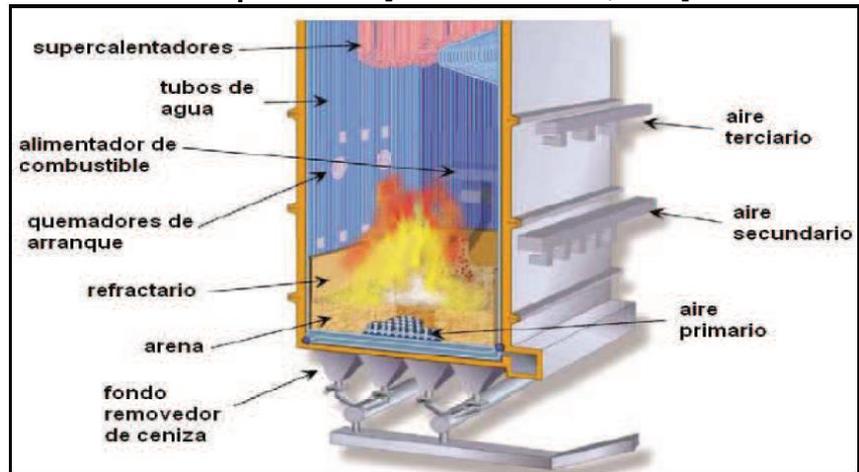
**Figura 1.7 a) Lecho fluidizado burbujeante b) Lecho fluidizado con recirculación. [Fuente: M. Echeverria, 2010]**



### 1.5.3.2.1. Lecho Fluidizado Burbujeante

Se caracteriza por su baja velocidad de fluidificación del aire menor a la velocidad de arrastre dando una menor expansión del lecho, permaneciendo la superficie del lecho definida denominando a este tipo de fluidización como “fluidización en fase densa”.

**Figura 1.8 Horno de lecho fluidizado burbujeante y sus componentes. [Fuente: Toscano, 2009]**



#### **1.5.3.2.2. Lecho Fluidizado Circulante**

Se caracteriza por su elevada velocidad de fluidificación del aire donde mantiene la arena y el combustible flotando en el horno, debido a este efecto disminuye el rozamiento entre partículas y la acumulación de depósitos.

#### **1.5.4. Análisis de los tipos de tecnologías de horno de combustión**

Al realizar la comparación entre la tecnología de lecho fijo de tipo parrilla y la tecnología de lecho fluidizado se establece las siguientes ventajas y desventajas:

**Tabla 1.5 Ventajas y desventajas de la tecnología de parrilla y tecnología de lecho fluidizado. [Fuente: (SJAAK VAN LOO, 2008)]**

	Tecnología de Parrilla	Tecnología de Lecho Fluidizado
Ventaja	Bajo costo de inversión	Sin partes móviles en la cámara de combustión
	Bajo costos operativos	Fácil uso de aditivos
	Baja carga de polvo en los gases de combustión	Debido a la alta turbulencia se tiene una alta capacidad de transferencia de calor
	Menos sensible a la escoria que los hornos de lecho fluidizado	Flexible en cuanto al porcentaje de humedad y tipo de biomasa usado
Desventaja	Condiciones de combustión no tan homogéneas como en los hornos de lecho fluidizado	Altos costos de inversión, que puede ser atractivo para plantas mayor a 30MW
	La reducción eficiente de $NO_x$ requiere tecnologías especiales	Altos costos operativos
	Alto exceso de oxígeno (5-8%) disminuye la eficiencia	Baja aceptación de tamaño de partícula <40 mm
	Normalmente no es posible mezclar combustibles de madera y combustibles herbáceos	Alta carga de polvo en los gases de combustión

# CAPÍTULO 2

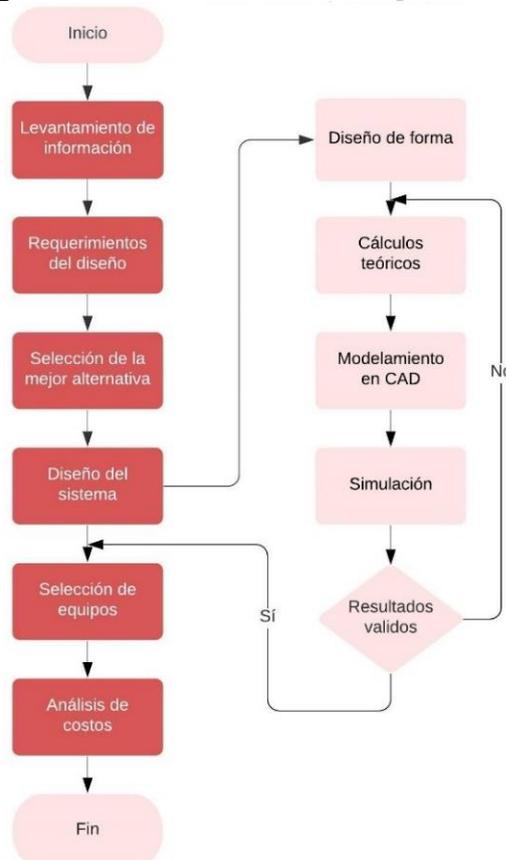
## 2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentó la formulación proyecto, describiendo el proceso de diseño que deberá aplicarse para resolver los problemas en el horno previamente mencionados; a su vez se utilizó la matriz de decisión para establecer los diversos requerimientos y parámetros que deberá cumplir seleccionando la mejor alternativa de diseño de horno. Posteriormente, se mencionó la normativa a usar para la fabricación de hornos quemadores de combustible cumpliendo con los principios técnicos fabricación y materiales sugeridos.

### 2.1. Proceso de diseño

A continuación, se describió el proceso iterativo para la realización del proyecto tomando en cuenta los requerimientos y limitaciones por el beneficiario.

Figura 2.1 Proceso de diseño. [Fuente: Autores]



## **2.2. Requerimientos del beneficiario**

Se evidencio que la empresa Soinso S.A posee un horno de CA para el secado de arroz que presenta deficiencias en el proceso de combustión desperdiciando un 20% del combustible biomásico a tal punto que no permitió alcanzar temperaturas óptimas en la cámara de secado produciéndose un exceso de ceniza y material particulado al ambiente, además de que presento contraflujo de los gases de combustión que hace que regrese al depósito de suministro pudiendo haber un riesgo de incendio. Para resolver estos problemas mencionados, se realizó un estudio de los diferentes parámetros de diseño con el objetivo de eliminar estas deficiencias cumpliendo con los requerimientos del beneficiario y por consiguiente aumentando la producción del equipo.

### **2.2.1. Parámetros de diseño**

Para la optimización del horno, fue necesario tomar en cuenta los parámetros de funcionamiento, así como los requerimientos para un mejor aprovechamiento de la biomasa con la cual se va a trabajar. Los factores que más afectaron al diseño se enlistaron a continuación:

### **2.2.2. Tipo de biomasa**

Es la biomasa que se utilizó en el proceso de combustión y para la cual se diseñó el horno, se tomó en cuenta su forma, composición química, poder calorífico, temperatura de combustión y degradabilidad en el medio ambiente, además, también se consideró el producto final de la combustión que es la composición de la ceniza.

### **2.2.3. Condiciones de operación**

Son los requerimientos para el correcto funcionamiento del equipo, se tomaron en cuenta las dimensiones del alimentador, cámara de combustión, temperatura exterior, humedad, radiación, temperatura de operación, entre otros.

### **2.2.4. Eficiencia energética**

Relación entre el calor generado por el quemador y el poder calorífico del

combustible de forma que se obtuvo la cantidad porcentual que el horno aprovecha la energía química de la cascarilla de arroz para convertirla en calor útil. La descomposición fisicoquímica de la cascarilla se produce en tres etapas que son: desecación, pirolisis, y combustión. La fase final de la combustión se produce a temperaturas superiores a 500 °C.

#### **2.2.5. Control de temperatura**

Para un mejor aprovechamiento del poder calorífico, fue necesario que se realice un control de la temperatura dentro de la cámara de combustión, para controlar el punto de incineración completa de la cascarilla de arroz en toda la superficie de la parrilla.

#### **2.2.6. Materiales**

Los materiales que se escogió para el diseño y sus mejoras cumplieron con la normativa respectiva; además, deberán asegurar un funcionamiento correcto y seguro bajo los parámetros y condiciones que se establezcan.

#### **2.2.7. Accesibilidad de mercado**

Se verifico que los componentes diseñados, así como el material con el cual será fabricado el equipo se puedan adquirir en el mercado local.

#### **2.2.8. Facilidad de uso**

Se consideró que los encargados del equipo no poseen conocimientos técnicos del funcionamiento, por lo cual la facilidad de operación es un punto importante en el diseño.

#### **2.2.9. Mantenimiento**

Al tratarse de un equipo diseñado para operar en una zona agroindustrial, estará sometido a condiciones climáticas extremas, por lo que fue necesario que se estudien alternativas que faciliten la planificación de mantenimientos preventivos.

### **2.2.10. Seguridad**

Se garantizo la seguridad de los operadores, así como las condiciones de trabajo en el cual el equipo será operado. Por esto fue necesario una especial consideración a los materiales de trabajo, así como los procesos a los cuales estos van a ser sometidos para la fabricación del equipo.

### **2.2.11. Costo**

Ya que se está trabajando en un rediseño, se optimizo los recursos usando las partes que está construido el horno, debido a que se cuenta con un presupuesto limitado.

### **2.2.12. Extracción de la ceniza**

Es esencial que la ceniza, producto del proceso de combustión se retirara de la parrilla evitando la obstrucción del ingreso de cascarilla de arroz y de que fluya junto a los gases de combustión hacia el intercambiador.

## **2.3. Selección de la mejor alternativa**

De acuerdo con los parámetros de diseño y los tipos de hornos mencionados en la sección 2.3 y 1.5.6 respectivamente, se escogió la mejor alternativa para el rediseño del horno de biomasa. El método para realizar la selección consistió en una matriz de decisión donde se estableció un rango entre 1 y 10 para darle valor a cada parámetro de diseño, otorgándole un porcentaje a los requerimientos más importantes, de forma que se obtuvo la alternativa más viable.

### **2.3.1. Matriz de decisión**

Asignado el valor en porcentaje de cada parámetro, se generó la matriz de decisión para escoger la mejor alternativa de horno.

**Tabla 2.1 Matriz de decisión para la selección del horno.**  
**[Fuente: Autores]**

Parámetros	Peso	Tipo de Horno	
		Lecho Fluidizado	Tipo Parrilla
Seguridad	10%	8	8
Tipo de biomasa	5%	10	9
Costo	15%	5	10
Mantenimiento	10%	7	8
Facilidad de uso	5%	8	7
Control de temperatura	20%	9	8
Extracción de ceniza	15%	6	7
Eficiencia energética	15%	7	9
Conservación del medio ambiente	5%	7	8
Total	100%	7.25	8.3

Se concluyo que el horno de tipo parrilla es la opción más viable debido a que se tuvo rango de potencias relativamente bajos para el empleo del lecho fluidizado. Además, en la combustión de la cascarilla de arroz se produce alto contenido de ceniza por lo tanto se consideró que la parrilla debe ser inclinada para un mejor control de la zona de alimentación, combustión y depósito de ceniza.

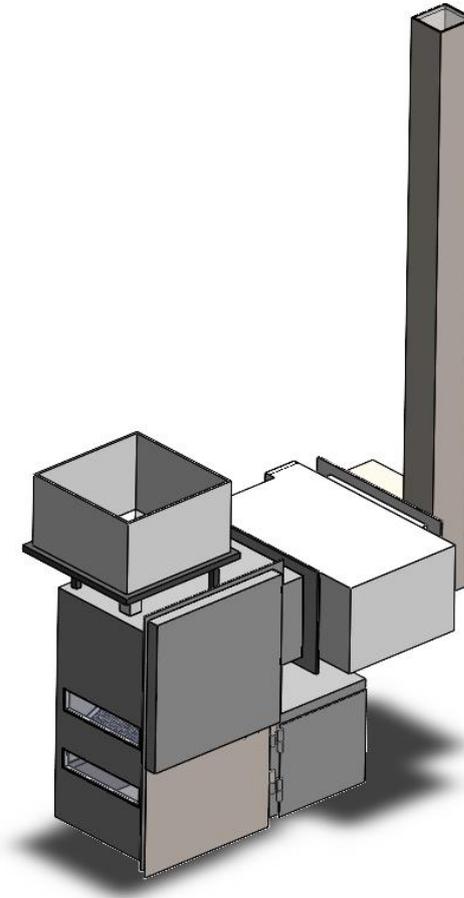
#### **2.4. Normativa**

La elaboración del diseño del horno se basó en el estándar API 560 donde se establece los requisitos y recomendaciones mínimos para la fabricación de un horno quemador de combustible.

#### **2.5. Diseño de forma**

Se presentó el diseño de forma del horno que se encontró en las instalaciones, cabe mencionar que a pesar de que se ilustra el intercambiador de calor, este no formo parte del alcance del proyecto y solo se ilustra para fines demostrativos.

**Figura 2.2 Diseño de forma del horno de biomasa e intercambiador.**  
[Fuente: Autores]



## **2.6. Combustión de la cascarilla de arroz**

### **2.6.1. Fórmula para el combustible**

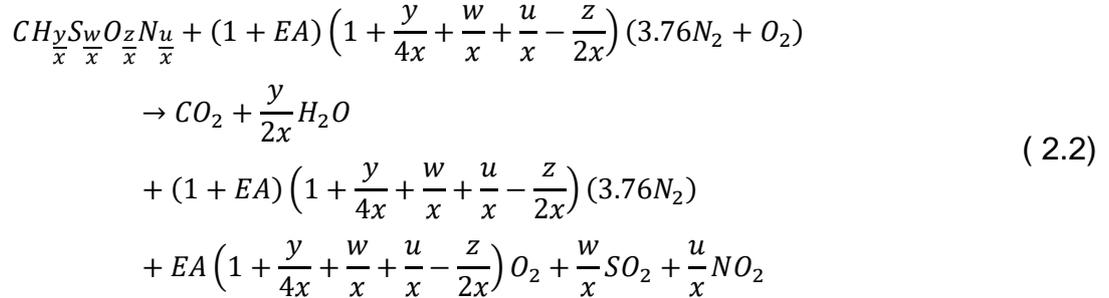
Normalmente, los combustibles fósiles poseen un alto contenido en Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, además de otros elementos en menores proporciones. La fórmula general para los combustibles fósiles se expresó de la siguiente manera:



Las relaciones  $y/x$ ,  $w/x$ ,  $z/x$  y  $u/x$ , representaron la relación de átomos de Hidrógeno, Azufre, Oxígeno y Nitrógeno por cada átomo de Carbono respectivamente.

### 2.6.2. Ecuación general de combustión

La ecuación de combustión se planteó de manera general:



De lado izquierdo, se encuentran la fórmula del combustible y el aire, con un exceso de este último, y en lado derecho, se encuentran los productos de la combustión. (Delgado & Barriga, 2009) (Arévalo & Ávila, 2018)

### 2.6.3. Subíndices de la fórmula química

Se determino a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{y}{x} = \frac{M_c * m_H}{M_H * m_c} \tag{2.3}$$

Donde M represento la masa de los elementos y m su porcentaje presente en el compuesto. (Delgado & Barriga, 2009) (Arévalo & Ávila, 2018). Para los demás elementos se calcularon de la misma manera los subíndices.

### 2.6.4. Relación teórica aire-combustible

Condición indispensable en todo proceso de combustión, se expresó como la cantidad de aire ( $m_{aire}$ ) por cantidad de combustible ( $m_{combustible}$ ). Se calculo mediante la siguiente ecuación:

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right),t} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \tag{2.4}$$

La masa, se determinó a partir del número de moles ( $n$ ) y la masa molar ( $M$ ), con la ecuación:

$$m = n * M \tag{2.5}$$

### 2.6.5. Relación real aire-combustible

Para la determinación del valor de la relación aire-combustible real, fue necesario tomar en cuenta el exceso de aire necesario y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right)r} = m_{\left(\frac{a}{f}\right)t} * (1 + EA) \quad (2.6)$$

Donde  $EA$  representa el exceso de aire y tiene un valor del 20%.

### 2.7. Flujo de cascarilla de arroz para combustión continua

Para mantener una combustión continua se necesitó calcular el flujo de la cascarilla de arroz, gracias a los datos obtenidos de la simulación se obtuvo el flujo de aire y con la relación real de aire-combustible se pudo calcular a partir de la expresión:

$$\dot{m}_{CA} = \dot{m}_{aire} * m_{\left(\frac{a}{f}\right)real} \quad (2.7)$$

### 2.8. Flujo de gases de combustión

Se requirió establecer un balance de masa con el flujo masico del aire, el flujo masico de los gases de combustión y el flujo masico de las cenizas que se produjeron como resultado del proceso de combustión. De acuerdo expresado la ecuación es de la siguiente forma:

$$\sum \dot{m}_{entrada} = \sum \dot{m}_{salida}$$
$$\dot{m}_{CA} + \dot{m}_{aire-blower1} + \dot{m}_{aire-blower2} = \dot{m}_{combustion} + \dot{m}_{cenizas} \quad (2.8)$$

### 2.9. Calor total de la combustión

Relaciona la cantidad de flujo de masa de la cascarilla de arroz que ingresa a la cámara y su correspondiente poder calorífico, se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{CA} = \dot{m}_{CA} * P_c \quad (2.9)$$

Donde:

$$P_c = \text{Poder calorífico de la CA} \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$$

## 2.10. Consideración de pérdidas de calor

Debido a que la cámara de combustión no es un espacio totalmente cerrado y aislado, se consideró las pérdidas de transferencia de energía térmica en el sistema compuesto por conducción, convección y radiación. Es decir, para la pared compuesta hubo pérdidas de calor por convección que llegó del gas caliente a la superficie interna de la pared y del aire que llegó a la superficie externa de la pared; resistencia por conducción del material compuesto; resistencia por radiación interna de la CA. A continuación, se definen la teoría que relaciono la transmisión de calor antes mencionada:

### 2.10.1. Resistencia térmica por conducción:

Se define como la transferencia de energía que tienen las partículas más energéticas hacia otras menos energéticas debido a las interacciones entre las mismas:

$$h_k = \frac{k}{e} \quad (2.10)$$

Donde:

$k$  = coeficiente de transferencia de calor por conducción  $\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$

$e$  = espesor del material  $[m]$

### 2.10.2. Resistencia térmica por convección en el interior del horno:

Es la combinación de la transferencia debido al movimiento molecular aleatorio (conducción) que sucede en la superficie sólida y el movimiento del fluido a nivel macroscópico cuando estos tienen diferentes temperaturas. El modelo que relaciona la transferencia de calor por convección se la conoce como la Ley de enfriamiento de Newton.

Se asumió que no hay velocidad forzada, es decir, convección libre donde el fluido se desplaza debido a un gradiente de temperaturas y no por la acción de un agente externo, además se asume que la placa fue homogénea e inclinada, que estuvo a una temperatura mayor en la superficie superior que la del fluido.

Se inicio calculando Rayleigh con la siguiente ecuación:

$$Ra_L = \frac{g(\cos\theta)\beta(T_{parr} - T_{pint})L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.11)$$

Donde:

$g$ = gravedad  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$T_{parr}$ = temperatura de la parrilla [K]

$T_{pint}$  = temperatura pared interna [K]

$\nu$ = viscosidad cinemática  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

$L$ = Longitud de la placa [m]

$\alpha$ = difusividad térmica  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

$\theta$ = angulo de inclinación de la parrilla [°]

Luego se calcula el número Nusselt, con la correlación de Churchill y Chu:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \right\}^2 \quad Ra_L < 10^9 \quad (2.12)$$

Finalmente, el coeficiente  $h$  para un fluido que fluye de forma laminar o turbulento de la forma es:

$$h = \frac{Nu * k}{D} \quad (2.13)$$

Donde:

$Nu$ = Numero de Nusselt

$k$ = Conductividad térmica  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$D$ = Diámetro [m]

### 2.10.3. Resistencia térmica por convección en el exterior del horno

Se asumió a las paredes del horno como placas verticales isotérmicas donde el fenómeno de transferencia de calor es por convección libre, es decir, la velocidad del fluido es nula o está en reposo. Las ecuaciones que gobiernan al sistema se presentan en el punto 2.11.2., siguiendo el mismo patrón, con la diferencia de que se realizó el análisis con la temperatura ambiente y la temperatura de la pared externa.

