

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS**

**“Comportamiento energético de una estufa de leña con diseño propio basado en técnicas de gasificación”**

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como requisito para optar por el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

**Dennis Andrey Elizondo Montoya**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica  
2022

Este Trabajo final de Graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



---

Dennis Andrey Elizondo Montoya

Estudiante



---

Dr. Pedro Casanova Treto

Director, Trabajo Final de Graduación



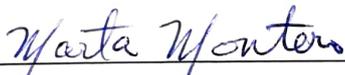
---

Dra. Kattia Solís Ramírez  
Miembro, Equipo Asesor



---

Ing. Geovanni Carmona Villalobos  
Miembro, Equipo Asesor



---

Dra. Marta Montero Calderón  
Presidenta, Tribunal Examinador



---

Dra. María José Rodríguez Vásquez  
Miembro, Tribunal Examinador

## **Dedicatoria**

---

A mi familia,  
porque a lo largo de mi vida  
siempre se han esforzado  
por darme las herramientas  
para construir un futuro mejor  
a pesar de las adversidades;  
en especial a mi madre y a mi padre,  
por guiarme por el camino  
del bien.

## Agradecimientos

---

Al equipo conformado por Pedro Casanova, Kattia Solís y Geovanni Carmona, por su ayuda, críticas, consejos y lecciones, gracias a esto fue posible culminar el proyecto.

A Gabriela Rojas, quien ha estado conmigo todo este tiempo y me ha ayudado a sobrellevar las dificultades.

Al personal del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, por permitir las condiciones para desarrollar este trabajo durante la pandemia. En especial, a Pedro Rojas por su cooperación y acompañamiento.

A Ricardo Quirós Loría del Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos y a Eduardo Rojas Rodríguez del Taller de Ingeniería Mecánica, por toda su colaboración.

A mis familiares, por brindar la ayuda necesaria y el soporte durante toda la realización del proyecto.

A todas mis amistades, por estar ahí siempre con palabras de apoyo. Gracias por todos los buenos momentos que hemos compartido, espero que los aprecien tanto como yo.

A la Universidad de Costa Rica y su sistema de becas, porque gracias a su cooperación pude realizar mi carrera universitaria.

## ÍNDICE GENERAL

---

ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	x
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Estufas alimentadas por biomasa .....	1
2 ESTADO DEL ARTE .....	4
2.1 Estufas mejoradas.....	4
2.1.1 Historia .....	4
2.1.2 Clasificación de las estufas biomásicas.....	7
2.1.3 Aspectos técnicos .....	9
2.2 Pruebas para la evaluación de estufas biomásicas .....	11
2.2.1 Prueba de ebullición de agua.....	12
2.2.2 Prueba de cocción controlada.....	13
2.2.3 Prueba de rendimiento en cocina.....	14
2.3 Combustibles biomásicos sólidos .....	15
2.3.1 Definición y composición .....	15
2.4 Conversión termoquímica .....	18
2.4.1 Combustión .....	20
2.4.2 Gasificación de biomasa.....	20
2.4.3 Procesos termoquímicos en estufas biomásicas .....	26
2.5 Materiales aislantes .....	32
2.6 Equipos auxiliares para la gasificación de biomasa.....	34

2.6.1	Preparación y manejo de la biomasa .....	34
2.6.2	Sistemas de transporte y alimentación .....	38
3	METODOLOGÍA.....	42
3.1	Estufa.....	42
3.1.1	Planteamiento del diseño.....	42
3.1.2	Dimensionamiento del reactor.....	44
3.1.3	Dimensiones del alimentador .....	45
3.1.4	Diseño computacional .....	45
3.2	Construcción .....	46
3.3	Biomasa.....	47
3.3.1	Acondicionamiento .....	47
3.3.2	Caracterización de biomasa.....	48
3.4	Evaluación del rendimiento de la estufa .....	52
3.4.1	Estufas utilizadas para comparación .....	55
3.4.2	Toma de datos .....	55
4	RESULTADOS .....	57
4.1	Diseño .....	57
4.1.1	Reactor de gasificación .....	58
4.1.2	Toma de aire principal.....	59
4.1.3	Toma de aire secundaria.....	60
4.1.4	Ducto perforado.....	61
4.1.5	Alimentador de biomasa.....	62
4.1.6	Cono quemador y soporte de olla.....	63