### 2.10.4. Resistencia térmica por radiación:

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de onda electromagnética y se atribuye a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos. El coeficiente de transferencia de radiación se lo expresa como:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_{parr}^2 + T_{pint}^2)(T_{parr} - T_{pint}) \quad (2.15)$$

Donde:

$\varepsilon$ = emisividad

$\sigma$ = constante de Stefan Boltzmann  $\left[\frac{W}{m^2K^4}\right]$

$T_{pint}$  = Temperatura interna de la pared [K]

$T_{parr}$  = Temperatura de la parrilla [K]

### 2.11. Perdidas de calor en la cámara de combustión

Se determino la ecuación del coeficiente global de transferencia de calor considerando el material compuesto de las paredes, la radiación que emite la fuente de calor (cascarilla de arroz) y las condiciones externas del equipo, por medio de la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{i-h} + h_{i-ir}} + \frac{e_a}{k_a} + \frac{e_{fv}}{k_{fv}} + \frac{1}{h_{o-h}}} \quad (2.16)$$

Donde:

$h_{i-h}$  = coeficiente de convección en el interior del horno  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$h_{i-ir}$  = coeficiente de radiación en el interior del horno  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$e_a$ = espesor del acero [m]

$k_a$ = conductividad térmica del acero  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

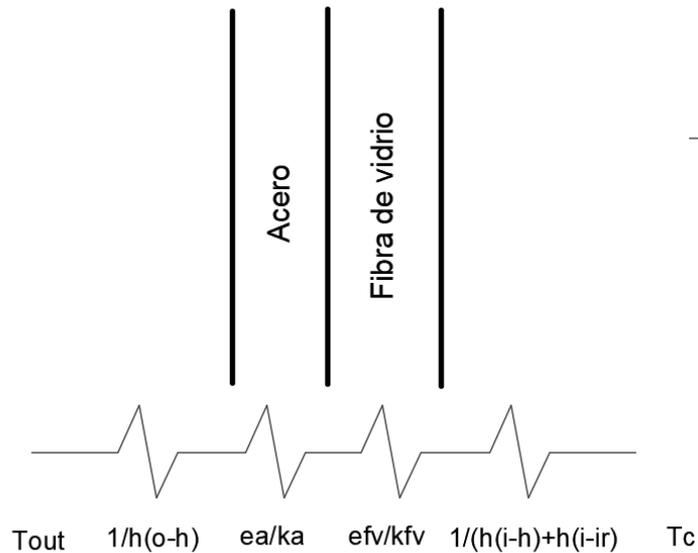
$e_{fv}$ = espesor de la fibra de vidrio [m]

$k_{fv}$ = conductividad térmica de la fibra de vidrio  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$h_{o-h}$ = coeficiente de convección exterior del horno  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

Se ilustra la composición de las paredes del horno de la cámara de combustión

**Figura 2.3 Composición de las paredes de la cámara de combustión.**  
[Fuente: Autores]



El calor de combustión se lo expresa como:

$$Q_c = U * A * (T_{parr} - T_{out}) \quad (2.17)$$

Donde:

$U$ = coeficiente global de transferencia de calor  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$A$ = Área total de las paredes del horno [ $m^2$ ]

$T_{parr}$ = temperatura de la parrilla [K]

$T_{out}$ = Temperatura ambiente [K]

## 2.12. Calor almacenado en las paredes del horno

Se considero a la pared del horno como un material compuesto, por lo tanto, se calculó el calor almacenado en el acero y aislante por separado. Durante el proceso de transferencia de calor, una fracción queda almacenada en las paredes del horno y en el aislante, aumentando la temperatura interna, dicha cantidad se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{ac} = m_{ac}c_{pac} (T_{p_{int}} - T_{m_p}) \quad (2.18)$$

Donde:

$m_{ac}$  = masa total del acero [Kg]

$c_{pac}$  = calor especifico del acero  $\left[\frac{J}{Kg K}\right]$

$T_{p_{int}}$  = Temperatura en la pared interna [K]

$T_{m_p}$  = Temperatura media de la pared [K]

$T_{p_{out}}$  = Temperatura en la pared externa [K]

La temperatura media de la pared se lo calcula de la siguiente forma:

$$T_{m_p} = \frac{T_{p_{int}} + T_{p_{out}}}{2} \quad (2.19)$$

Se siguió el mismo procedimiento para el cálculo de calor almacenado en las paredes del aislante

## 2.13. Calor cedido a las cenizas

Durante el proceso de combustión una fracción del calor es usada para la descomposición de la cascarilla en ceniza, asumiendo que se transforma el 14% del valor total de la masa de la cascarilla de arroz en ceniza, el valor se lo determino con la siguiente expresión:

$$Q_{cz} = m_{cz}c_{pcz}(T_{cz} - T_{out}) \quad (2.20)$$

Donde:

$m_{cz}$  = Masa de la ceniza [Kg]

$c_{pcz}$  = Calor especifico de la ceniza  $\left[\frac{J}{Kg K}\right]$

$T_{cz}$  = Temperatura de la ceniza [K]

$T_{out}$  = Temperatura ambiente [K]

# CAPÍTULO 3

En el presente capítulo se describieron los resultados teóricos siguiendo el análisis de la metodología propuesta en el capítulo 2. Además, se desarrolló las respectivas modificaciones al equipo considerando las dimensiones, temperatura de operación, circulación del flujo de aire, transferencia de calor, entre otros parámetros importantes por medio del análisis del comportamiento fluido dinámico usando un programa computacional de simulaciones a través de la dinámica de fluidos computacional (CFDs), se obtuvo los resultados experimentales para la validación del programa y comparación con los resultados teóricos. Posteriormente se realizó un análisis de costos de las modificaciones y componentes del sistema junto al costo de mano de obra.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1. Resultados teóricos del horno

Se obtuvo los siguientes resultados teóricos para los flujos de entrada y salida del equipo:

**Tabla 3.1 Resultados teóricos de los flujos masicos obtenido para la combustión completa de la CA. [Fuente: Autores]**

Ecuación	Nomenclatura	Simbología	Unidad	Resultado
3.6	Relación real aire-combustible	$m_{\left(\frac{a}{f}\right)r}$	adimensional	13.83
-	Flujo de entrada de aire	$\dot{m}_{aire-blower1}$	$\frac{kg}{h}$	138.13
		$\dot{m}_{aire-blower2}$	$\frac{kg}{h}$	59.19
		$\dot{m}_{aire-blower3}$	$\frac{kg}{h}$	138.13
3.7	Flujo de cascarilla hacia la cámara	$\dot{m}_{CA}$	$\frac{kg}{h}$	15.18
2.8	Flujo masico de gases de combustión	$\dot{m}_{combustion}$	$\frac{kg}{h}$	209.80

En la tabla 3.1 se tiene los flujos masicos de entrada y salida correspondiente para una combustión completa de la cascarilla de arroz, usando la ecuación

general para la combustión de la CA (ecuación 2.2) y la tabla 1.3 de la composición química de las muestras de cascarilla de arroz obtenidas en la provincia de los Ríos y Guayas, se obtuvo la relación estequiométrica del proceso de combustión para luego obtener la relación de masa del aire y del combustible teórico y práctico considerando un exceso de 20% de aire.

Por medio de la simulación se obtuvo como dato de entrada el flujo masico del aire iterando hasta obtener una temperatura de salida promedio entre 50 y 60 grados en la salida del intercambiador. Como resultado tenemos que el flujo de aire en el blower ubicado en la parte inferior de la parrilla es de  $138.13 \left[ \frac{kg}{h} \right] = 70 [cfm]$  y para la parte superior de la parrilla fue de  $59.19 \left[ \frac{kg}{h} \right] = 30 [cfm]$ , con estos datos se procedió a calcular los flujos masicos de la cascarilla y de los gases de combustión.

A continuación, se presentaron los resultados del análisis de calor en la cámara de combustión:

**Tabla 3.2 Perdidas de calor en el equipo. [Fuente: Autores]**

Ecuación	Nomenclatura	Simbología	Unidad	Resultado
2.9	Calor de combustión	$Q_{CA}$	[kW]	74.39
2.17	Calor perdido en la cámara de combustión	$Q_c$	[kW]	1.46
2.18	Calor almacenado en las paredes	$Q_{ac}$	[kW]	2.64
2.18	Calor almacenado en el aislante	$Q_{ais}$	[kW]	5.29
2.20	Calor cedido a las cenizas	$Q_{cz}$	[kW]	0.015
Calor total perdido del sistema		$Q_t$	[kW]	9.41

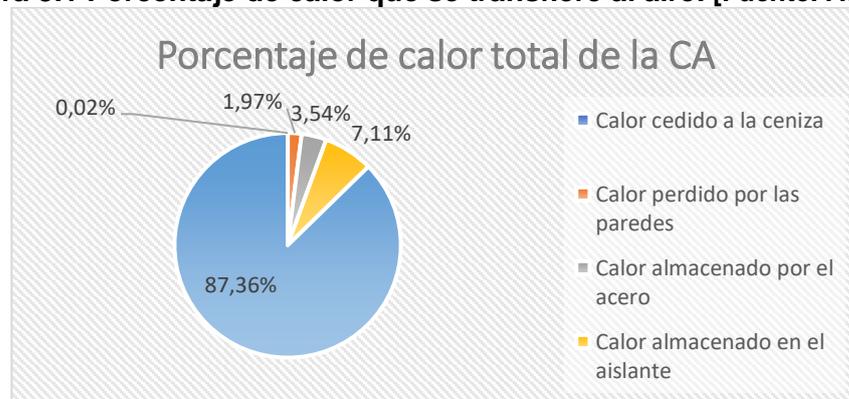
Se calculo el calor total de combustión de la cascarilla de arroz considerando el porcentaje de humedad contenida en el mismo, que para este caso fue de 10.33 % (tabla 1.3), como se observa la cantidad de calor que se puede extraer para el flujo de cascarilla establecido fue de 74.39 [kW].

Para el cálculo de calor perdido en la cámara de combustión, se consideró el coeficiente de conducción, radiación y convección del horno asumiendo a la parrilla como una placa homogénea, isotérmica y con una inclinación de 70 grados con respecto al “eje Y”. Además, se asumió convección libre para la superficie interior y exterior del horno; para el cálculo del coeficiente de radiación se consideró a la parrilla como una fuente de calor con una emisividad de 0.8. El resultado fue de 1.46 [kW].

Para el cálculo del calor almacenado en las paredes de acero y del aislante se determinó la temperatura promedio entre el exterior e interior del horno, los datos de masa del acero y masa del aislante, así como también los calores específicos se lo determino por medio de la simulación obteniendo los resultados de 2.64 [kW] de calor almacenado en la pared de acero y de 5.29 [kW] de calor almacenado en el aislante. Para el cálculo de calor cedido a la ceniza se consideró el 14% de la masa total de cascarilla de arroz que se descompone en ceniza, su resultado fue 0.015 [kW] siendo un valor muy pequeño con relación a los demás resultados obtenidos pudiendo despreciarse sin afectar los resultados.

Finalmente se obtuvo el calor total de combustión que se transfiere al flujo de aire considerando las pérdidas del sistema, dicho valor fue de 64.98[kW].

**Figura 3.1 Porcentaje de calor que se transfiere al aire. [Fuente: Autores]**



En la figura 3.1 se observa en porcentajes, el calor total que se dispone de la cascarilla de arroz, obteniendo un valor del 87.36% que se utilizara para

aumentar la temperatura de los gases de combustión. Además, se muestra el calor absorbido por las paredes compuestas conformada por el acero y la fibra de vidrio obteniendo un valor de 3.54% y 7.11% respectivamente, también el calor que se pierde por conducción, radiación y convección obteniendo un valor del 1.97% y el porcentaje de calor cedido a la ceniza de 0.02%.

**Tabla 3.3 Perdida de presión a lo largo de la chimenea. [Fuente: Autores]**

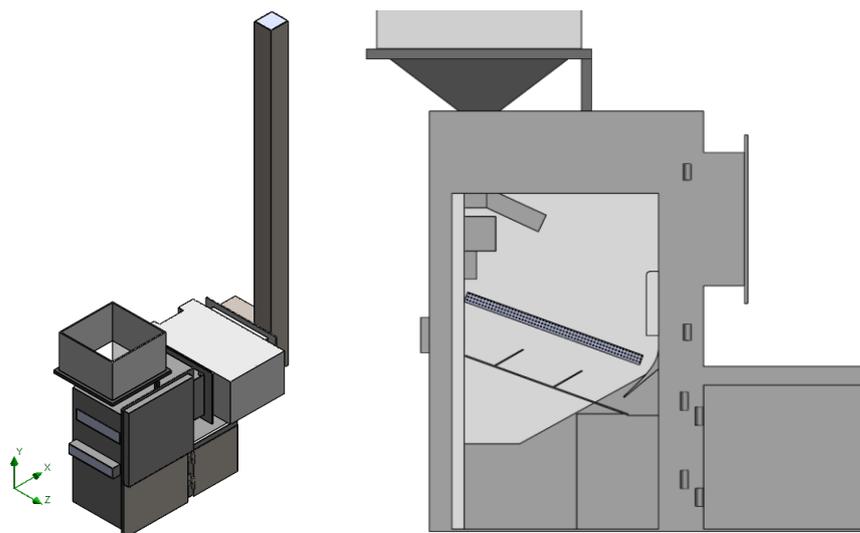
Nomenclatura	Simbología	Unidad	Resultado
Perdida de presión a lo largo de la chimenea	$\Delta P_f$	[Pa]	11.33

Como se observa en la tabla 3.3 la perdida de presión a lo largo de la chimenea es 11.33[Pa], debido a que se añadió un ventilador de aire centrifugo formando una chimenea de tiro inducido.

### 3.2. Simulación CFD

#### 3.2.1. Modelamiento dinámico del flujo en el horno, fundamentos teóricos del análisis CFD

**Figura 3.1 Geometría exterior e interior del modelo de la cámara de combustión. [Fuente: Autores]**



Se observa en la figura 3.1 la nueva geometría de los baffles en el interior de la cámara de combustión que se encargaron de redirigir el flujo de

manera más eficiente a la entrada del intercambiador de calor. También se muestra la nueva orientación de la parrilla, la cual se planteó para mejorar la combustión, ya que permitió que una mayor cantidad de aire atravesara por esta.

Los materiales que se usó para las paredes, techo y la base de la estructura del horno fueron de acero ASTM A36 de 6 mm de espesor, recubiertas con 100 mm de aislante de fibra de vidrio para evitar pérdidas térmicas. Además, el material que se usó para las compuertas fue acero ASTM A36 de 3 mm de espesor con la diferencia de que en la compuerta principal tendrá una capa de 100 mm de espesor de aislante de fibra de vidrio.

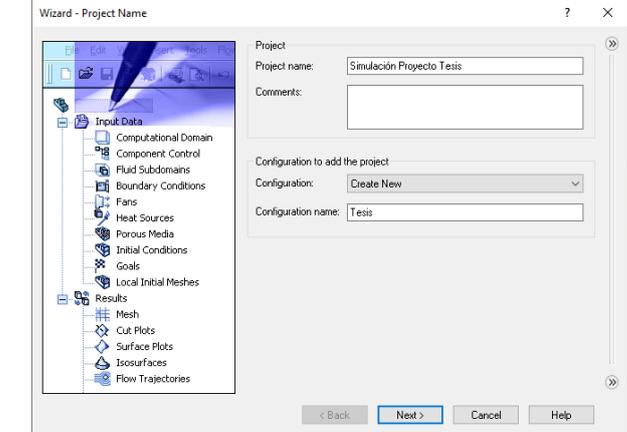
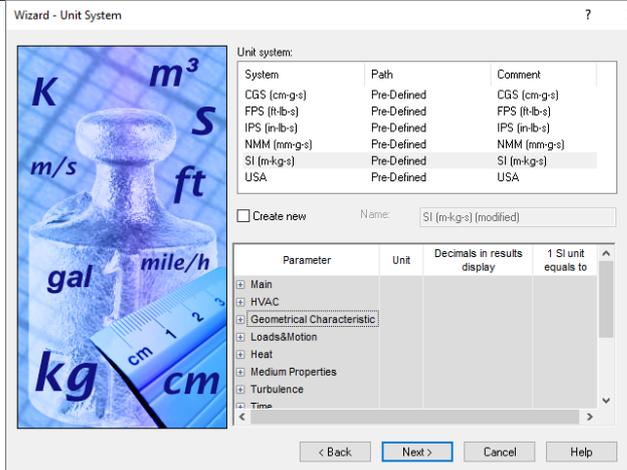
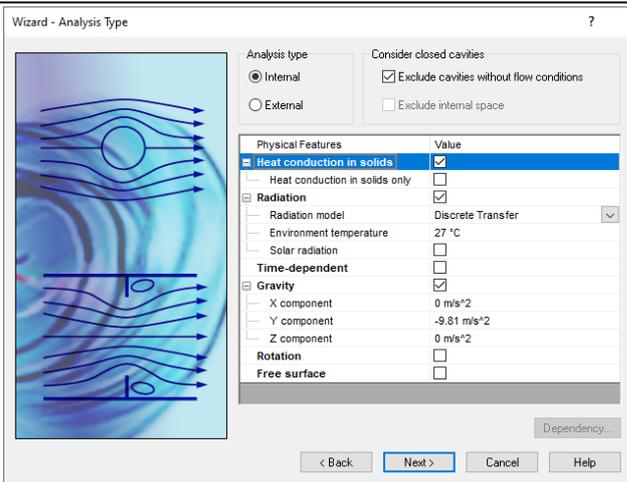
Las piezas que conformaron al sistema fueron diseñadas por separado y unidas en un solo ensamble para luego usar la herramienta “Flow Simulation” de SolidWorks, el cual trabaja con fluidodinámica computacional o CFD por sus siglas en inglés que, por medio de iteraciones simuladas, permitió validar el diseño sin la necesidad de la construcción del prototipo. Esta herramienta fue de gran utilidad, pues redujo los gastos que representaría la construcción de un prototipo, así como también disminuyó el tiempo en el que se obtienen los resultados.

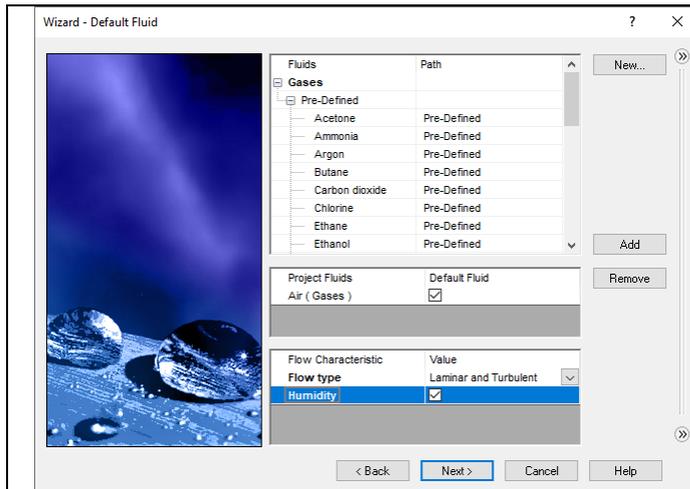
Con la simulación se obtuvieron resultados que representaron el comportamiento que tendrá el flujo de aire y los gases de combustión dentro del equipo, la temperatura que alcanza las paredes y partes del equipo, la velocidad del fluido, entre otros. Los valores que se obtuvieron fueron comparados con los resultados obtenidos teóricamente para validar el diseño.