4.1.7	Cobertor.....	64
4.2	Construcción .....	64
4.2.1	Reactor.....	64
4.2.2	Ducto perforado.....	67
4.2.3	Rejilla .....	68
4.2.4	Toma de aire principal.....	69
4.2.5	Sistema de alimentación de biomasa.....	70
4.2.6	Toma de aire secundaria.....	74
4.2.7	Quemador y soporte de olla.....	77
4.2.8	Cobertor y aislamiento .....	79
4.2.9	Resumen de cambios en el diseño .....	83
4.3	Evaluación.....	84
4.3.1	Biomasa .....	84
4.3.2	Pruebas de ebullición de agua .....	85
5	CONCLUSIONES.....	101
6	RECOMENDACIONES .....	102
7	REFERENCIAS .....	103
8	ANEXOS.....	111
	ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
	RESUMEN.....	x
1	INTRODUCCIÓN.....	1

1.1	Estufas alimentadas por biomasa .....	1
2	ESTADO DEL ARTE .....	4
2.1	Estufas mejoradas.....	4
2.1.1	Historia .....	4
2.1.2	Clasificación de las estufas biomásicas.....	7
2.1.3	Aspectos técnicos .....	9
2.2	Pruebas para la evaluación de estufas biomásicas .....	11
2.2.1	Prueba de ebullición de agua.....	12
2.2.2	Prueba de cocción controlada.....	13
2.2.3	Prueba de rendimiento en cocina.....	14
2.3	Combustibles biomásicos sólidos .....	15
2.3.1	Definición y composición .....	15
2.4	Conversión termoquímica .....	18
2.4.1	Combustión .....	20
2.4.2	Gasificación de biomasa.....	20
2.4.3	Procesos termoquímicos en estufas biomásicas .....	26
2.5	Materiales aislantes .....	32
2.6	Equipos auxiliares para la gasificación de biomasa.....	34
2.6.1	Preparación y manejo de la biomasa .....	34
2.6.2	Sistemas de transporte y alimentación .....	38
3	METODOLOGÍA.....	42
3.1	Estufa.....	42
3.1.1	Planteamiento del diseño.....	42

3.1.2	Dimensionamiento del reactor.....	44
3.1.3	Dimensiones del alimentador.....	45
3.1.4	Diseño computacional.....	45
3.2	Construcción.....	46
3.3	Biomasa.....	47
3.3.1	Acondicionamiento.....	47
3.3.2	Caracterización de biomasa.....	48
3.4	Evaluación del rendimiento de la estufa.....	52
3.4.1	Estufas utilizadas para comparación.....	55
3.4.2	Toma de datos.....	55
4	RESULTADOS.....	57
4.1	Diseño.....	57
4.1.1	Reactor de gasificación.....	58
4.1.2	Toma de aire principal.....	59
4.1.3	Toma de aire secundaria.....	60
4.1.4	Ducto perforado.....	61
4.1.5	Alimentador de biomasa.....	62
4.1.6	Cono quemador y soporte de olla.....	63
4.1.7	Cobertor.....	64
4.2	Construcción.....	64
4.2.1	Reactor.....	64
4.2.2	Ducto perforado.....	67
4.2.3	Rejilla.....	68

4.2.4	Toma de aire principal.....	69
4.2.5	Sistema de alimentación de biomasa.....	70
4.2.6	Toma de aire secundaria.....	74
4.2.7	Quemador y soporte de olla.....	77
4.2.8	Cobertor y aislamiento .....	79
4.2.9	Resumen de cambios en el diseño .....	83
4.3	Evaluación.....	84
4.3.1	Biomasa .....	84
4.3.2	Pruebas de ebullición de agua .....	85
5	CONCLUSIONES.....	101
6	RECOMENDACIONES .....	102
7	REFERENCIAS .....	103
8	ANEXOS.....	111

## ÍNDICE DE CUADROS.

---

<b>Cuadro I.</b> Energía requerida para completar la prueba de ebullición de agua para las dos estufas biomásicas analizadas.....	92
<b>Cuadro II.</b> Resumen de eficiencia térmica obtenido en la prueba de ebullición de agua. ..	93
<b>Cuadro III.</b> Resumen de datos para cálculo de h interno. ....	96
<b>Cuadro IV.</b> Resumen de datos para cálculo de h externo.....	97
<b>Cuadro V.</b> Conductividad térmica de materiales analizados.....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS.