### **3.2.2. Preparación de la simulación y factores a considerar**

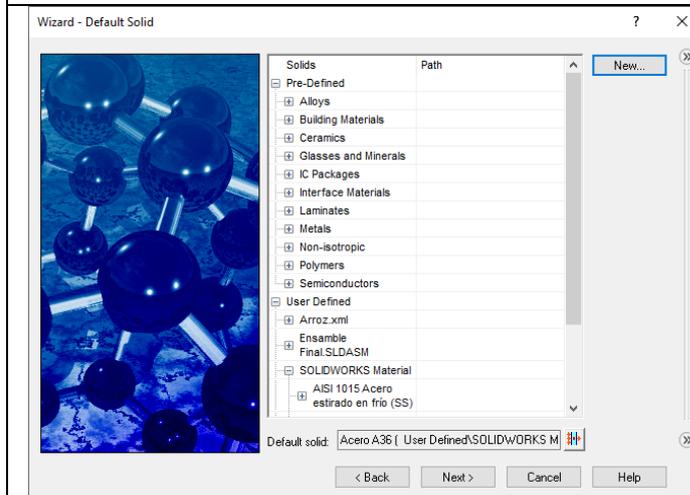
Las condiciones iniciales de la simulación se establecieron en el Wizard de Flow Simulation, como se muestra a continuación:

**Tabla 3.4 Condiciones iniciales de la simulación en el “Wizard de Flow Simulation”. [Fuente: Autores]**

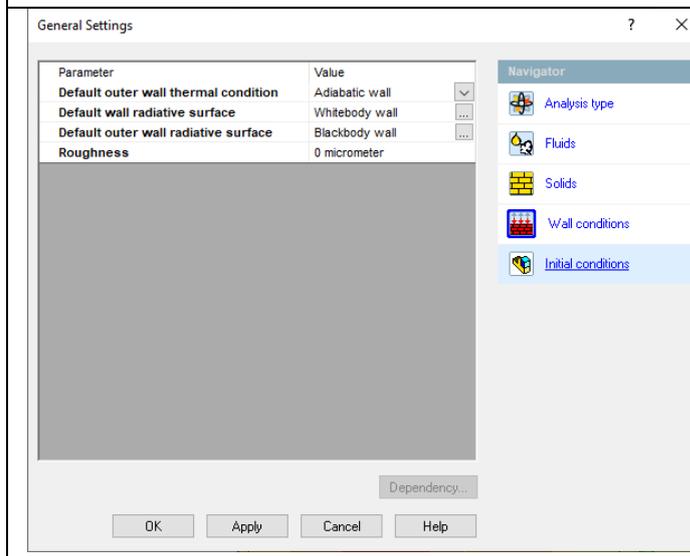
Ventana	Descripción																												
	<p>Inicio de la ventana del wizard de Flow Simulation.</p>																												
 <table border="1" data-bbox="683 891 1066 1025"> <thead> <tr> <th>System</th> <th>Path</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CGS (cm·g·s)</td> <td>Pre-Defined</td> <td>CGS (cm·g·s)</td> </tr> <tr> <td>FPS (ft·lb·s)</td> <td>Pre-Defined</td> <td>FPS (ft·lb·s)</td> </tr> <tr> <td>IPS (in·lb·s)</td> <td>Pre-Defined</td> <td>IPS (in·lb·s)</td> </tr> <tr> <td>NMM (mm·g·s)</td> <td>Pre-Defined</td> <td>NMM (mm·g·s)</td> </tr> <tr> <td>SI (m·kg·s)</td> <td>Pre-Defined</td> <td>SI (m·kg·s)</td> </tr> <tr> <td>USA</td> <td>Pre-Defined</td> <td>USA</td> </tr> </tbody> </table>	System	Path	Comment	CGS (cm·g·s)	Pre-Defined	CGS (cm·g·s)	FPS (ft·lb·s)	Pre-Defined	FPS (ft·lb·s)	IPS (in·lb·s)	Pre-Defined	IPS (in·lb·s)	NMM (mm·g·s)	Pre-Defined	NMM (mm·g·s)	SI (m·kg·s)	Pre-Defined	SI (m·kg·s)	USA	Pre-Defined	USA	<p>Definición del sistema de unidades. En este caso, las unidades adoptadas fueron las del Sistema Internacional (SI).</p>							
System	Path	Comment																											
CGS (cm·g·s)	Pre-Defined	CGS (cm·g·s)																											
FPS (ft·lb·s)	Pre-Defined	FPS (ft·lb·s)																											
IPS (in·lb·s)	Pre-Defined	IPS (in·lb·s)																											
NMM (mm·g·s)	Pre-Defined	NMM (mm·g·s)																											
SI (m·kg·s)	Pre-Defined	SI (m·kg·s)																											
USA	Pre-Defined	USA																											
 <table border="1" data-bbox="687 1458 1066 1720"> <thead> <tr> <th>Physical Features</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Heat conduction in solids</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Heat conduction in solids only</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Radiation</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>  Radiation model</td> <td>Discrete Transfer</td> </tr> <tr> <td>  Environment temperature</td> <td>27 °C</td> </tr> <tr> <td>  Solar radiation</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Time-dependent</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Gravity</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>  X component</td> <td>0 m/s<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>  Y component</td> <td>-9.81 m/s<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>  Z component</td> <td>0 m/s<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Rotation</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Free surface</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Physical Features	Value	Heat conduction in solids	<input checked="" type="checkbox"/>	Heat conduction in solids only	<input type="checkbox"/>	Radiation	<input checked="" type="checkbox"/>	Radiation model	Discrete Transfer	Environment temperature	27 °C	Solar radiation	<input type="checkbox"/>	Time-dependent	<input type="checkbox"/>	Gravity	<input checked="" type="checkbox"/>	X component	0 m/s <sup>2</sup>	Y component	-9.81 m/s <sup>2</sup>	Z component	0 m/s <sup>2</sup>	Rotation	<input type="checkbox"/>	Free surface	<input type="checkbox"/>	<p>Definición del tipo de análisis. Análisis de flujo interno, excluyendo las cavidades sin condiciones de flujo. Se considero la conducción de calor en sólidos, así como la gravedad.</p>
Physical Features	Value																												
Heat conduction in solids	<input checked="" type="checkbox"/>																												
Heat conduction in solids only	<input type="checkbox"/>																												
Radiation	<input checked="" type="checkbox"/>																												
Radiation model	Discrete Transfer																												
Environment temperature	27 °C																												
Solar radiation	<input type="checkbox"/>																												
Time-dependent	<input type="checkbox"/>																												
Gravity	<input checked="" type="checkbox"/>																												
X component	0 m/s <sup>2</sup>																												
Y component	-9.81 m/s <sup>2</sup>																												
Z component	0 m/s <sup>2</sup>																												
Rotation	<input type="checkbox"/>																												
Free surface	<input type="checkbox"/>																												



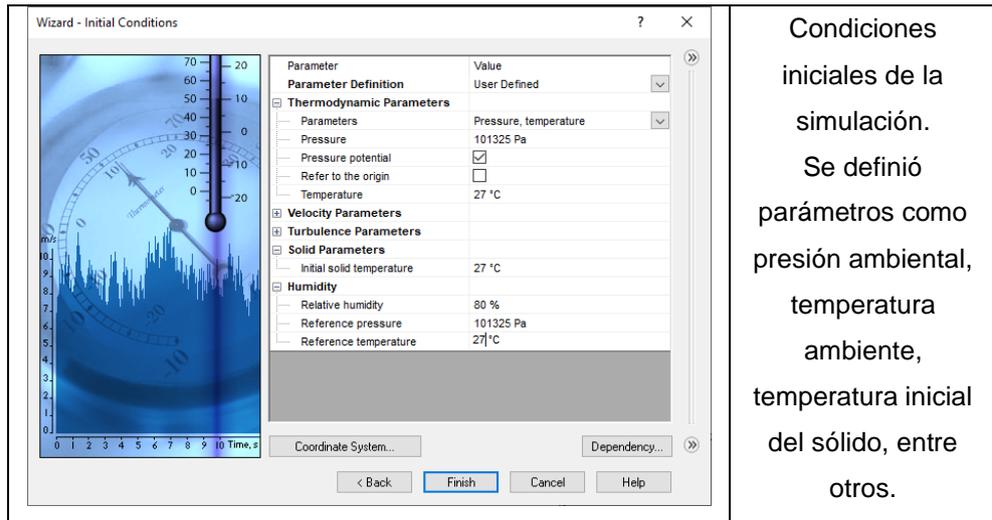
Definición de los fluidos de trabajo. En este caso, se seleccionó aire como fluido de trabajo, flujos laminares y turbulentos y se tomó en cuenta la humedad que contiene.



Determinación de los sólidos del modelo. Se seleccionó Acero AISI A36 para las paredes del horno, Acero AISI 1015 para el banco de tubos y aislante de fibra de vidrio.

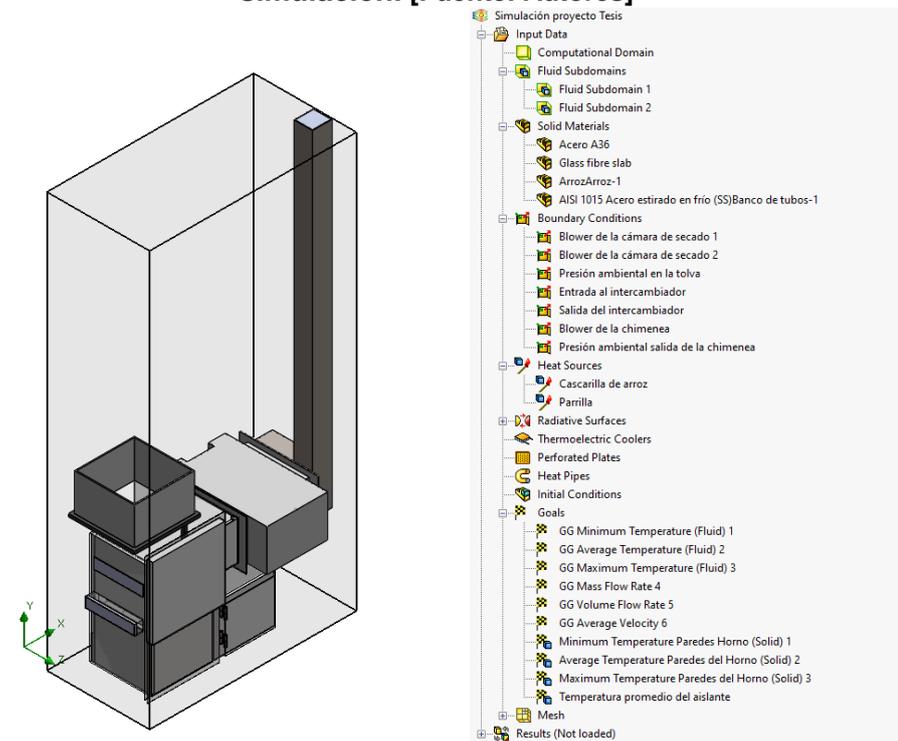


Condiciones de pared. Se definió las condiciones de las paredes del horno, así como la de las paredes del aislante.



Condiciones iniciales de la simulación. Se definió parámetros como presión ambiental, temperatura ambiente, temperatura inicial del sólido, entre otros.

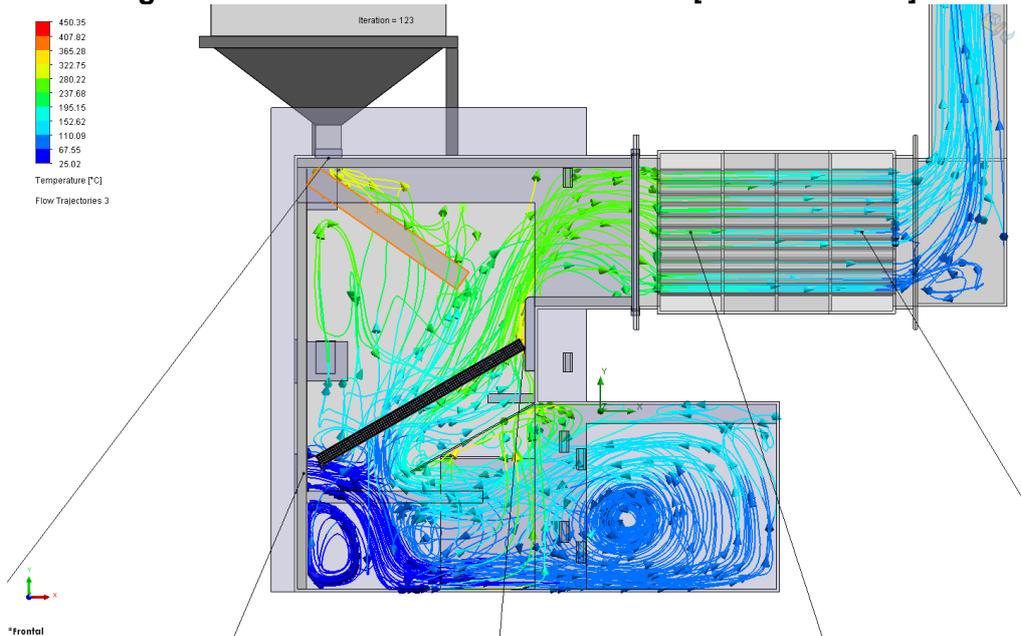
**Figura 3.2 Dominio computacional y condiciones de frontera de la simulación. [Fuente: Autores]**



### 3.2.3. Simulación de cámara de combustión

Para la simulación de la cámara de combustión, se consideró la acción de la gravedad y humedad relativa. En la simulación se puede apreciar la temperatura de salida de los gases de combustión, la temperatura a la que ingresa al intercambiador de calor, así como las temperaturas de las paredes del horno.

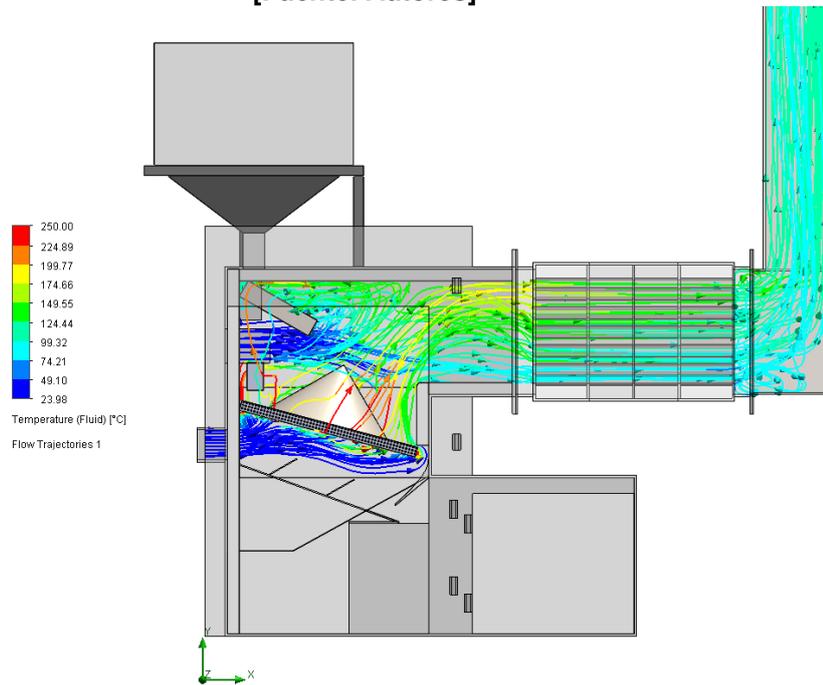
**Figura 3.3 Simulación inicial del sistema. [Fuente: Autores]**



En la figura 3.4 se observaron los resultados de la simulación del sistema inicial, donde existió un exceso de líneas de flujo en la cámara de recolección de ceniza, además de un incorrecto circulamiento de las líneas de flujo en la parte superior de la parrilla, lo que resultaba que el aire caliente se direcciona hacia la tolva y se encienda la cascarilla de arroz.

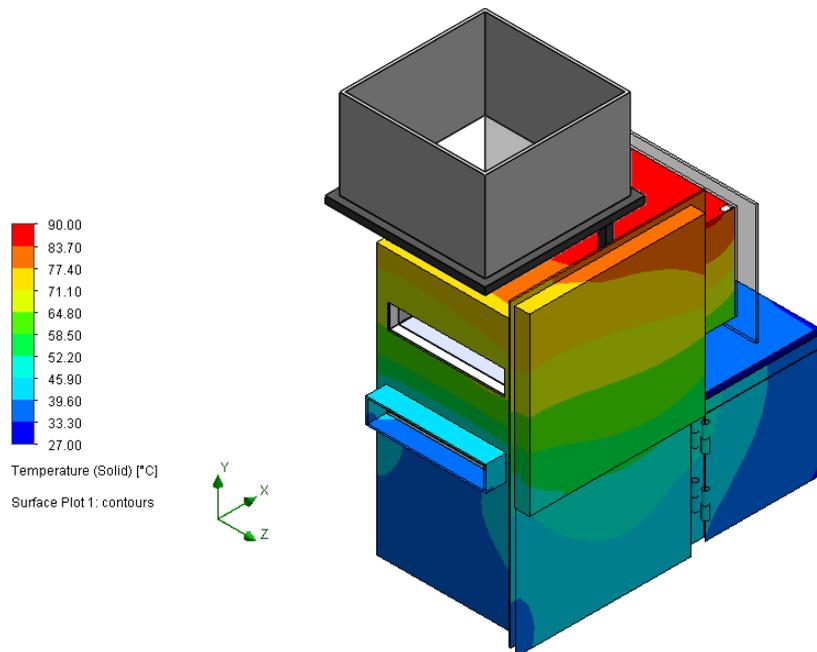
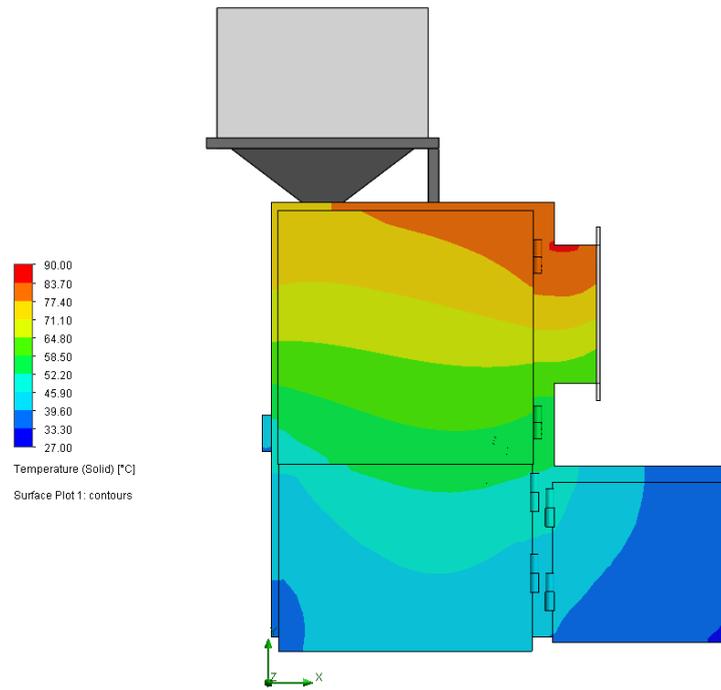
Se siguió un proceso iterativo de prueba y error, modificando la geometría interna de la cámara de combustión con las condiciones iniciales para obtener el mejor resultado posible. Se consideraron alternativas como cambio de la dirección del flujo mediante baffles, diferentes ubicaciones de entradas de aire a la cámara, entre otros.

**Figura 3.4 Líneas de flujo en el interior de la cámara de combustión.**  
[Fuente: Autores]



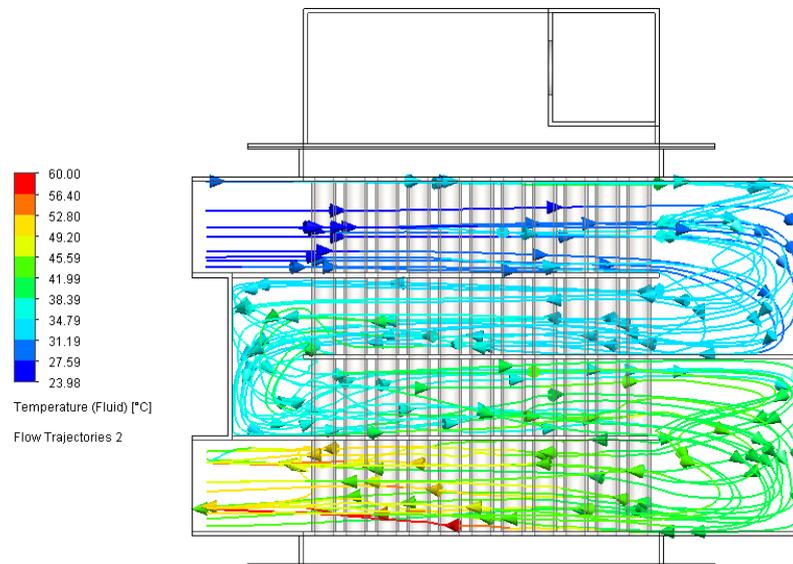
En la figura 3.5 se muestran los resultados de la simulación de la geometría final. Se cambió la orientación de la parrilla, y se incluyeron bafles debajo del orificio donde ingresaba el aire a la cámara de combustión, lo que sirvió para redireccionar el flujo y que este no vaya hacia la cámara de recolección de ceniza.

**Figura 3.5 Perfil de temperatura de las paredes exteriores de la cámara de combustión. [Fuente: Autores]**



La figura 3.6 muestra los perfiles de temperatura de las paredes exteriores de la cámara de combustión, las cuales no sobrepasan los 90 °C. Esto significa que el sistema es seguro para el operador y que el material constituido se encuentra en el rango de operación térmica.