---

<b>Figura 2.1.</b> Estufas tradicionales.....	8
<b>Figura 2.2.</b> Procesos termoquímicos y sus productos. Adaptado de [43].....	19
<b>Figura 2.3.</b> Gasificador de flujo ascendente (izquierda) y gasificador de flujo descendente (derecha). Adaptado de [53]. ....	23
<b>Figura 2.4.</b> Diagrama de estufa gasificada de flujo ascendente, adaptado de [25]. ....	30
<b>Figura 2.5.</b> Algunas estufas gasificadas comerciales.....	31
<b>Figura 2.6.</b> Uso de material aislante en algunas estufas mejoradas.....	33
<b>Figura 2.7.</b> Algunos sistemas de secado de biomasa. Adaptado de [79]. ....	36
<b>Figura 2.8.</b> Sistema alimentador de tolva con bloqueo. Adaptado de [84].....	39
<b>Figura 2.9.</b> Sistema de alimentación con aletas rotativas. Tomado de [82]. ....	40
<b>Figura 2.10.</b> Diagrama de transportador de espiral. Adaptado de [88].....	41
<b>Figura 3.1.</b> Diagrama general de diseño de la cocina. ....	43
<b>Figura 3.2.</b> Mecanismo de regulación de admisión de aire. ....	44
<b>Figura 3.3.</b> Algunas de las herramientas más utilizadas. ....	46
<b>Figura 3.4.</b> Biomasa empleada.....	47

<b>Figura 3.5.</b> Preparación de biomasa.....	48
<b>Figura 3.6.</b> Proceso de determinación del contenido de humedad. ....	49
<b>Figura 3.7.</b> Cambio de densidad aparente de la leña triturada.....	51
<b>Figura 3.8.</b> Equipos para determinación del poder calorífico.....	52
<b>Figura 3.9.</b> Diagrama de la prueba de ebullición de agua. ....	53
<b>Figura 3.10.</b> Ollas utilizadas para las pruebas. ....	54
<b>Figura 3.11.</b> Estufas para comparación de eficiencia térmica mediante prueba de ebullición de agua. ....	55
<b>Figura 3.12.</b> Equipos de adquisición de datos. ....	56
<b>Figura 3.13.</b> Balanzas utilizadas en pruebas de ebullición de agua.....	56
<b>Figura 4.1.</b> Modelo general de la estufa gasificada. ....	57
<b>Figura 4.2.</b> Instalación de alimentador de biomasa. ....	65
<b>Figura 4.3.</b> Agujero del reactor para la admisión de aire secundario. ....	66
<b>Figura 4.4.</b> Colocación del marco de angular. ....	66
<b>Figura 4.5.</b> Construcción e instalación del tubo perforado. ....	67
<b>Figura 4.6.</b> Construcción e instalación de la rejilla. ....	68
<b>Figura 4.7.</b> Toma principal de aire.....	69
<b>Figura 4.8.</b> Construcción de la cubierta del alimentador. ....	71
<b>Figura 4.9.</b> Construcción de la espiral. ....	73
<b>Figura 4.10.</b> Dimensiones finales de la espiral. ....	73
<b>Figura 4.11.</b> Construcción de palanca.....	74
<b>Figura 4.12.</b> Construcción de la toma de aire secundaria. ....	75
<b>Figura 4.13.</b> Instalación de la toma de aire secundaria.....	76
<b>Figura 4.14.</b> Construcción del quemador.....	78
<b>Figura 4.15.</b> Soporte para olla.....	79
<b>Figura 4.16.</b> Construcción de la pared externa. ....	80
<b>Figura 4.17.</b> Construcción de pared piramidal.....	81
<b>Figura 4.18.</b> Instalaciones de aislante y pared externa. ....	82
<b>Figura 4.19.</b> Estufa gasificada construida.....	83

<b>Figura 4.20.</b> Pasadas de biomasa por la trituradora. ....	84
<b>Figura 4.21.</b> Leña utilizada en el fogón. ....	85
<b>Figura 4.22.</b> Montaje experimental de la prueba de ebullición de agua. ....	86
<b>Figura 4.23.</b> Resultados de eficiencia para las estufas evaluadas con la prueba de ebullición de agua (G: gasificada, F: fogón, L: GLP) en tres repeticiones. ....	88
<b>Figura 4.24.</b> Curvas de temperatura de la estufa gasificada (TC: termocupla). ....	89
<b>Figura 4.25.</b> Curvas de temperatura del fogón de ladrillos. ....	90
<b>Figura 4.26.</b> Curvas de temperatura de la plantilla de gas licuado de petróleo. ....	91
<b>Figura 4.27.</b> Energía consumida contra eficiencia térmica para las estufas estudiadas. ....	94
<b>Figura 4.28.</b> Red térmica para análisis de transferencia de calor en la estufa gasificada. ...	98
<b>Figura 4.29.</b> Imagen térmica de la estufa gasificada en operación. ....	100

## RESUMEN

---

Se diseñó un micro gasificador de flujo ascendente para biomasa residual de aserradero bajo convección natural, para ser utilizado en operaciones de cocción. La estufa gasificada se construyó con materiales estándar, como perfiles estructurales, para facilitar su replicación por potenciales usuarios. Se notó que la mayoría de las estufas gasificadas reportadas en la literatura funcionan con alimentación por lote; por lo tanto, una de las partes más importantes de este diseño fue satisfacer la necesidad de proveer alimentación continua durante la cocción, promoviendo periodos de uso prolongados.

El diseño de la estufa fue dependiente de la experimentación y adaptación, para lograr un producto funcional. En el proceso constructivo se utilizaron herramientas de taller como esmeriladora, soldadora, taladro, prensa de banco, entre otras. Además, las paredes de la estufa gasificada se cubrieron con manta cerámica, para reducir pérdidas de calor y la posibilidad de quemaduras durante el uso. Se realizaron evaluaciones mediante pruebas de ebullición de agua y recopilación de datos térmicos, tanto para la estufa gasificada como para otras dos estufas de referencias (fogón de ladrillos y plantilla de gas licuado de petróleo). La biomasa utilizada fue ciprés (*Cupressus lusitanica*), con poder calorífico inferior de  $15,15 \pm 0,09 \text{ MJ kg}^{-1}$  a un contenido de humedad (en base húmeda) de  $14,5 \pm 0,10 \%$ .

El análisis de transferencia de calor de las paredes de la estufa gasificada demostró que la eficiencia térmica teórica fue de 90 %; sin embargo, la prueba de ebullición de agua dio un resultado de eficiencia térmica de  $20,25 \pm 2,31 \%$ . La eficiencia térmica obtenida mediante las pruebas de ebullición de agua fue inferior a otras reportadas en la literatura. La comparación de la estufa gasificada con las otras dos estufas de referencia mostró que su eficiencia fue superior al fogón de ladrillos, pero menor a la plantilla de gas licuado de petróleo.

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Estufas alimentadas por biomasa

En la actualidad un tercio del total de la población mundial depende del uso de biomasa para cocinar sus alimentos, esto corresponde a 2500 millones de personas, para quienes la fuente energética más ampliamente utilizada proviene de la madera y el carbón. La utilización de biomasa en procesos de combustión tiene severas implicaciones sobre la salud, productividad y el ambiente [1], en consecuencia, las emisiones de la combustión generan anualmente la muerte de 3,8 millones de personas por afectaciones directas al sistema respiratorio y cáncer, afectando principalmente a mujeres y niños [2]. Este fenómeno se da principalmente en países en desarrollo donde el acceso a energía moderna para necesidades básicas de cocción, iluminación y potencia de bajo voltaje es limitado, América Latina forma parte de ese grupo, pero en especial se da en África Subsahariana y la India, donde el 90 % de la población depende de madera y carbón [3] [4]. Estos hechos sugieren que existe una necesidad de investigar sobre los procesos de transformación termoquímica con el fin de poder comprenderlos y generar alternativas más eficientes y beneficiosas en el uso de la biomasa.

Para reducir la contaminación del aire en los hogares lo ideal es la transición de combustibles sólidos a gas o electricidad, para proteger la salud de los usuarios; sin embargo, el panorama no está por cambiar en los años venideros dado a que esas opciones son económicamente inaccesibles o no se encuentran disponibles localmente [5]. Los procesos de combustión biomásica contienen cientos de compuestos tóxicos, efecto presente en estufas domésticas, que liberan material particulado, monóxido de carbono y compuestos cíclicos complejos, entre ellos destacan algunos de los más peligrosos conocidos por la ciencia: las policlorodibenzodioxinas y los policlorodibenzofuranos, comúnmente referidas como dioxinas y furanos; además de su alta toxicidad, estos compuestos tienen una tendencia de

acumularse en tejidos biológicos (como el cuerpo humano) durante tiempos estimados de 7 años [6]. La contaminación del aire se asocia a sintomatologías clínicas como asma, enfermedades cardiovasculares e incluso, decesos prematuros [5].