**Figura 3.6 Líneas de flujo en el interior del intercambiador de calor. [Fuente: Autores]**



La figura 3.7 muestra el flujo dentro de la cámara del intercambiador de calor, donde se puede apreciar que la temperatura a la salida es de 60 °C, ideal para el secado del grano de arroz.

### 3.3. Selección de sopladores de aire centrífugo en la cámara de combustión

Para que exista una combustión continua y adecuada de la cascarilla de arroz, se administró un 20% de exceso del flujo de aire, esto se logró ubicando dos sopladores de aire centrífugos en la cámara de combustión, de forma que las líneas de flujo circulen hacia el intercambiador, además se ubicó un tercer soplador en la salida de la chimenea induciendo los gases de escape hacia el exterior. La selección de sopladores se lo realizo en base a los resultados de la simulación obtenida en el punto 3.2 los cuales fueron los siguientes:

$$\dot{Q}_{aire-blower} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire}} \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_{aire-blower1} = 118.93 \frac{m^3}{h} = 70CFM$$

$$\dot{Q}_{aire-blower2} = 50.97 \frac{m^3}{h} = 30 CFM$$

$$\dot{Q}_{aire-blower3} = 118,93 \frac{m^3}{h} = 70CFM$$

### 3.4. Análisis de costos

Los costos para los materiales y mano de obra se determinaron con respecto a la disponibilidad en el mercado local.

#### 3.4.1. Costos de materiales de la cámara de secado

En los costos de materiales se incluyó:

**Tabla 3.5 Costo de materiales para el rediseño de la cámara de secado.**  
[Fuente: Autores]

Descripción	Unidad	Cant.	Precio unitario	Precio total
Plancha de Acero ASTM A36 de 3mm de espesor	-	1	172,71	172,71
Electrodo de soldadura AGA C-13 E-6011	kg	1	4,92	4,92
Rollo de aislante de fibra de vidrio de 2.5"	-	1	70,00	70,00
Disco de corte de acero de 4 1/2"	-	2	1,30	3,90
Pintura anticorrosiva	Galón	rrr1	10,99	10,99
Brocha de cabo de madera de 4"	-	2	1,35	2,70
Blower ¼ HP, salida de 3"	-	1	66,88	66,88
<b>Costo total de materiales para la cámara de secado</b>				<b>332,10</b>

#### 3.4.2. Costos de mano de obra

Los valores de la tabla 3.6 son un aproximado de los costos de mano de obra con tiempos aproximados para la realización del proyecto, tomando en cuenta datos obtenidos del Ministerio de Trabajo para el cálculo del valor hora/hombre.

**Tabla 3.6 Glosario del costo de mano de obra.** [Fuente: Autores]

Descripción	Unidad	Valor
Trabajadores	-	1
Duración del proyecto	Días	3
Trabajo por día	Horas	8
Total	Horas	24
Costo hora/hombre	\$	4,53
<b>Costo total mano de obra</b>		<b>108.72</b>

### 3.4.3. Costos de diseño

La tabla 3.7 muestra los costos del diseño, simulación y optimización del horno de combustión.

**Tabla 3.7 Costo del diseño y simulaciones. [Fuente: Autores]**

Nombre	Valor
Gustavo Serrano	\$ 150,00
Carlos Rendón	\$ 150,00
<b>Costo total de diseño</b>	<b>\$ 300,00</b>

### 3.4.4. Costos totales

En la tabla 3.8, se representa el costo total del proyecto, que es la suma de los costos detallados en los puntos anteriores.

**Tabla 3.8 Costos totales. [Fuente: Autores]**

Descripción	Valor
Costo de materiales para la cámara de secado	\$ 332,10
Costo de mano de obra	\$ 108,72
Costo de diseño	\$ 300,00
<b>Costo total del proyecto</b>	<b>\$ 740,82</b>

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Las zonas del Ecuador con mayor producción de arroz son la provincia del Guayas y Los Ríos, representando un aproximado total del 95% de la producción a nivel regional, lo que representa una gran disponibilidad de CA que debería ser aprovechada.
- La cascarilla de arroz presenta condiciones favorables para su uso como combustible, pues posee características beneficiosas para el proceso de combustión como su poder calorífico (13,58 MJ/kg) y alto contenido de carbono (38,33% en promedio). Aun así, su uso es bastante limitado y aún no se aprovecha como debería pues la tecnología de quema directa en hornos resulta en una pobre manipulación de los materiales particulados resultantes del proceso de combustión (ceniza) y además las emisiones de  $CO_2$  de este proceso son elevadas.
- El tipo de horno más adecuado para la combustión de la cascarilla de arroz es el de tipo parrilla de acuerdo con los resultados de la matriz de decisión presentada en la tabla 3.1 se obtuvo un valor de 8.3 para tipo parrilla y de 7.25 para el de lecho fluidizado. Esto se debe a que el equipo opera en un rango de potencias relativamente bajos para el empleo del lecho fluidizado y está diseñado para un suministro de CA de 200 libras. Además, el proyecto está destinado para el secado de arroz en sectores donde la producción es de menor a mediana escala, por lo tanto, se tiene un bajo costo operativo y de inversión.
- Se optimizó la cámara de combustión, reubicando la parrilla a un ángulo de  $70^\circ$  con respecto a la vertical, permitiendo que atravesase una mayor cantidad de flujo de aire por la parrilla y estas se dirijan hacia la entrada del intercambiador de calor, además, se ubicaron baffles en la entrada de aire

principal a un ángulo de 30° con respecto a la horizontal para que redireccionen al flujo de aire hacia arriba y no hacia la cámara de ceniza evitando que exista un levantamiento de material particulado dentro de la cámara de combustión.

- La temperatura exterior de las paredes de la cámara de combustión en el modelo inicial alcanzó un rango entre 150 y 200 °C en las zonas cercanas a la parrilla y la cascarilla, lo que resulto peligroso para los operarios del equipo. Esto se debió a que no se contaba con un espesor del aislante que permitiera reducir la conductividad térmica y disminuyera transferencia de calor hacia la pared de acero y el exterior, además, el equipo contaba con una mala fabricación lo que reducía las dimensiones de acuerdo con el plano de diseño con el cual fue fabricado. Con las modificaciones se obtuvo un rango 50 y 90 °C lo cual es aceptable en comparación con los resultados anteriormente obtenidos. Esto se consiguió aumentando el espesor del aislante a 100mm, disminuyendo las pérdidas de calor en las paredes, sin embargo, se tiene como observación la fabricación del equipo, ya que esta sigue siendo un problema y sólo se puede solucionar fabricándolo nuevamente.
- Los baffles ubicados para el redireccionamiento del flujo de aire de entrada también servirán para direccionar la ceniza resultante de la combustión hacia el inferior de la cámara, dónde será más fácil su manejo. Es importante que exista una correcta disposición de la ceniza, ya que es considerado un material altamente contaminante.
- Se selecciono como material el acero ASTM A36 debido a que la temperatura máxima que se tiene en el horno es de 650 °C la cual corresponde a la temperatura de combustión óptima de la CA, este valor se encuentra muy por debajo de la temperatura de fusión del acero que es de 1538 °C garantizando que el equipo opere sin modificar las propiedades mecánicas; además, se seleccionó la fibra de vidrio como material aislante ya que posee una baja conductividad térmica lo cual hace que se conserve

el calor y pueda ser transferido al aire, es importante mencionar que estos materiales se encuentra fácilmente en el mercado nacional.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Para que el proceso de secado se realice correctamente, se requiere que el arroz se encuentre pilado y sin cáscara, libre de impurezas que puedan mezclarse con el producto.
- Para realizar una correcta selección del tipo de horno de biomasa, se debe tomar en consideración la potencia de operación, el costo de inversión, así como la aceptación del tamaño y estructura de la partícula de biomasa, entre otros parámetros y requerimientos, que permitirá ajustar a las necesidades del beneficiario.
- Es recomendable que los estudios químicos de la biomasa que se utilice se realicen individualmente para cada muestra, ya que las características físicas y químicas de cada una va a depender de las condiciones en las cuales fueron producidas, recolectadas, etc.
- Deben evaluarse las alternativas para la recolección y aprovechamiento de la ceniza ya que corresponde a 14-25% de la cascarilla de arroz dependiendo de la variedad de arroz, clima y suelo de la región. Este desecho es considerado perjudicial para la salud por su composición química, lo que vuelve su manejo un tema de gran importancia; además, puede servir como base inicial en la obtención de materia prima.
- Se recomienda iniciar los proyectos de simulación mediante la herramienta wizard de Flow Simulation, sea cual sea el nivel del usuario, pues esta sirve como guía para definir de manera correcta los parámetros de simulación y que no existan inconvenientes al momento de definir las variables.
- Para obtener resultados más certeros, se recomienda el uso de dos programas de simulación diferentes, ya que cada cual trabaja con un

algoritmo diferente para la generación de la malla, lo que podría servir para tomar decisiones que beneficien a la optimización del equipo.

# BIBLIOGRAFÍA

- Abelardo Prada, C. C. (2010). *La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral*. Colombia: Universidad de los Llanos.
- Aguilar, J. M. (2018). *Estudio del potencial energético de la cascara de arroz ecuatoriano paletizado para su uso como combustible*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Agustin Valverde G., B. S. (2007). análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, 6.
- Arévalo, A. F., & Ávila, W. A. (2018). *Diseño de un horno –intercambiador de biomasa y gas para la generación de calor utilizada en el proceso de secado de arroz*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Arteaga, J. F. (2020). Caracterización de cascarilla de arroz como biomasa residual para combustible térmico. Quito: Universidad Internacional SEK.
- Degremont. (2011). *Fichas técnicas manual técnico del Agua Degremont, Biosólidos*. Obtenido de <http://www.degremont.es/es/index.php>
- Delgado, E. (2014). *Diseño, Modelo Matemático y Construcción de un Secadero Optimizado con Energías Limpias*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Delgado, E., & Barriga, A. (2009). *Dimensionamiento de un horno para la eliminación de desechos hospitalarios en zonas rurales con minimización de contaminantes en la fuente*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- E. Delgado, M. Q. (2018). Tecnología de secado para los productos de arroz, maíz y cacao en las provincias del Guayas y los Ríos. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- J. Martinez, T. P. (2009). Experimentos de combustión con cascarilla de arroz en lecho fluidizado para la producción de ceniza rica en sílice. Medellín, Colombia.
- Juliano, O. (1994). *El arroz en la nutrición humana*. Roma: Instituto Internacional de Investigación sobre el Arroz (FAO).
- M. Echeverria, O. L. (2010). Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica. Quito.
- Martinez, C., Acevedo, G., & Espinal, G. (2005). *La cadena del arroz en Colombia: Una mirada global de su estructura y dinámica, 1991-2005*. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

- Pelaez-Samaniego, M.R.; Garcia-Perez, Manuel; Martí-Hertrero, Jaime; Montero-Izquierdo, Andres. (2015). Estado de uso de la biomasa para la producción de bioenergía, biocombustibles y bioproductos en Ecuador. 447.
- Ralph Petrucci, G. H. (2011). *Química General, Principios y aplicaciones modernas*. Madrid: Pearson educación.
- Rodríguez, R. A. (2007). *Determinación de la Composición Química y Propiedades Físicas y Químicas del Pulido de Arroz (Oryza Sativa L.)*. Valdivia.
- SJAAK VAN LOO, J. K. (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. London, UK and USA: Earthscan.
- Toscano, L. (2009). Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa. Guayaquil, Ecuador.
- UNCTAD. (2006). *Descripción del Arroz*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y Desarrollo.
- Velázquez, V. A. (2014). *Análisis económico, social y político de la cadena agroalimentaria del arroz en el Ecuador, período 2005-2014*. Quito: Tesis de Grado, PUCE.
- Villada, D. Q., & Mosquera, M. Y. (2010). *ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Yunus Cengel, A. G. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México: Mc Graw Hill.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A: CÁLCULOS

Ecuación general de combustión:

$$\begin{aligned} C\frac{H_y}{x}S\frac{w}{x}O\frac{z}{x}N\frac{u}{x} + (1 + EA) \left(1 + \frac{y}{4x} + \frac{w}{x} + \frac{u}{x} - \frac{z}{2x}\right) (3.76N_2 + O_2) \\ \rightarrow CO_2 + \frac{y}{2x}H_2O + (1 + EA) \left(1 + \frac{y}{4x} + \frac{w}{x} + \frac{u}{x} - \frac{z}{2x}\right) (3.76N_2) \\ + EA \left(1 + \frac{y}{4x} + \frac{w}{x} + \frac{u}{x} - \frac{z}{2x}\right) O_2 + \frac{w}{x}SO_2 + \frac{u}{x}NO_2 \end{aligned}$$

**Subíndices de la formula química de la cascarilla de arroz:**

Seleccionando lo valores de la tabla 1.3, a partir de la ecuación 2.3 se calcula los subíndices de la formula química de la cascarilla de arroz

$$\frac{y}{x} = \frac{M_C * m_H}{M_H * m_C}$$

$$\frac{y}{x} = \frac{12 * 5.02}{1 * 47.29}$$

$$\frac{y}{x} = 1.2738$$

$$\frac{w}{x} = \frac{M_C * m_S}{M_S * m_C}$$

$$\frac{w}{x} = \frac{12 * 0.05}{32 * 47.29}$$

$$\frac{w}{x} = 0.0004$$

$$\frac{z}{x} = \frac{M_C * m_O}{M_O * m_C}$$

$$\frac{z}{x} = \frac{12 * 47.45}{16 * 47.29}$$

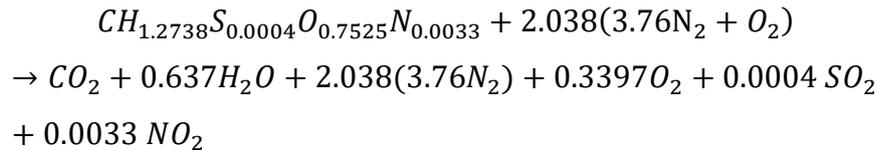
$$\frac{z}{x} = 0.7525$$

$$\frac{u}{x} = \frac{M_C * m_N}{M_N * m_C}$$

$$\frac{u}{x} = \frac{12 * 0.18}{14 * 47.29}$$

$$\frac{u}{x} = 0.0033$$

Como resultado se tiene que la ecuación química de la combustión para la CA es:



### Relación aire combustible teórico:

Usando la ecuación 2.5 se tiene que:

$$m = n * M$$

$$m_{aire} = 2.038((3.76 * 14 * 2) + (16 * 2)) = 279.79g$$

$$m_{combustible} = 12 + (1 * 1.2738) + (32 * 0.0004) + (16 * 0.7525) + (14 * 0.0033)$$

$$= 25.37g$$

Por lo tanto:

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right)t} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}}$$

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right)t} = \frac{279.79g}{25.37g}$$

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right)t} = 11.02 \approx 11$$

### Relación aire combustible real

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right)r} = m_{\left(\frac{a}{f}\right)t} * (1 + EA)$$

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right)r} = 11 * (1 + 0.2)$$

$$m_{\left(\frac{a}{f}\right)r} = 13.23 \approx 13$$

Por lo tanto, se necesitará suministrar por cada unidad de masa de combustible 13 unidades de masa de aire para que se logre una reacción de combustión de tipo estequiométrico.

Se tiene dos entradas de flujo de aire de 138.13 kg/h y 59.21 kg/h, por lo tanto:

$$13 = \frac{\dot{m}_{aire-blower1} + \dot{m}_{aire-blower2}}{\dot{m}_{CA}}$$

$$\dot{m}_{CA} = \frac{138.13 \frac{kg}{h} + 59.21 \frac{kg}{h}}{13}$$

$$\dot{m}_{CA} = \frac{197.33 \frac{kg}{h}}{13}$$

$$\dot{m}_{CA} = 15.18 \frac{kg}{h}$$

Una vez obtenido el flujo de cascarilla hacia la cámara, se calcula el flujo de salida de los gases de combustión:

$$\dot{m}_{CA} + \dot{m}_{aire-blower1} + \dot{m}_{aire-blower2} = \dot{m}_{combustion} + \dot{m}_{cenizas}$$

$$\dot{m}_{CA} + 13 \cdot \dot{m}_{CA} = \dot{m}_{combustion} + -0.179 \cdot \dot{m}_{CA}$$

$$\dot{m}_{CA} = \frac{\dot{m}_{combustión}}{13.821}$$

$$\dot{m}_{combustión} = \dot{m}_{CA} * 13.821$$

$$\dot{m}_{combustión} = 15.18 \frac{kg}{h} * 13.821$$

$$\dot{m}_{combustión} = 209.80 \frac{kg}{h}$$

### Calor total de la combustión

$$Q_{CA} = \dot{m}_{CA} * P_c$$

$$Q_{CA} = 15.18 \frac{kg}{h} * 17644 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{CA} = 267835.92 \frac{kJ}{h} \left( \frac{1}{3600} \left[ \frac{h}{s} \right] \right)$$

$$Q_{CA} = 74.39 [kW]$$

### Pérdidas de calor

### Calor total perdido en la cámara de combustión

$$Q_c = U * A * (T_{parr} - T_{out})$$

### Coefficiente de convección interno en la cámara de combustión

Se procede a calcular la temperatura de película entre la pared interior y la parrilla con los resultados de la simulación:

$$T_f = \frac{T_{parr} + T_{pint}}{2}$$

$$T_f = \frac{923 + 550.46}{2}$$

$$T_f = 736.73 K$$

Una vez obtenido el valor, se procede a encontrar las propiedades de los gases como se ilustran en la tabla:

**Tabla A.1 Propiedades de los gases de combustión.**

Descripción	Cantidad
Viscosidad cinemática	$78.18 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$
Conductividad térmica	$54.24 \times 10^{-3} \frac{W}{m K}$
Numero de Prandtl	0.700
Difusividad térmica	$106.08 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

$$Ra_L = \frac{g(\cos\theta)\beta(T_{parr} - T_{pint})L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

$$Ra_L = \frac{9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] (\cos 70) \left( \frac{1}{736.73 [K]} \right) (923 - 550.46) [K] (0.456 [m])^3}{78.18 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 106.08 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$Ra_L = 19.38 \times 10^6 < 10^9 \text{ Flujo Laminar}$$

$$N_u = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \quad Ra_L < 10^9$$

$$N_u = 0.68 + \frac{0.670(19.38 \times 10^6)^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{0.700}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$$

$$N_u = 34.75$$

$$h_{i-h} = \frac{N_u * k}{L}$$

$$h_{i-h} = \frac{(34.75) * 54.24 \times 10^{-3} \frac{W}{m K}}{0.456 [m]}$$

$$h_{i-h} = 4.13 \frac{W}{m^2 K}$$

### **Coefficiente de transferencia de calor por convección en el exterior de la cámara de combustión**

Se calcula la temperatura de película exterior de la cámara de combustión con los datos de temperatura ambiente y temperatura exterior de la pared

$$T_f = \frac{T_{out} + T_{pout}}{2}$$

$$T_f = \frac{300[K] + 324.83 [K]}{2}$$

$$T_f = 312.42 [K]$$

Una vez calculada la temperatura, se procede a obtener las propiedades de los gases como se observa en la tabla A.2:

**Tabla A.2 Propiedades del aire a temperatura de película.**

Descripción	Cantidad
Viscosidad cinemática	$17.14 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$
Conductividad térmica	$27.22 \times 10^{-3} \frac{W}{m K}$
Numero de Prandtl	0.705
Difusividad térmica	$24.34 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Se calcula el número de Rayleigh con la ecuación 2.6

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_{p_{out}} - T_{out}) * L^3}{v * \alpha}$$

$$Ra_L = \frac{(9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right]) * \left( \frac{1}{312.42 [K]} \right) * (324.83 - 300) [K] * (0.523 [m])^3}{17.14 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right] * 24.34 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]}$$

$$Ra_L = 2.67 \times 10^8 < 10^9 \text{ Flujo laminar}$$

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} \quad Ra_L < 10^9$$

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670 (2.67 \times 10^8)^{\frac{1}{4}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{0.705} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} \quad Ra_L < 10^9$$

$$Nu = 66.37$$

$$h_{o-h} = \frac{Nu * k}{L}$$

$$h_{o-h} = \frac{(66.37) * 27.22 \times 10^{-3} \left[ \frac{W}{m K} \right]}{0.523 [m]}$$

$$h_{o-h} = 3.45 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Cálculo del coeficiente de radiación

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_{parr}^2 + T_{pint}^2) (T_{parr} - T_{pint})$$

$$h_{i-ir} = 0.8 * 5.67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] * 1 * ((923^2) + (550.46)^2) (923 - 550.46)$$

$$h_{i-ir} = 19.52 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Coefficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{i-h} + h_{i-ir}} + \frac{e_a}{k_a} + \frac{e_{fv}}{k_{fv}} + \frac{1}{h_{o-h}}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.13} + \frac{0.006}{19.52} + \frac{0.1}{14.9} + \frac{1}{0.035} + \frac{1}{3.45}}$$

$$U = 0.31 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

$$Q_c = U * A * (T_{parr} - T_{out})$$

$$Q_c = 0.32 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] * (7.49)[m^2] * (923 - 300)[K]$$

$$Q_c = 1462.92 [W]$$

$$Q_c = 1.46 [kW]$$

### Calor almacenado en las paredes de acero

$$Q_{ac} = m_p c p_p (T_{m_p} - T_{p_{out}})$$

$T_{m_p}$  = Temperatura media de la pared [K]

$T_{p_{int}}$  = Temperatura en el interior de la pared [K]

$T_{p_{out}}$  = Temperatura exterior de la pared [K]

$$T_{m_p} = \frac{T_{p_{int}} + T_{p_{out}}}{2}$$

$$T_{m_p} = \frac{550.46 + 324.83 [K]}{2}$$

$$T_{m_p} = 437.65 [K]$$

### Paredes del horno

Las dimensiones y propiedades físicas de la cámara de combustión fueron se calcularon a partir del software en el cual se realizó el modelado 3D.