Una combustión perfecta solo produce dióxido de carbono y agua, pero los productos de la combustión incompleta, que es lo más común en estufas domésticas, son monóxido de carbono, metano y materia particulada, contribuyentes al cambio climático [7]. Durante el proceso de combustión de biomasa, algunas especies volátiles inorgánicas se liberan en forma gaseosa y dan lugar a la formación de materia particulada, como producto de una serie de complejas reacciones químicas y físicas; estos productos se caracterizan por causar serios problemas sobre el ambiente y la salud humana [8]. Sin embargo, las emisiones de los compuestos biomásicos dependen directamente de su composición y del método de combustión empleado [9].

En estufas de leña convencionales, el aprovechamiento de energía química de la biomasa es bajo, debido a la combustión incompleta. Actualmente se considera necesario que las estufas mejoradas cumplan con tres requisitos que las distinguen de las demás: 1) disminución de emisión y exposición a contaminantes en el aire; 2) reducción del consumo de combustible; y 3) seguridad durante su utilización [5]. Desde los años setenta múltiples programas apoyados por organizaciones no gubernamentales han impulsado la implementación de estufas mejoradas en zonas de déficit energético [4] [10], entre los tipos de estufas más usados destacan la *rocket* y los gasificadores de pequeña escala, referidas en este texto como estufas gasificadas.

La gasificación se presenta como un método novedoso para aplicaciones de cocción, principalmente desarrollados para ser alimentadas por lote [11]. Las estufas gasificadas pueden operar mediante convección natural o forzada, para lo cual es requerido la utilización de ventiladores que regulen el paso de aire, los mismos deben ser alimentados con algún tipo de energía, lo que puede representar una limitación dependiendo de los recursos disponibles del usuario.

La reacción de gasificación consiste en una transformación de combustible sólido a combustible gaseoso, similar a la combustión, porque se da calentamiento, secado y pirólisis del combustible. Se diferencia porque el agente oxidante se presenta de forma limitada, haciendo que los compuestos volátiles y carbono se oxiden parcialmente, posteriormente se genera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), que al pasar entre carbono a alta temperatura se reduce a monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) e hidrocarburos de cadenas pequeñas. Los productos se encuentran en fase gaseosa y se denominan gas de síntesis, su combustión libera energía en forma de calor que puede ser aprovechado para cocción [12].

Un aspecto positivo de las estufas biomásicas es la versatilidad en el uso de material combustible, porque se puede usar leña, considerada como el material preferible y superior, residuos agroindustriales y hasta boñiga. Sin embargo, la liberación de calor se ve influenciada por la composición de la biomasa, su tamaño de partícula y porcentaje de humedad [12]. El uso de las estufas biomásicas se adapta a los recursos biomásicos disponibles en una región en particular y, mientras aprovecha su contenido energético, también genera un manejo de los residuos, en caso de que los mismos representen un problema ambiental.

El objetivo general de esta investigación fue obtener una estufa de leña que funcione mediante gasificación para disminuir la contaminación y aumentar la eficiencia con respecto a las estufas de leña tradicionales. Para tal fin, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar una estufa de leña bajo el principio de gasificación para con ello lograr una alternativa a la estufa tradicional.
- Construir el diseño propuesto utilizando materiales y técnicas que minimicen el costo económico.
- Evaluar el prototipo de estufa para obtener la eficiencia térmica y comparar con una estufa tradicional.

## 2 ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 Estufas mejoradas

#### 2.1.1 Historia

El *Homo erectus pekingnensis* aprendió a utilizar el fuego hace unos cuatrocientos millones de años, este habitante de las cavernas vivió durante la primera era de hielo y gracias al desarrollo de destrezas vinculadas al manejo del fuego fue capaz de ahuyentar a los depredadores y calentar sus cuevas, para hacer perdurar su linaje [13]. Al principio el fuego no se utilizaba para cocinar los alimentos, fue hasta el Paleolítico tardío, hace aproximadamente cien millones de años, cuando se empezó a usar el calor para cocinar y conservar los alimentos, con el beneficio asociado de favorecer la digestión [14]. La habilidad del *Homo sapiens* para construir utensilios y utilizar el fuego a su favor fueron los precursores de la civilización humana, hace apenas 12 000 años se establecieron los primeros asentamientos directamente vinculados al surgimiento de la agricultura y al cambio de estilo de vida nómada a sedentario, seguido por un aumento sostenido de la población [15].