Densidad = 7850.00 kilogramos por metro cúbico

Masa = 168.22 kilogramos

Volumen = 0.02 metros cúbicos

Área de superficie = 7.49 metros cuadrados

Figura .1 Propiedades físicas de la pared de acero, calculadas con SolidWorks. [Fuente: Autores]

## Volumen de la pared

$$V_{pared} = 0,02 \text{ m}^3$$

## Masa de la pared

$$m_{pared} = 168,22 \text{ kg}$$

$$Q_{ac} = (168.22 \text{ [kg]})(500 \left[ \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right])(437.65[\text{K}] - 324.83 [\text{K}])$$

$$Q_{ac} = (9489.29 \text{ [KJ]}) \cdot \left( \frac{1}{3600 \text{ [s]}} \right)$$

$$Q_{ac} = 2.64 \text{ [kW]}$$

## Pared de aislamiento

Las dimensiones y propiedades físicas del aislamiento fueron calculadas a partir del software en el cual se realizó el modelado 3D.

**Figura .2 Propiedades físicas del aislante calculadas con SolidWorks.  
[Fuente: Autores]**

Masa = 168.88 kilogramos

Volumen = 0.08 metros cúbicos

Área de superficie = 6.20 metros cuadrados

## Volumen total del aislante

$$V_{ais} = 0,08 \text{ [m}^3\text{]}$$

## Masa del aislamiento

$$m_{ais} = 168,88 \text{ [kg]}$$

### Calor almacenado en el aislamiento

$$Q_{ais} = m_{ais} c_{p_{ais}} (T_{p_{int}} - T_{m_p})$$
$$Q_{ais} = 168,88 [kg] \left( 1000 \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right] \right) (550.46 [K] - 437.65 [K])$$
$$Q_{ais} = 19051.35 [KJ] \cdot \left( \frac{1}{3600 [s]} \right)$$
$$Q_{ais} = 5.29 [kW]$$

### Calor cedido a la ceniza:

$$Q_{cz} = m_{cz} c_{p_{cz}} (T_{cz} - T_{out})$$
$$Q_{cz} = (0.028 [kg]) \left( 0.9598 \left[ \frac{J}{kgK} \right] \right) (923 - 300) [K]$$
$$Q_{cz} = 14.95 [W]$$
$$Q_{cz} = 0.0145 [kW]$$

### Calor total perdido en el sistema:

$$Q_t = Q_{ac} + Q_{ais} + Q_c + Q_{cz}$$
$$Q_t = 2.64 [kW] + 5.29 [kW] + 1.46 [kW] + 0.0145 [kW]$$
$$Q_t = 9.41 [kW]$$

### Eficiencia

$$\eta = \frac{Q_{CA} - Q_t}{Q_{CA}} \times 100$$
$$\eta = \frac{74.39 [kW] - 9.41 [kW]}{74.39 [kW]} \times 100$$
$$\eta = 87.36\%$$

### Análisis de caída de presión de la chimenea:

### Perdidas a lo largo de la chimenea:

$$\Delta P_f = f * \left(\frac{L}{D_h}\right) * \left(\frac{\rho_g * V_g^2}{2}\right)$$

$f$  = factor de fricción

$D_h$  = diámetro hidráulico [m]

$L$  = longitud de la chimenea [m]

$V_g$  = Velocidad de los gases [m/s]

$$D_h = \frac{2ab}{a + b}$$

$$D_h = \frac{2(0.153[m])(0.144[m])}{0.153[m] + 0.144[m]}$$

$$D_h = 0.148 [m]$$

Usando la tabla B.3 se calcula el factor de fricción, de acuerdo con la geometría de la chimenea es la siguiente:

$$\frac{a}{b} = \frac{0.153 [m]}{0.144 [m]} = 1.0625$$

$$Re = \frac{V_g \cdot D_h}{\nu}$$

$$Re = \frac{2.5 \left[\frac{m}{s}\right] \cdot 0.148[m]}{20.61 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s}\right]}$$

$$Re = 17952.45$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon}{3.7 D_h} \right)^{1.11} \right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{17952.45} + \left( \frac{0.045}{3.7 \cdot 0.148} \right)^{1.11} \right]$$

$$f = 0.21$$

$$\Delta P_f = f * \left( \frac{L}{D_h} \right) * \left( \frac{\rho_g * V_g^2}{2} \right)$$

$$\Delta P_f = 0.21 * \left( \frac{2.5}{0.148[m]} \right) * \left( \frac{1.005 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot \left( 2.5 \left[ \frac{m}{s} \right] \right)^2}{2} \right)$$

$$\Delta P_f = 11.33 Pa$$

## APÉNDICE B: TABLAS Y FIGURAS

Tabla B.3 Propiedades termo físicas del aire a presión atmosférica. [Fuente: Incropera y Dewitt, 2011]

**TABLE A.4** Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure<sup>a</sup>

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

Tabla B.4 Tabla periódica de los elementos. [Fuente: (Ralph Petrucci, 2011)]

Tabla periódica de los elementos<sup>†</sup>

	1											18						
	1A											8A						
1	1 H 1,00794	2 He 4,00260																
2	3 Li 6,941	4 Be 9,01218											5 B 10,811	6 C 12,0107	7 N 14,0067	8 O 15,9994	9 F 18,9984	10 Ne 20,1797
3	11 Na 22,9898	12 Mg 24,3050	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 9B	10 10B	11 11B	12 12B	13 Al 26,9815	14 Si 28,0855	15 P 30,9738	16 S 32,065	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948
4	19 K 39,0983	20 Ca 40,078	21 Sc 44,9559	22 Ti 47,867	23 V 50,9415	24 Cr 51,9961	25 Mn 54,9380	26 Fe 55,845	27 Co 58,9332	28 Ni 58,6934	29 Cu 63,546	30 Zn 65,409	31 Ga 69,723	32 Ge 72,64	33 As 74,9216	34 Se 78,96	35 Br 79,904	36 Kr 83,798
5	37 Rb 85,4678	38 Sr 87,62	39 Y 88,9059	40 Zr 91,224	41 Nb 92,9064	42 Mo 95,94	43 Tc (98)	44 Ru 101,07	45 Rh 102,906	46 Pd 106,42	47 Ag 107,868	48 Cd 112,411	49 In 114,818	50 Sn 118,710	51 Sb 121,760	52 Te 127,60	53 I 126,904	54 Xe 131,293
6	55 Cs 132,905	56 Ba 137,327	57-71 La-Lu	72 Hf 178,49	73 Ta 180,948	74 W 183,84	75 Re 186,207	76 Os 190,23	77 Ir 192,217	78 Pt 195,084	79 Au 196,967	80 Hg 200,59	81 Tl 204,383	82 Pb 207,2	83 Bi 208,980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 Ac-Lr	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)							
	Lantánidos*		57 La 138,905	58 Ce 140,116	59 Pr 140,908	60 Nd 144,242	61 Pm (145)	62 Sm 150,36	63 Eu 151,964	64 Gd 157,25	65 Tb 158,925	66 Dy 162,500	67 Ho 164,930	68 Er 167,259	69 Tm 168,934	70 Yb 173,04	71 Lu 174,967	
	Actínidos <sup>†</sup>		89 Ac (227)	90 Th 232,038	91 Pa 231,036	92 U 238,029	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)	

Masas atómicas relativas con respecto al carbono-12. En algunos elementos radiactivos, los números que aparecen entre paréntesis corresponden a los números másicos de los isótopos más estables. La numeración de los grupos se explica en la página 52. Los metales aparecen en color azul, los no metales en verde, los metaloides en amarillo y los gases nobles en gris.

<sup>†</sup>Según la resolución de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) del 22 de junio de 2007.

Se ha verificado el descubrimiento del elemento 112 pero aún no se le ha nombrado.

Se ha publicado la existencia de algunos elementos con número atómico superior al 112, pero aún no han sido confirmados.

Tabla B.5 Valores de la aspereza equivalente para tubo comerciales nuevos. [Fuente: (Yunus Cengel, 2011)]

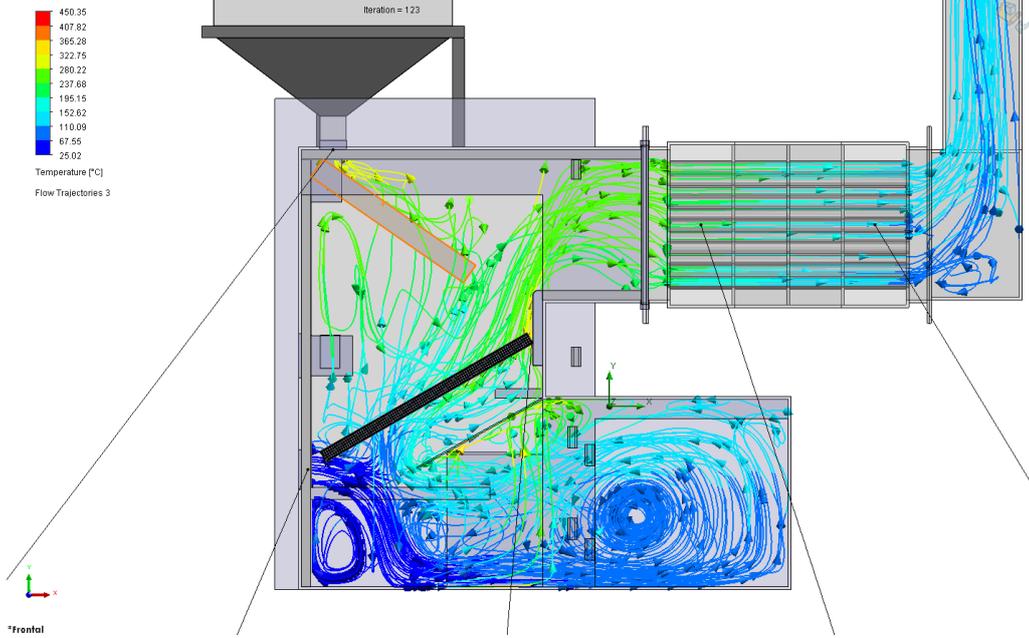
Material	Aspereza, $\epsilon$	
	ft	mm
Vidrio, plástico	0 (liso)	
Concreto	0.003-0.03	0.9-9
Duela de madera	0.0016	0.5
Caucho alisado	0.000033	0.01
Tubería de cobre o latón	0.000005	0.0015
Hierro fundido	0.00085	0.26
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Hierro forjado	0.00015	0.046
Acero inoxidable	0.000007	0.002
Acero comercial	0.00015	0.045

\*La incertidumbre en estos valores puede ser tan grande como  $\pm 60\%$ .

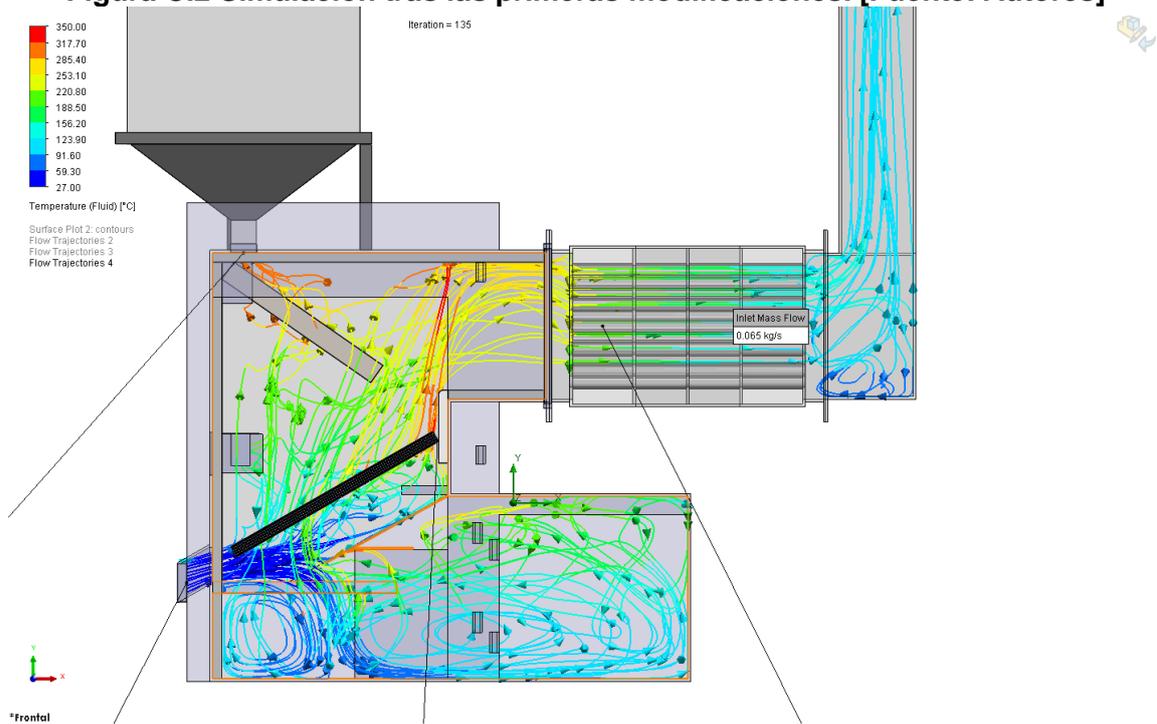
# APÉNDICE C: SIMULACIONES

Resultados de las simulaciones para las líneas de flujo:

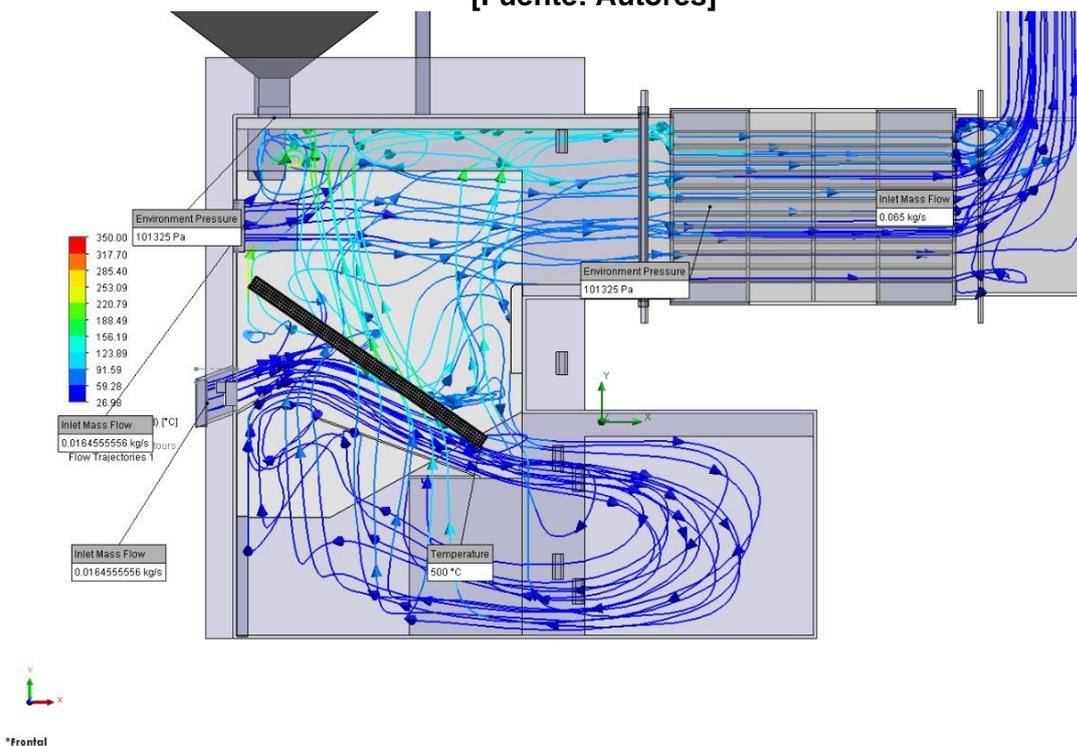
**Figura C.1 Simulación inicial del sistema. [Fuente: Autores]**



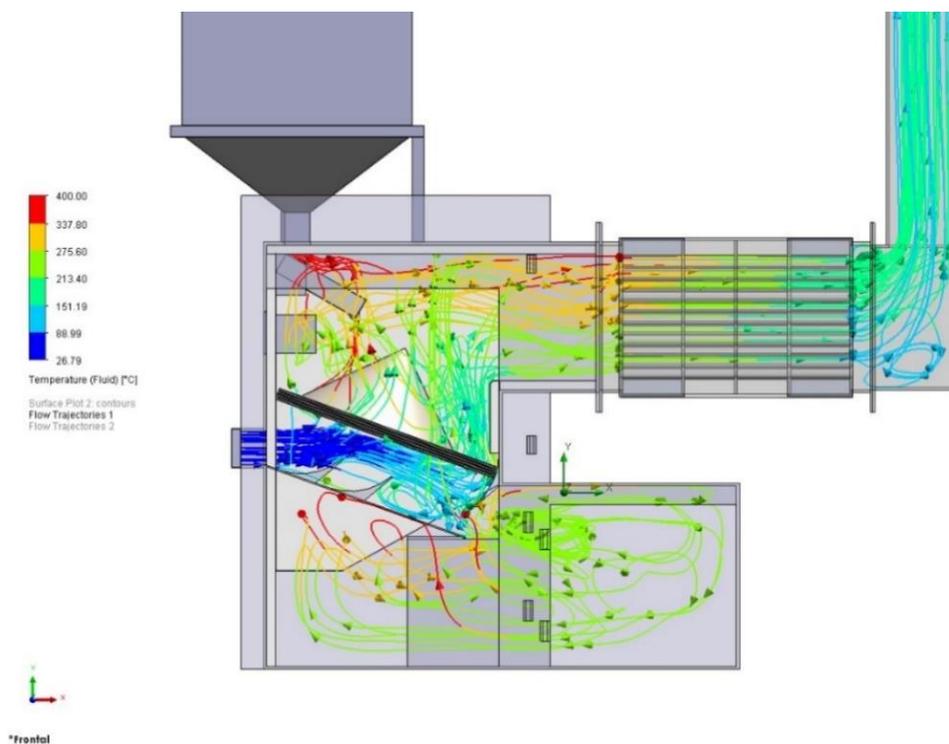
**Figura C.2 Simulación tras las primeras modificaciones. [Fuente: Autores]**



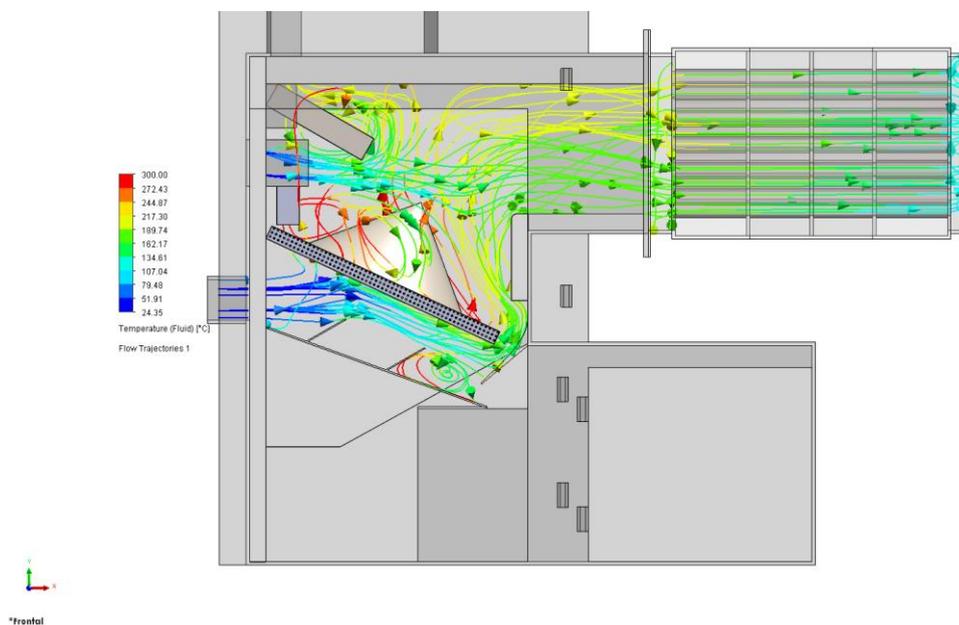
**Figura C.3 Simulación tras con una nueva orientación de la parrilla y del baffle inferior.**  
[Fuente: Autores]



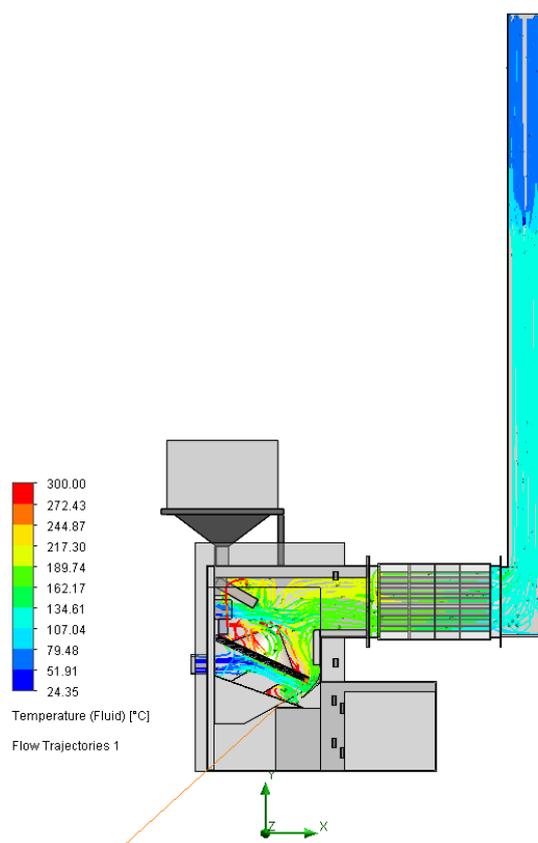
**Figura C.4 Simulación con una nueva orientación de la parrilla y la inclusión de los baffles.**  
[Fuente: Autores]



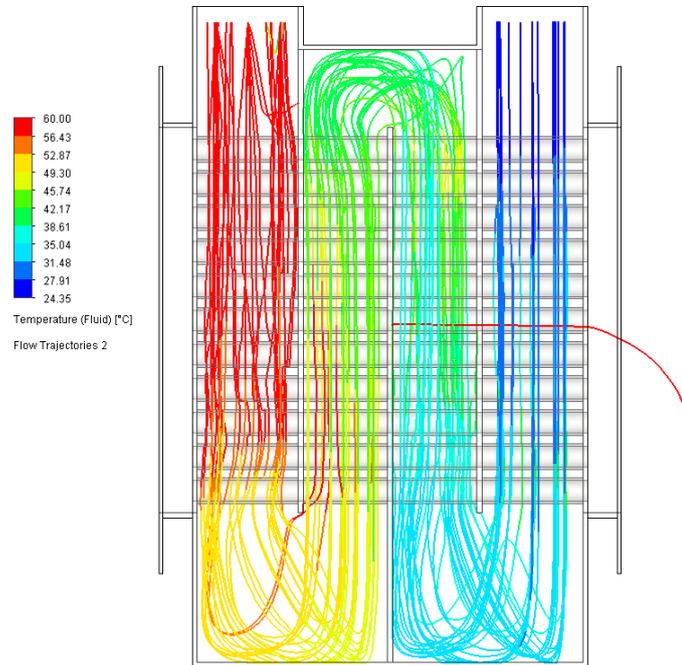
**Figura C.5 Simulación de la geometría final de la cámara de combustión. [Fuente: Autores]**



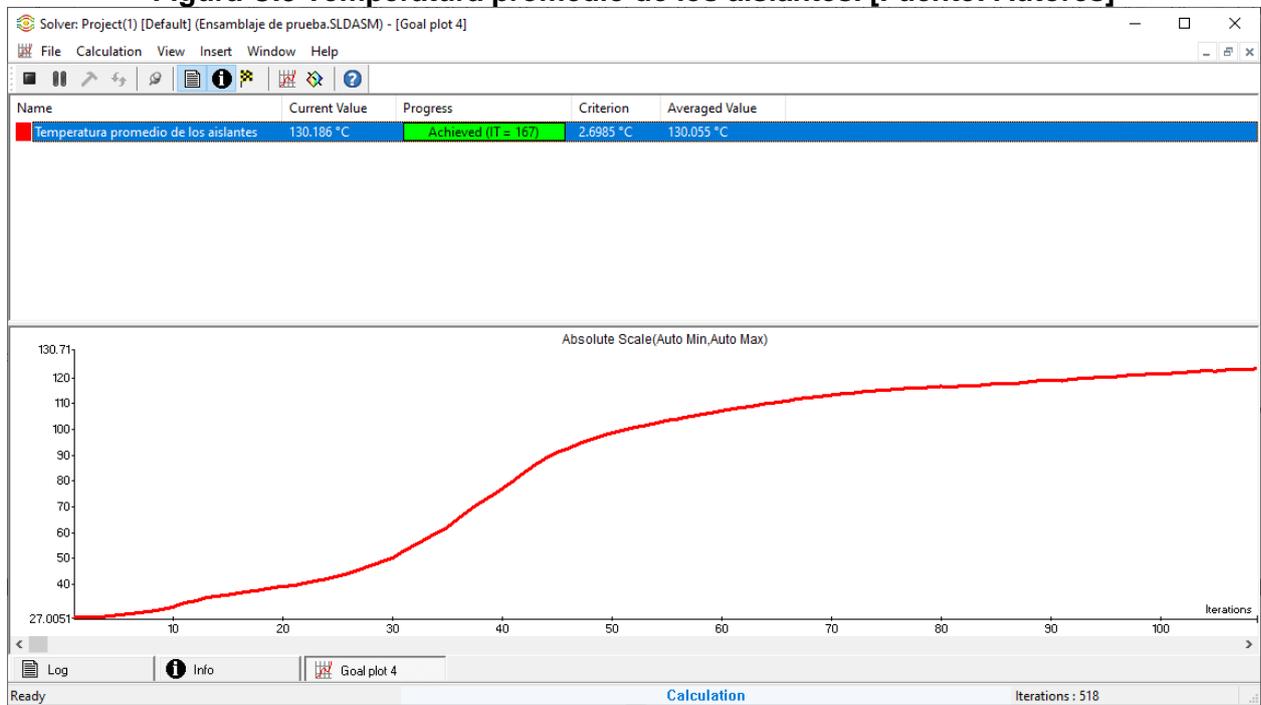
**Figura C.6 Simulación del sistema y de la circulación de gases en la chimenea. [Fuente: Autores]**



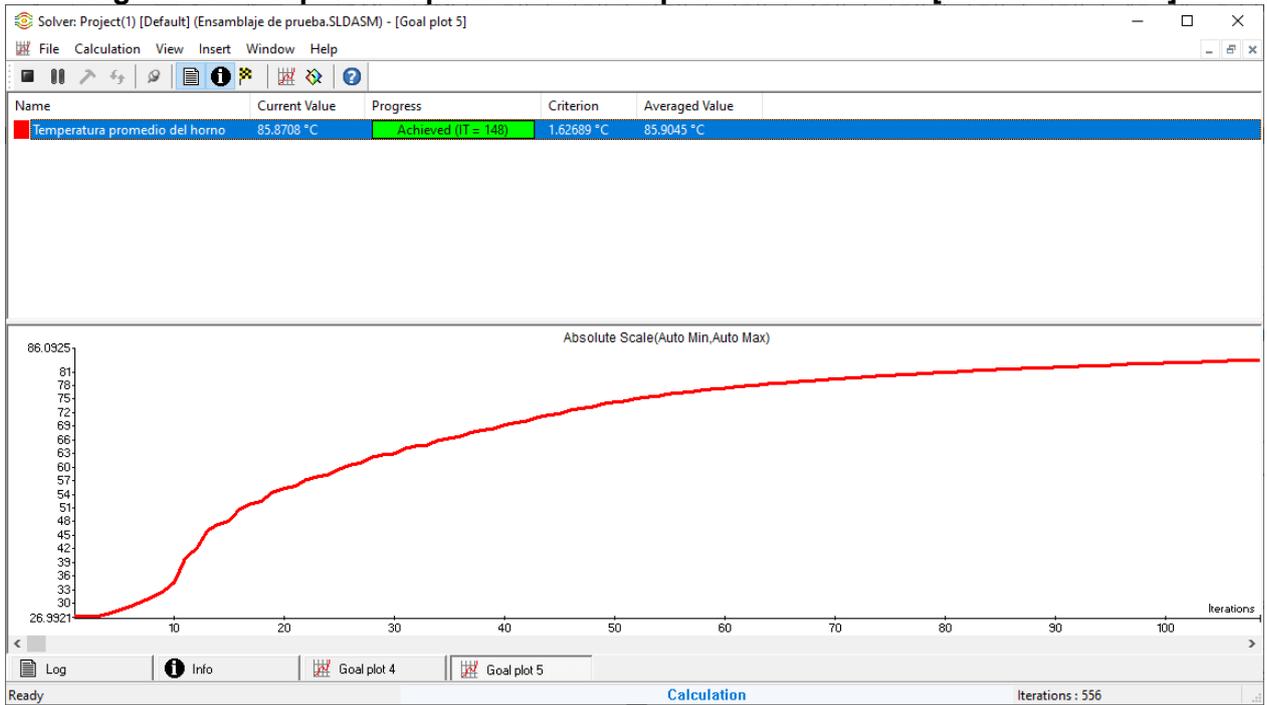
**Figura C.7 Simulación del flujo en el intercambiador de calor. [Fuente: Autores]**



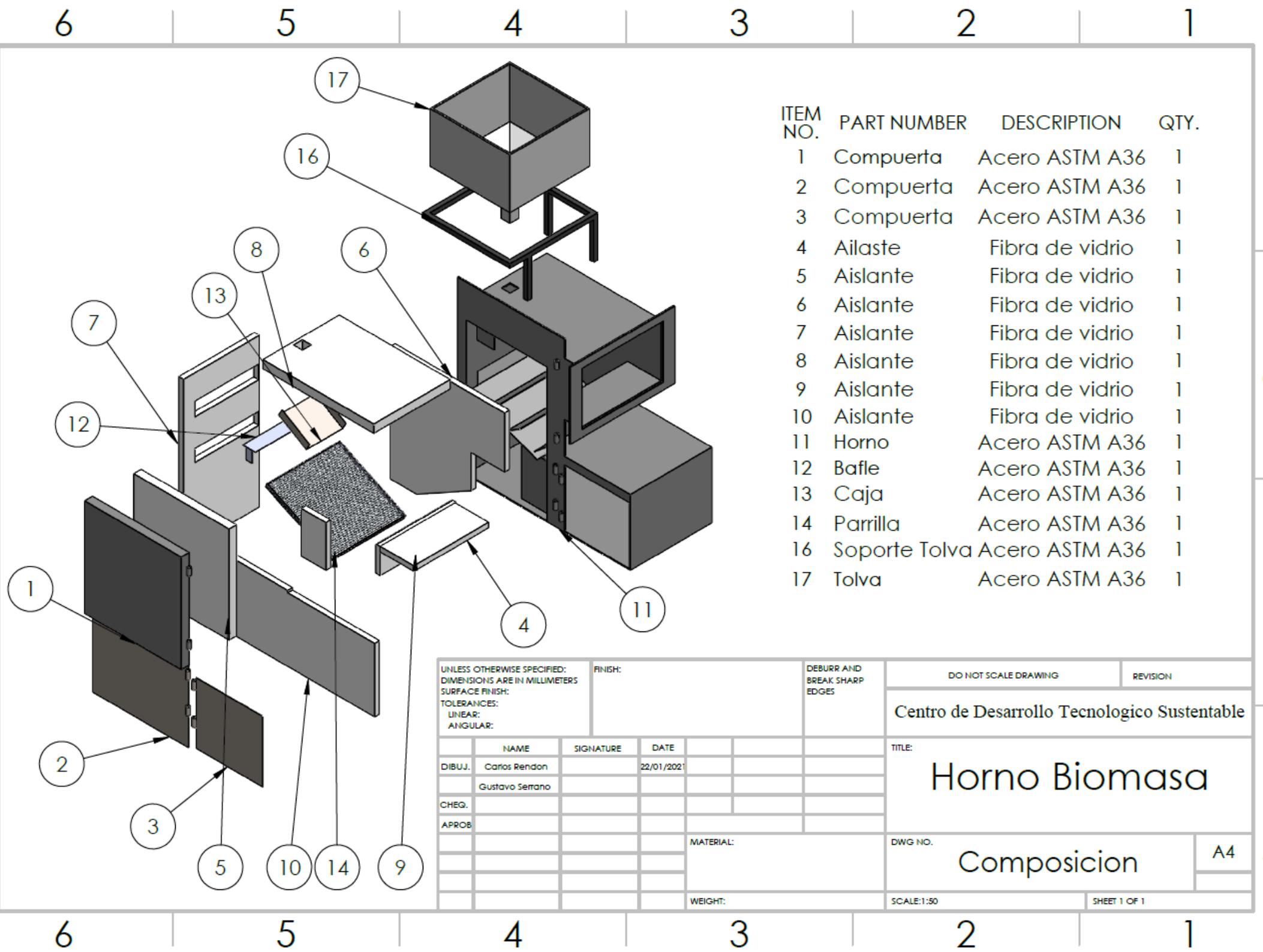
**Figura C.8 Temperatura promedio de los aislantes. [Fuente: Autores]**



**Figura C.9 Temperatura promedio de las paredes del horno. [Fuente: Autores]**



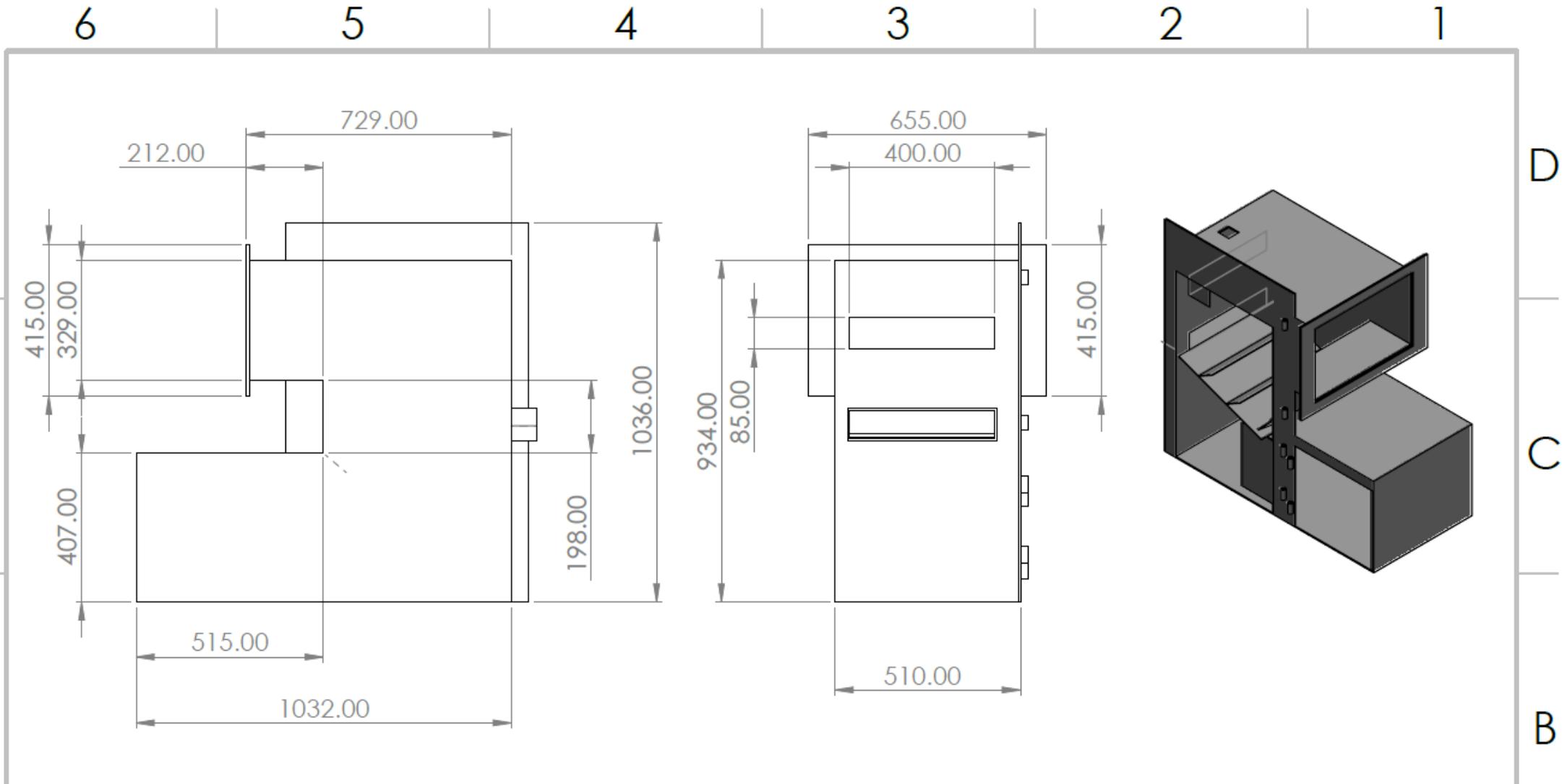
# APÉNDICE D: PLANOS



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Compuerta	Acero ASTM A36	1
2	Compuerta	Acero ASTM A36	1
3	Compuerta	Acero ASTM A36	1
4	Ailaste	Fibra de vidrio	1
5	Aislante	Fibra de vidrio	1
6	Aislante	Fibra de vidrio	1
7	Aislante	Fibra de vidrio	1
8	Aislante	Fibra de vidrio	1
9	Aislante	Fibra de vidrio	1
10	Aislante	Fibra de vidrio	1
11	Horno	Acero ASTM A36	1
12	Bafle	Acero ASTM A36	1
13	Caja	Acero ASTM A36	1
14	Parrilla	Acero ASTM A36	1
16	Soporte Tolva	Acero ASTM A36	1
17	Tolva	Acero ASTM A36	1