Originalmente se utilizaban las fogatas al aire libre con el combustible dispuesto en pirámide, esta técnica presenta la desventaja de favorecer la deriva de la llama, pérdidas de calor por la influencia del viento, bajo control de la intensidad del calor y, exposición del usuario al calor y al humo emanado por la combustión; pero su utilización era ventajosa dado que con el calor y el humo se podía conservar por más tiempo la carne y las llamas servían para ahuyentar a los animales [16]. Las fogatas tradicionales al aire libre corresponden a aquel arquetipo usado a través de miles de años, con características similares en distintas latitudes y que funciona bajo los mismos principios. Paulatinamente se fueron desarrollando recipientes que favorecieron los cambios en las técnicas de cocción, dando lugar a la implementación de fogatas resguardadas por piedras, que disminuían las pérdidas de calor y facilitaban la utilización de recipientes; después vinieron las fogatas resguardadas con estructuras de barro y la implementación de entradas secundarias de aire para favorecer la

combustión de materia volátil y emisión de gases de combustión. Las innovaciones antes mencionadas presentaban un efecto positivo sobre la eficiencia térmica de las estufas, pero no se tomaba ninguna medida para reducir los riesgos a la salud.

En países de África, Asia y América Latina las fogatas tradicionales han permanecido hasta la actualidad en las costumbres de los pueblos y los cambios se han visto restringidos por la economía local. En India durante el decenio de 1940, M.K. Gandhi y Vinoba Bhave promovieron la mejora del diseño de las estufas gasificadas con la implementación de chimeneas, para reducir la liberación de humo dentro de las casas de habitación en comparación con las fogatas abiertas [17]. Esta primera generación de estufas mejoradas empleaba el barro como material principal y se realizaban estructuras para varias ollas. Uno de los diseños más usados en India fue el de *Magan Chulha*, equipado con chimenea para sacar los gases de combustión y reguladores de metal para el aire de ingreso a la cámara de combustión [16]. La intención de esos primeros programas de diseminación de estufas mejoradas era mejorar la salud y el bienestar de las poblaciones rurales [18].

La segunda generación de estufas mejoradas surgió en el Sur de Asia, en el marco de la crisis petrolera de los años 70, cuando también empezó la preocupación debido a la deforestación y el tiempo excesivo que las poblaciones rurales invertían recolectando leña, labor recargada principalmente sobre mujeres y niños [17]. También en los años 70 se inició con programas de estufas mejoradas en la zona de Sahel, África, donde los problemas de la sequía fueron exacerbados por la desertificación, las causas de esos problemas ambientales fueron la expansión agrícola impulsada por la alza en la población, los requerimientos alimenticios de los animales domésticos y la demanda de madera como combustible [19].

Tras el terremoto de 1976 de Guatemala, parte de las estrategias de recuperación para la población fue la implementación de estufas mejoradas para reducir la carga asociada a la preparación de alimentos, este diseño se denominó *cocina Lorena* y para su construcción se utilizaba barro y arena. El diseño fue difundido por organizaciones no gubernamentales,

organizaciones internacionales y grupos religiosos, su popularidad aumentó rápidamente en Guatemala y otros países de América Central gracias al desempeño de la cocina [20].

En el decenio de los 80, el desarrollo de las estufas mejoradas se dio de acuerdo a programas de investigación con diseños basados en criterios de termodinámica, transferencia de calor, mecánica de fluidos y aerodinámica; la realización de pruebas normadas fue la herramienta con la que se evaluaron aspectos de eficiencia térmica y de consumo de combustible, ligados a la disminución de la deforestación y recolección de leña [15] [21]. Estos diseños se caracterizaron por la incorporación de componentes como túneles internos para el movimiento de gases de combustión, compuertas para regulación de aire, parrillas y chimeneas. Sin embargo, algunas personas usuarias manifestaron que algunos de esas partes no las usaban en sus estufas mejoradas tipo *Rohini*, porque durante la operación alcanzaban temperaturas elevadas que causaban quemaduras [22]. Los países donde se dieron los programas más grandes de implementación de estufas mejoradas fueron China e India. Desde inicios de los 80 hasta finales de los 90, en China, bajo el *Programa Nacional de Estufas Mejoradas*, se introdujeron casi veinte mil unidades, mientras que en India unos 60 diseños y más de 35 millones de estufas fueron financiadas con fondos públicos mediante el *Programa Nacional de Chulhas Mejoradas* [23] [24].