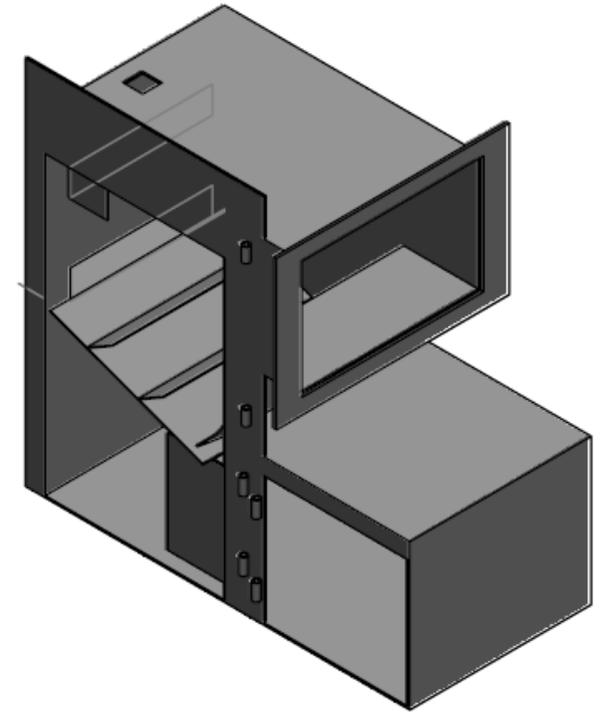
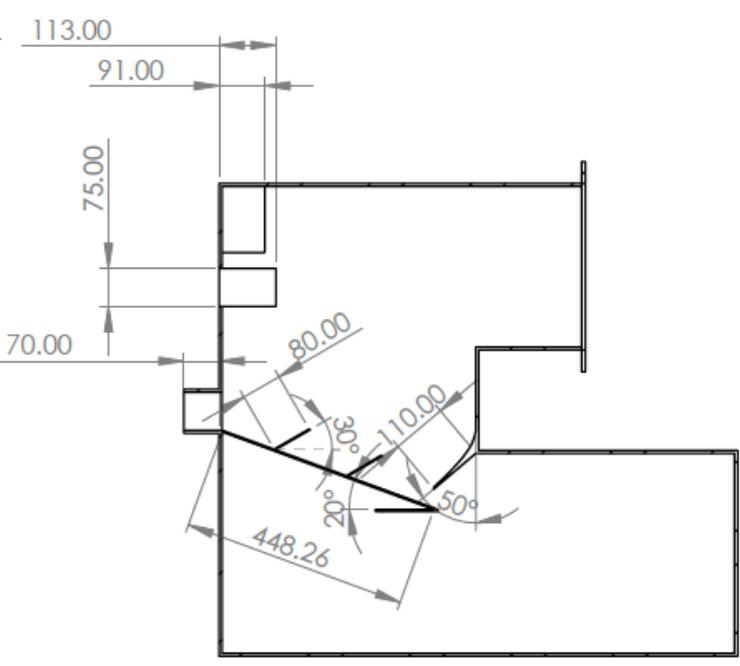
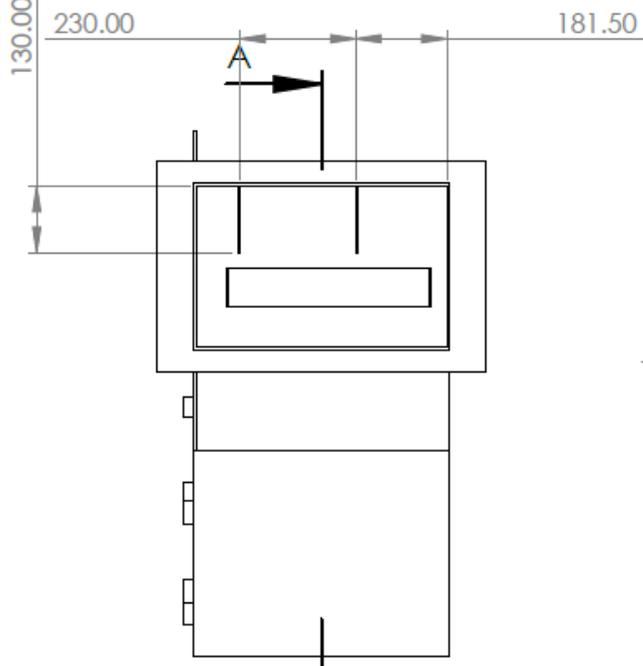
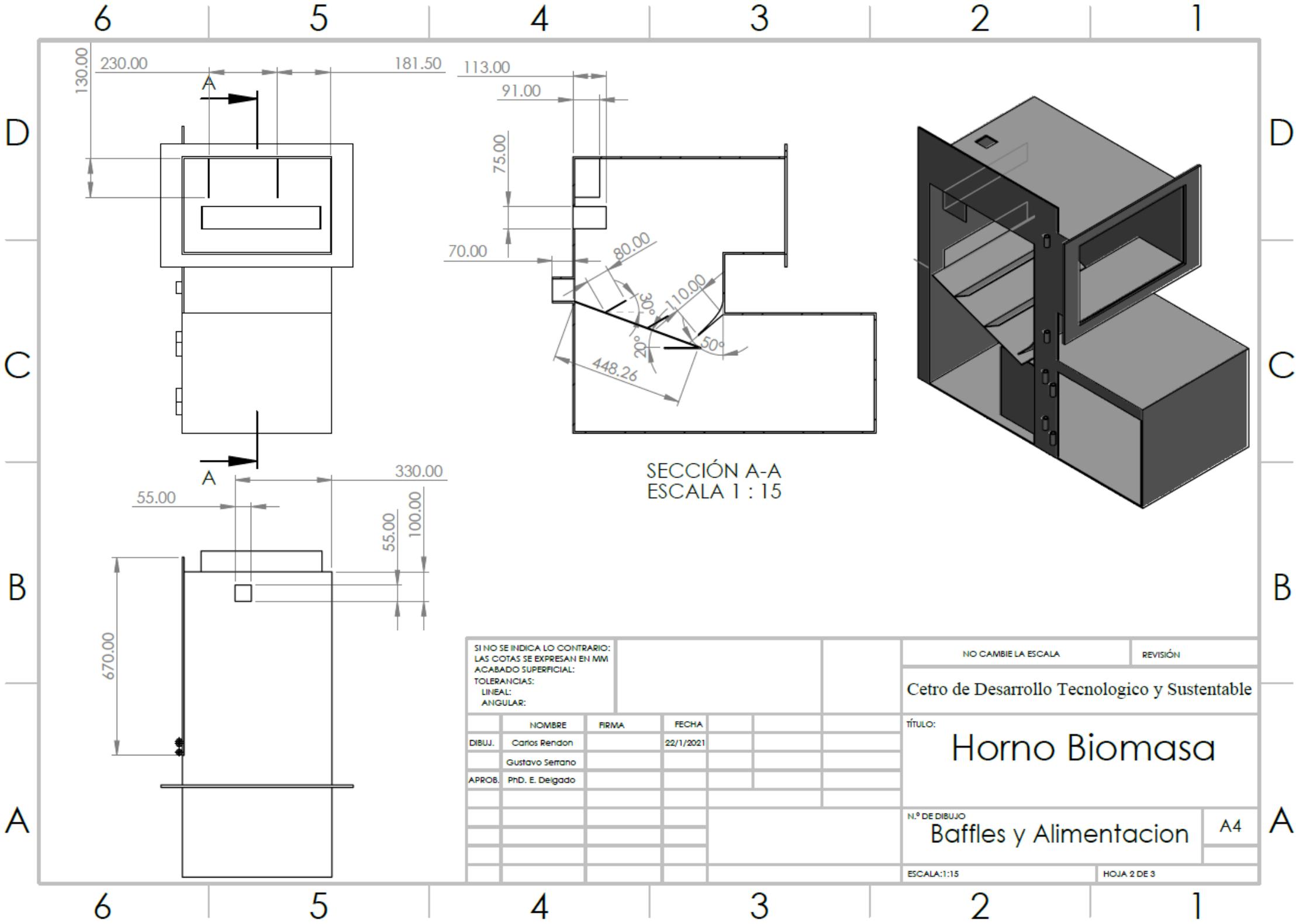
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
							Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable				
							TITLE: <b>Horno Biomasa</b>				
							DWG NO. <b>Composicion</b>				A4
							SCALE:1:50			SHEET 1 OF 1	

	NAME	SIGNATURE	DATE
DIBUJ.	Carlos Rendon		22/01/2021
	Gustavo Serrano		
CHEG.			
APROB			

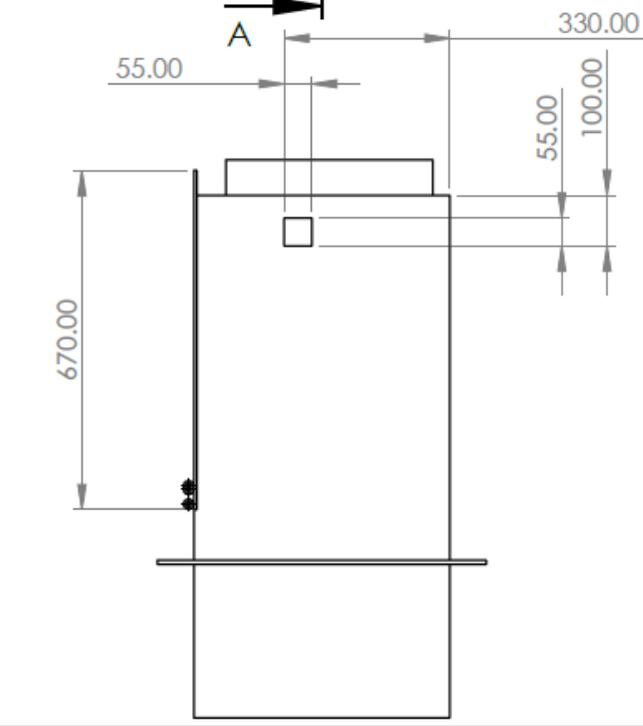


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN
				Centro de Desarrollo Tecnológico y Sustentable		
				TÍTULO:		
				<h1>Horno Biomasa</h1>		
				N.º DE DIBUJO		A4
				Estructura exterior		
				ESCALA: 1:15		HOJA 1 DE 1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Carlos Rendon		22/1/2021
	Gustavo Serrano		
APROB.	PhD. E. Delgado		



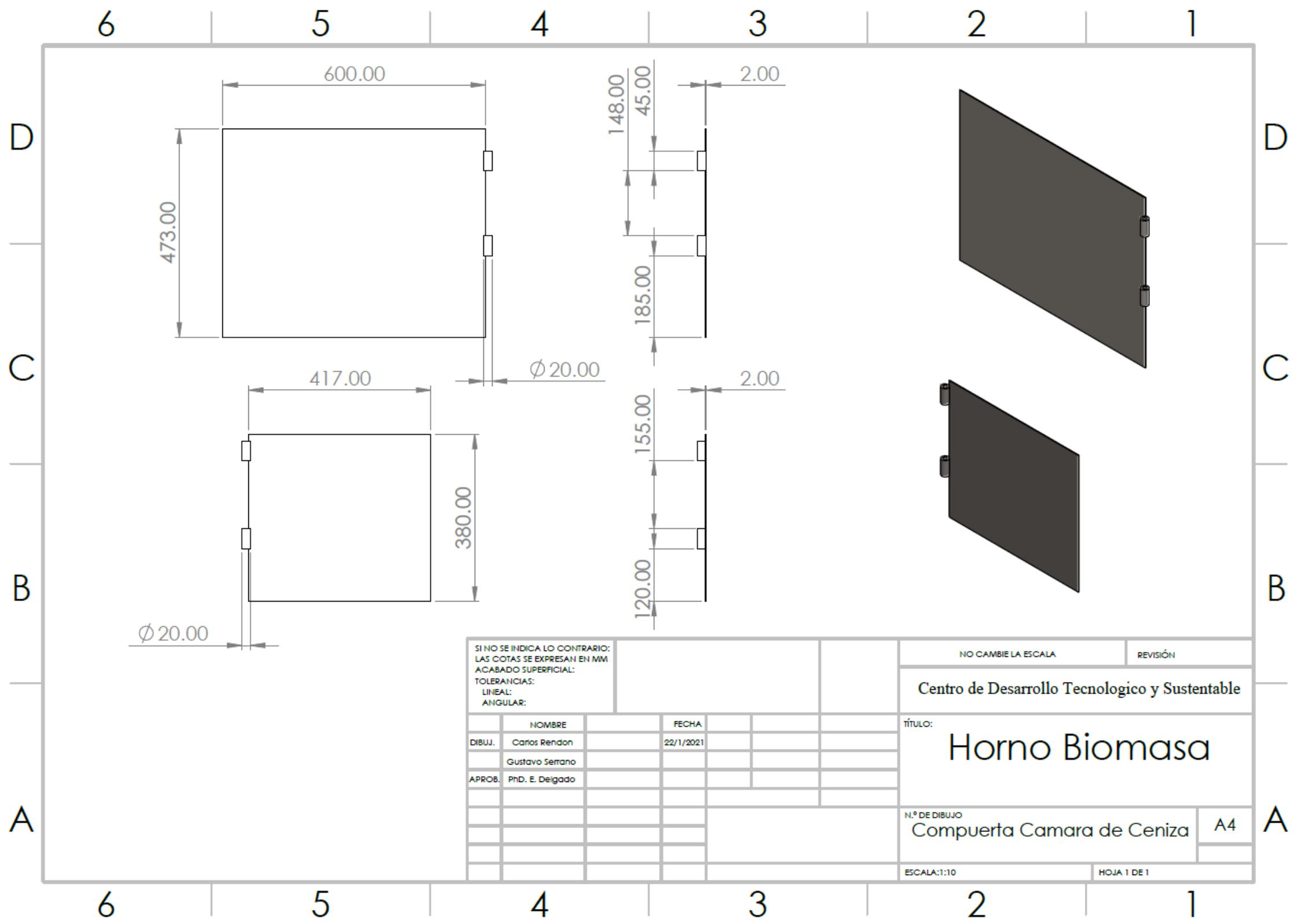
SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 15



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Carlos Rendon		22/1/2021
	Gustavo Serrano		
APROB.	PhD. E. Delgado		

NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
Centro de Desarrollo Tecnológico y Sustentable	
TÍTULO: <b>Horno Biomasa</b>	
N.º DE DIBUJO Baffles y Alimentacion	A4
ESCALA:1:15	HOJA 2 DE 3

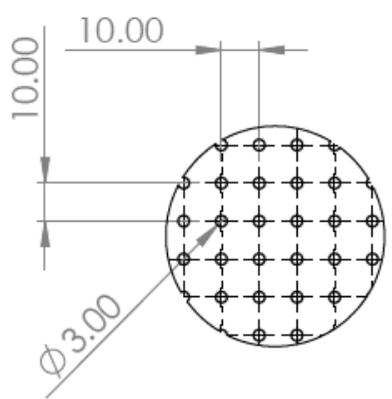
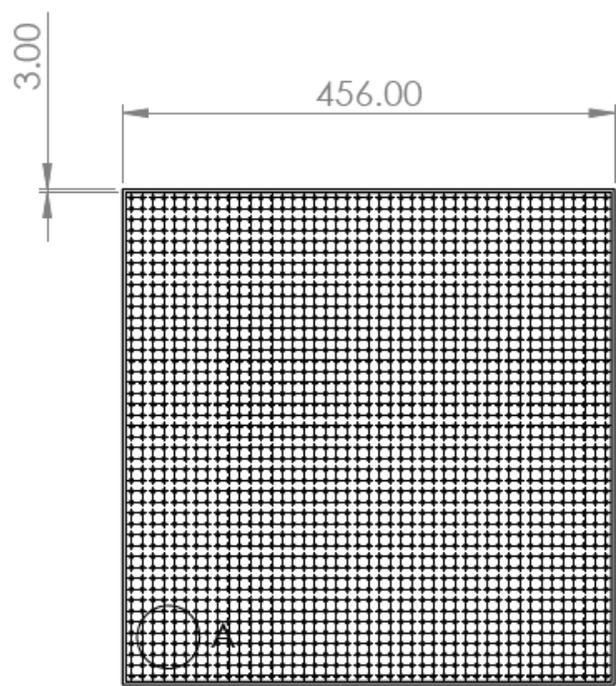
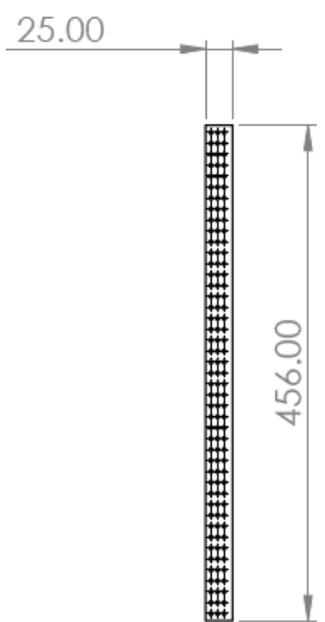
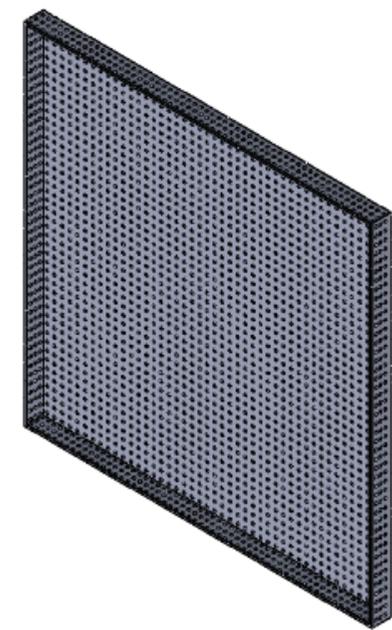




SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL:  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

	NOMBRE	FECHA
DIBUJ.	Carlos Rendon	22/1/2021
	Gustavo Serrano	
APROB.	PhD. E. Delgado	

NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
Centro de Desarrollo Tecnológico y Sustentable	
TÍTULO: <b>Horno Biomasa</b>	
N.º DE DIBUJO Compuerta Camara de Ceniza	A4
ESCALA: 1:10	HOJA 1 DE 1

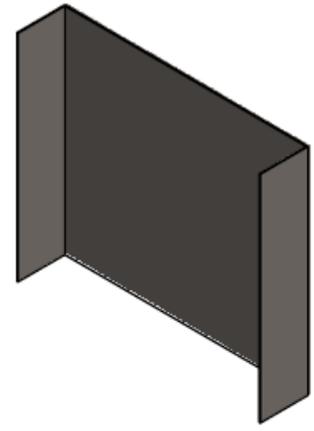
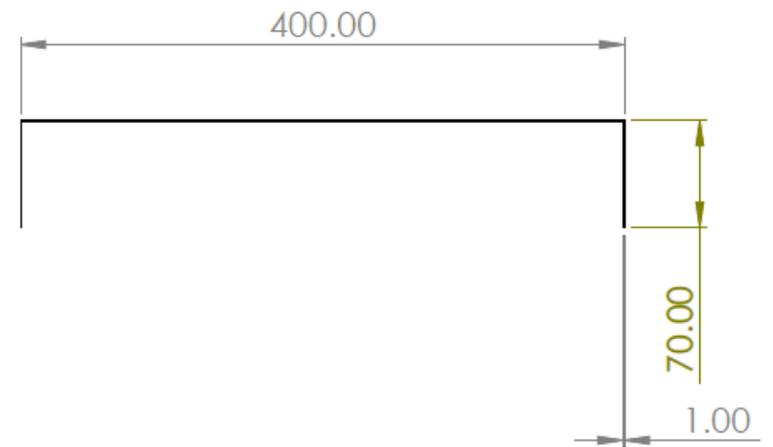
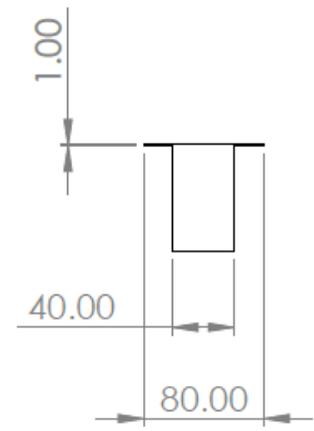
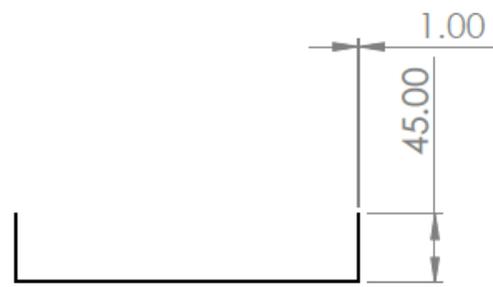
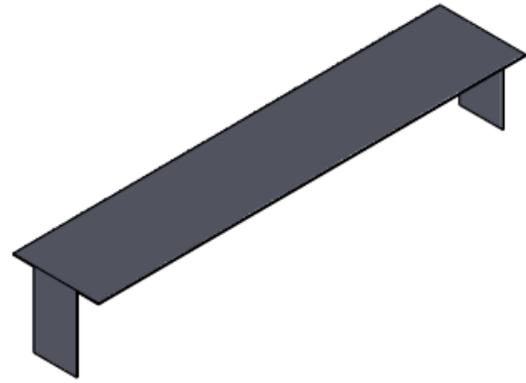
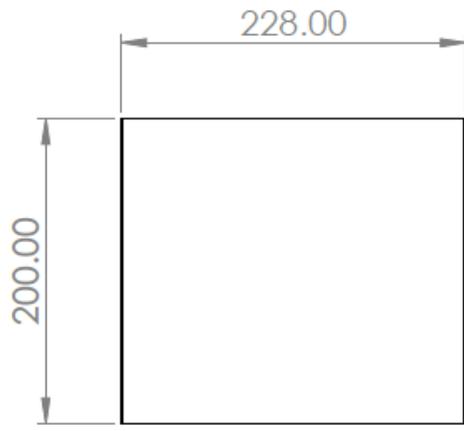


DETALLE A  
ESCALA 1 : 2

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:					
	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Carlos Rendon		22/1/2021		
	Gustavo Serrano				
APROB.	PhD. E. Delgado				
				MATERIAL:	
				PESO:	

NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
Centro de Desarrollo Tecnológico y Sustentable	
TÍTULO: <b>Horno de Biomasa</b>	
N.º DE DIBUJO	A4
ESCALA: 1:7	HOJA 1 DE 1

**Parrilla**



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL:  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

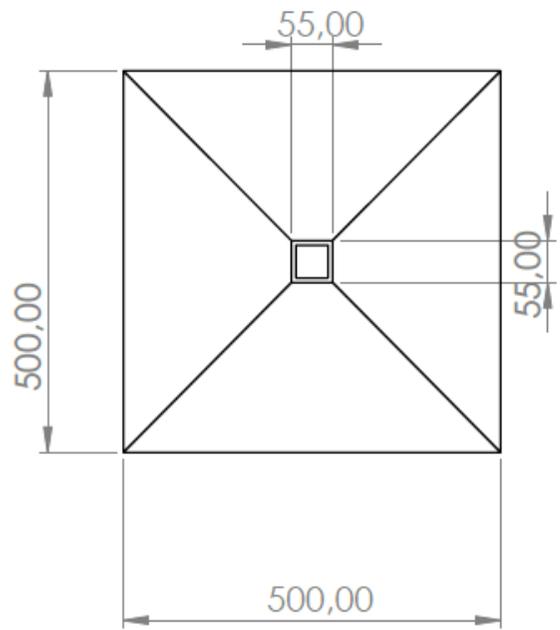
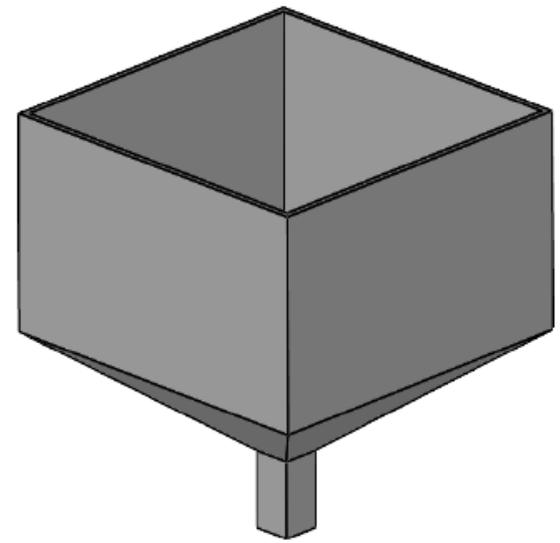
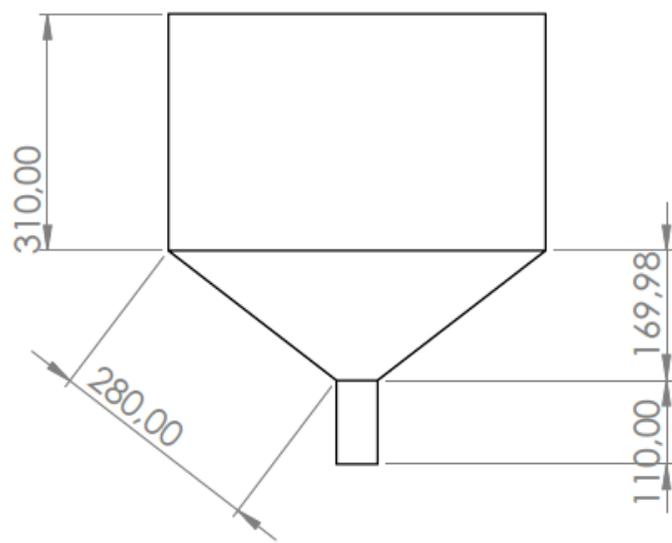
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Carlos Rendon		22/1/2021
	Gustavo Serrano		
VERIF.	PhD. E. Delgado		

NO CAMBIA LA ESCALA	REVISIÓN
Centro de Desarrollo Tecnológico y Sustentable	
TÍTULO: <b>Horno Biomasa</b>	
N.º DE DIBUJO Caja de Alimentacion y Baffle	A4
ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1

6 5 4 3 2 1

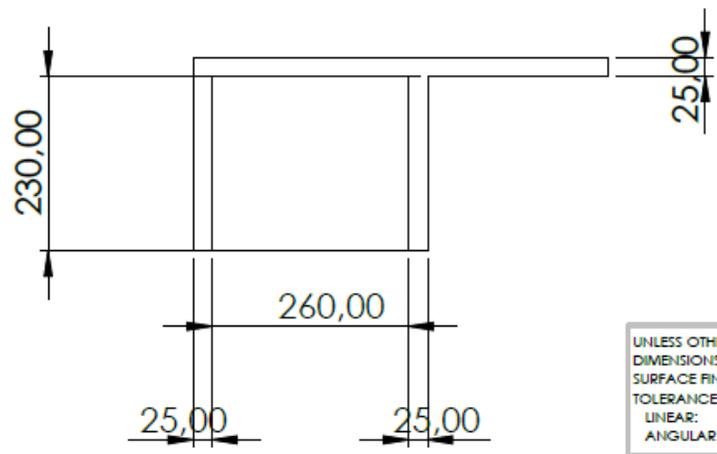
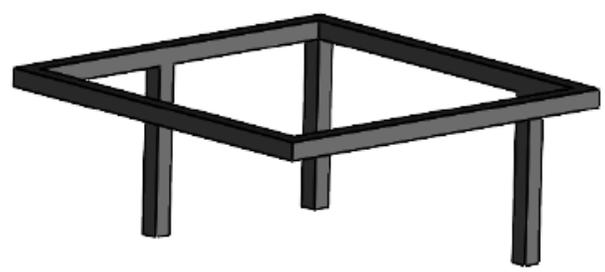
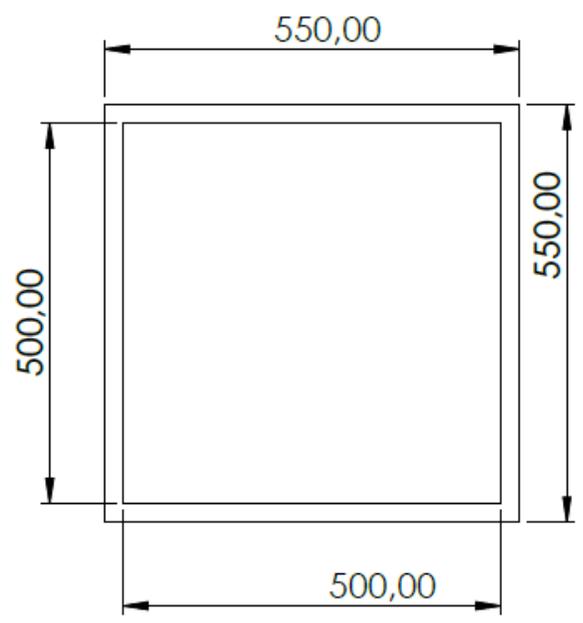
D  
C  
B  
A

D  
C  
B  
A

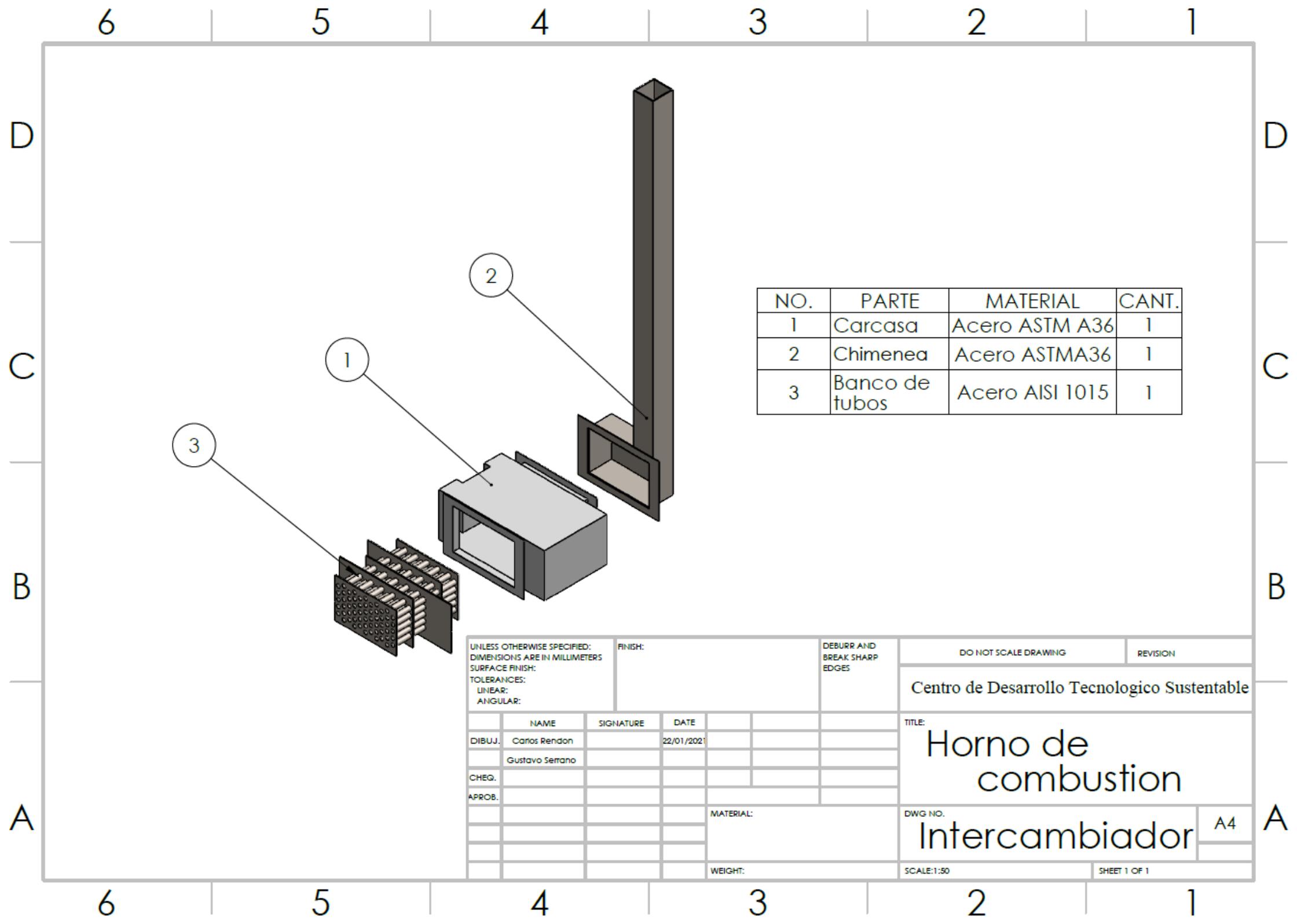


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
									TITLE: <b>Horno de combustion</b>	
									DWG NO. <b>Tolva</b>	
									A4	
					MATERIAL:		SCALE:1:10		SHEET 1 OF 1	
					WEIGHT:					

6 5 4 3 2 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DIBUJ			NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:		
			Carlos Rendon				22/01/2021		Horno de combustion		
			Gustavo Serrano								
CHEQ.									Base Tolva		
APROE											
							MATERIAL:		DWG NO.		A4
									SCALE:1:10		SHEET 1 OF 1
							WEIGHT:				



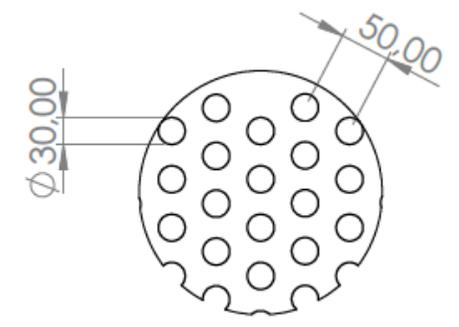
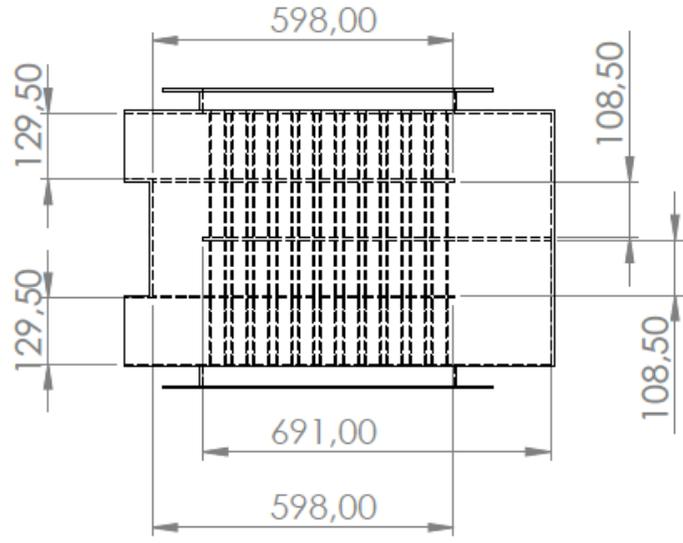
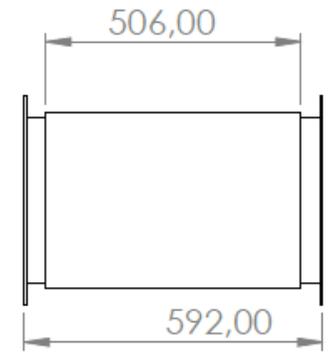
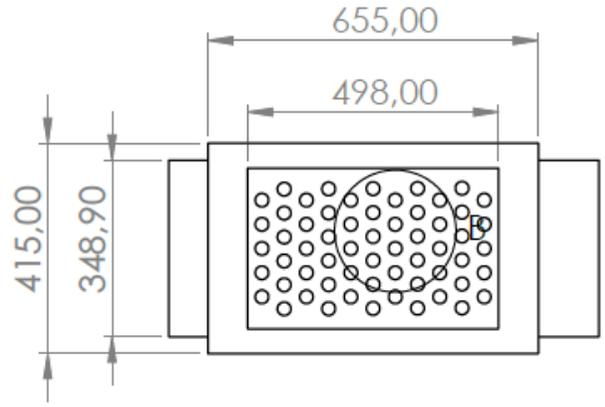
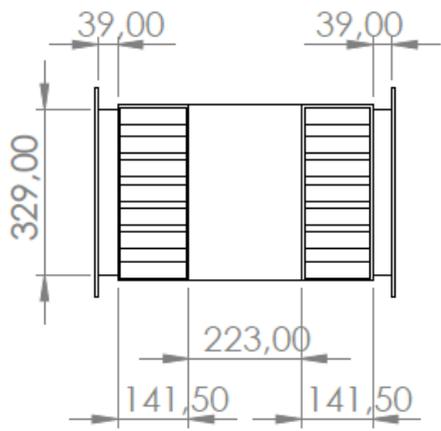
NO.	PARTE	MATERIAL	CANT.
1	Carcasa	Acero ASTM A36	1
2	Chimenea	Acero ASTMA36	1
3	Banco de tubos	Acero AISI 1015	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
							Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable				
							TITLE: <b>Horno de combustion</b>				
							DWG NO. <b>Intercambiador</b>				A4
							SCALE:1:50			SHEET 1 OF 1	
DIBUJ.			NAME		SIGNATURE		DATE				
			Carlos Rendon				22/01/2021				
			Gustavo Serrano								
CHEQ.											
APROB.											
							MATERIAL:				
							WEIGHT:				

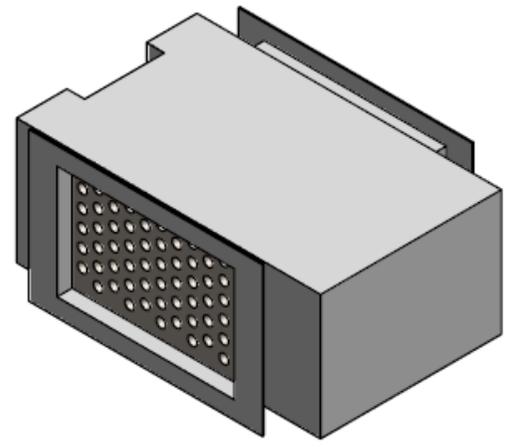
6 5 4 3 2 1

D  
C  
B  
A

D  
C  
B  
A

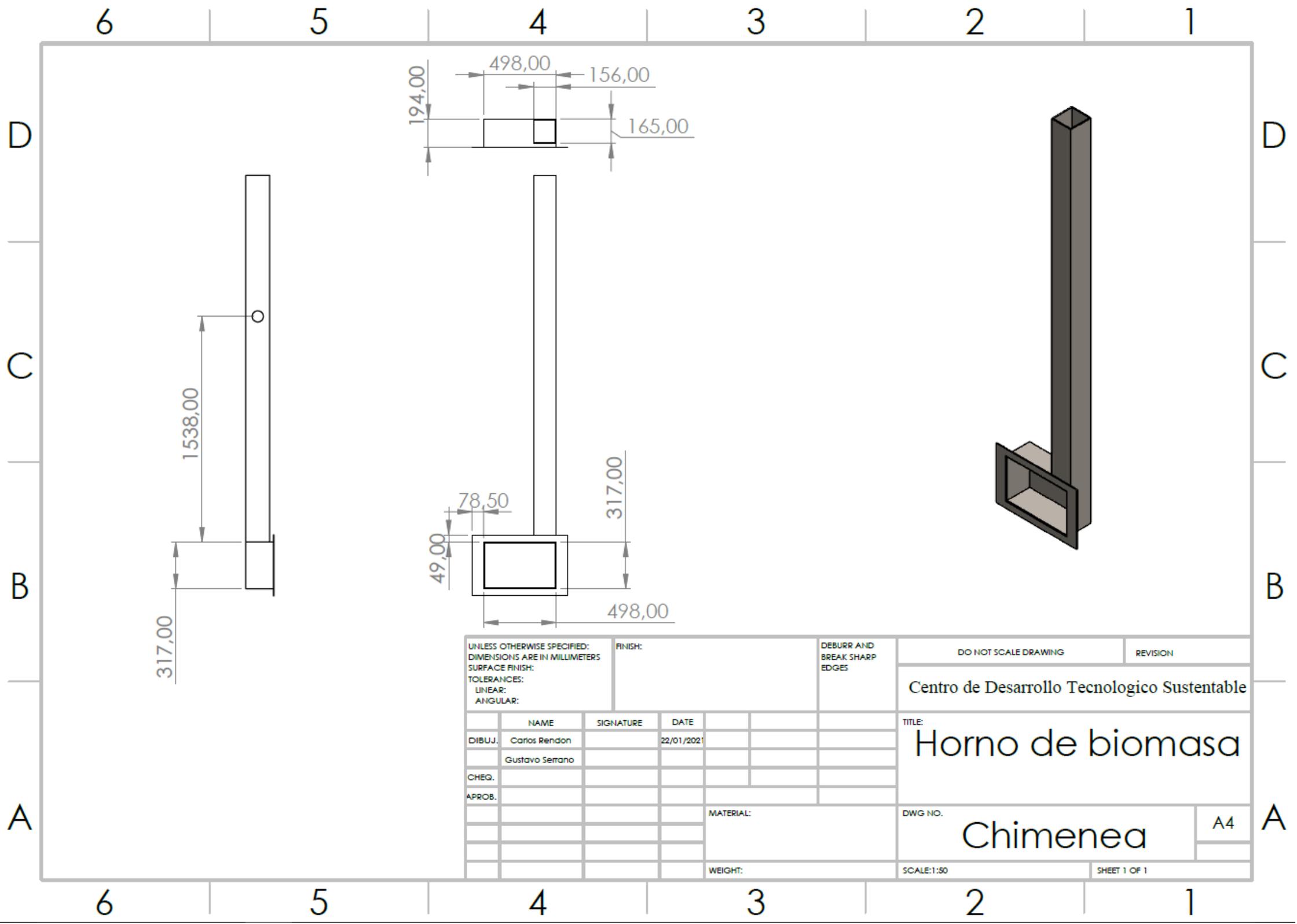


DETALLE B  
ESCALA 2 : 15



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
						Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable			
						TITLE: Horno de biomasa			
						DWG NO. Intercambiador		A4	
						SCALE:1:10		SHEET 1 OF 1	
DIBUJ		NAME		SIGNATURE		DATE			
		Carlos Rendon				22/01/2021			
		Gustavo Serrano							
CHEQ.									
APROE									
						MATERIAL:			
						WEIGHT:			

6 5 4 3 2 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
SURFACE FINISH:							Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable				
TOLERANCES:							TITLE: Horno de biomasa				
LINEAR:											
ANGULAR:											
	NAME	SIGNATURE	DATE								
DIBUJ.	Carlos Rendon		22/01/2021								
	Gustavo Serrano										
CHEG.											
APROB.											
					MATERIAL:		DWG NO.				
							Chimenea				
					WEIGHT:		SCALE:1:50		SHEET 1 OF 1		
									A4		