En India, la *Iniciativa Nacional de Estufas Biomásicas* fue lanzada en 2009, con el objetivo de equiparar el funcionamiento de las estufas biomásicas con el de otras fuentes como el gas licuado de petróleo [24]. A pesar de los esfuerzos realizados en países en vías de desarrollo para la implementación de estufas mejoradas, se estima que solo un 30 % de los usuarios tienen acceso a una [25]. Entre el año 1982 y 1992, en China se desarrolló un programa que concedió a poblaciones rurales 129 millones de estufas mejoradas, de las cuales se estima que en la actualidad siguen en uso unos 100 millones. Los objetivos eran proveer a las comunidades con estufas eficientes energéticamente y reducir la cantidad de humo en las casas con el uso de chimeneas [15]. En los años venideros la principal herramienta para cambiar este panorama es hacer más accesibles este tipo de estufas y lograr

educar a los usuarios acerca de las potenciales implicaciones sobre la salud y los beneficios energéticos de las estufas mejoradas.

### **2.1.2 Clasificación de las estufas biomásicas**

Los diseños tradicionales de estufas han evolucionado a lo largo de miles de años, por lo que están arraigados a las prácticas culturales de los distintos grupos sociales involucrados, las necesidades locales y el costo de su construcción, por dichas razones el diseño de nuevos sistemas mejorados debe ser accesible y aceptado socialmente, para que tecnologías como la gasificación sean adoptadas en diversas geografías [26]. Las estufas aquí consideradas como tradicionales incluyen las construidas con ladrillos, barro o simplemente piedras en el suelo, similares a las mostradas en la Figura 2.1 (a). Las estufas más usadas en comunidades rurales de países en vías de desarrollo suelen poseer estructuras que no están unidas y el fuego no es resguardado [25], haciendo que tengan menor eficiencia aprovechando la energía de la biomasa debido a la combustión incompleta; además, generan emisiones de partículas y compuestos que afecta la salud humana y ambiental [3]. Las estufas de barro son una opción mejorada del estilo tradicional, caracterizadas por ser una estructura semi-permanente que proporciona resguardo al fuego al menos en tres direcciones, como la de la Figura 2.1 (b), lo que favorece la disminución de pérdidas de calor por radiación [25]. Algunos ejemplos de estufas tradicionales mejoradas son las antes mencionadas *Chulhas*, *Lorena*, de India y Guatemala, respectivamente.



(a) Estufas de tres piedras. Adaptado de [27].



(b) Chulha. Adaptado de [28].

**Figura 2.1.** Estufas tradicionales

Las estufas mejoradas se diseñan bajo principios científicos en busca de proveer mejores condiciones de operación en cuanto a la combustión, transferencia de calor, reducción de emisiones y eficiencia de consumo de combustible, en comparación con las estufas tradicionales. Su construcción se hace con materiales metálicos, cerámica, ladrillos, entre otros, para que su vida útil sea mayor y requieran menor mantenimiento. A nivel centroamericano el desarrollo iniciativas para implementar estufas mejoradas fueron impulsadas por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) a

finales de los años 90, bajo la denominación de *cocinas ahorradoras* de combustión, dirigidas a población rural de zonas afectadas por sequías estacionales en Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica [29]. Actualmente, alrededor del mundo hay más de 160 programas dedicados a la promoción del uso de estufas mejoradas, principalmente en África e India [25].

Las estufas mejoradas se presentan como una alternativa para la mejora de las condiciones de salud al disminuir la contaminación de aire en interiores, promoción de uso más eficiente de fuentes energéticas y en consecuencia, menor impacto ambiental [25]. La mayor dificultad que presenta su diseminación es que los hogares rurales no se logran acostumbrar al uso de estufas mejoradas y también, dependiendo del tipo de estufa en cuestión, su aceptación es más difícil si tienen que pagar por el combustible, en vez de usar los productos disponibles localmente o, no poder darle el mantenimiento requerido [15].

### **2.1.3 Aspectos técnicos**

La utilización de estufas mejoradas busca reducir significativamente las emisiones, para resguardar la salud de los usuarios y hacer uso eficiente de los recursos biomásicos como fuente energética, para lograr contrarrestar la degradación de los bosques y su deforestación. Durante el diseño de cualquier estufa mejorada se debe considerar la seguridad, eficiencia, emisiones, vida útil y costo del equipo; para cumplir con esos aspectos se deben comprender los procesos de transferencia de calor presentes en los reactores de las estufas mejoradas, su diseño debe ser probado en laboratorio y en campo para evidenciar su comportamiento [15].

#### **2.1.3.1 Procesos termoquímicos en estufas de leña**

La combustión del combustible sólido promueve la liberación de su contenido energético en forma de calor sensible y luz, esto puede ser logrado mediante dos maneras: métodos convencionales de combustión directa o combustión indirecta, que requiere el uso

de tecnologías más avanzadas, como la gasificación, que primero convierten el combustible sólido en un combustible secundario que es quemado posteriormente, produciendo energía más limpia de forma más eficiente [30].

### **2.1.3.2 Transferencia de calor**

En las estufas de leña se dan las tres formas de transferencia de calor. La conducción se presenta en los materiales sólidos involucrados: el combustible, los recipientes, la estructura de la estufa, entre otros; la convección se manifiesta a través de gases, en este caso el aire de admisión, los productos generados a partir del proceso termoquímico y el aire circundante; las flamas producen radiación y por ese mismo mecanismo, a los alrededores a través de las superficies calientes de la estufa [31].

### **2.1.3.3 Materiales**

Los tres materiales de uso recurrente en estufas mejoradas son barro, metal y cerámica [32]:

- Con respecto al barro, se hace referencia específicamente a mezclas con arcillas empleadas en la construcción de estufas de dimensiones grandes y fijas. La principal ventaja que presenta es el bajo costo y que se requieren menos herramientas para su construcción, pero como desventaja tiene la fragilidad de la estructura y la posibilidad de que las gruesas paredes conduzcan una proporción considerable de energía [32].
- En referencia a los metales, el hierro colado es un metal que se puede utilizar, al poder ser moldeado en la forma deseada, tener costo bajo y larga duración; a pesar de esto, requiere de mano de obra calificada para desarrollar el moldeo y acabado adecuado para su uso en estufas biomásicas. El acero se puede usar como lámina o perfiles de distintos tipos, se adapta a procesos de doblado, remachado, uniones no

permanentes y soldadura, es más simple de manipular que el hierro colado. El aluminio no es recomendado porque tiene un punto de fusión bajo y es costoso.

- La cerámica es una materia prima de bajo costo y fácil adquisición, pero su procesamiento requiere pericia, porque debe ser expuesta a procesos de secado, para adquirir capacidad de soportar altas temperaturas sin presentar agrietamiento.

#### **2.1.3.4 Admisión de aire**

Se puede suplir el aire por convección natural o forzada. En el primer caso, el movimiento de gases se debe al diferencial de densidad promovido por la diferencia de temperaturas, mientras los gases fluyen simultáneamente transfieren energía a los alrededores (las paredes de la estufa y los elementos de cocción). La dinámica del flujo requiere que la geometría de la estufa favorezca el movimiento de gases [21]. La convección forzada favorece la turbulencia dentro del reactor, mejorando la mezcla de gases y agente oxidante, dando como resultado una combustión más completa y con menores emisiones, esto se refleja como una mejora en la eficiencia de la estufa [15].

La convección forzada puede ser utilizada en estufas mejoradas de combustión y de gasificación, permite utilizar combustible biomásico de mayor granulometría que en convección natural, por lo que se debe considerar durante el diseño [31]. Las estufas gasificadas operan exponiendo la biomasa a un proceso de secado, pirólisis y gasificación, la última parte del proceso libera los gases combustibles que son quemados al final del reactor donde entran en contacto con aire adicional (denominado aire secundario); se estima que con este método se puede ahorrar hasta 40 % de combustible y reducir las emisiones hasta en un 90 % en comparación con una estufa tradicional [33].

## **2.2 Pruebas para la evaluación de estufas biomásicas**

Existe una amplia diversidad de procedimientos para evaluar las estufas biomásicas, desde normas utilizadas a nivel internacional hasta las de aplicación local, utilizadas en

lugares donde el uso de estufas biomásicas es alto: Bolivia, India, Kenya, Sudáfrica, Zimbabwe, Indonesia, entre otros. A continuación, se presentan algunas de las pruebas internacionales de mayor uso en investigación.

### **2.2.1 Prueba de ebullición de agua**

La prueba de ebullición de agua busca determinar el rendimiento de la estufa en un ambiente controlado, corresponde a una simulación simplificada del proceso de cocción. Cuantifica cuán eficientemente una estufa biomásica aprovecha el combustible para ebullición de agua en un recipiente y opcionalmente, se pueden cuantificar las emisiones durante dicho proceso. Se emplea para la evaluación bajo condiciones altamente controladas con variabilidad reducida, permite comparar la efectividad de diversos diseños de estufas para la realización de una actividad similar, con este método se pueden evaluar las implicaciones de cambios durante el desarrollo de un diseño y así seleccionar los mejores atributos para realizar pruebas de campo.

La prueba de ebullición de agua se compone de tres etapas: alta potencia con inicio frío (Fase 1), alta potencia con inicio caliente (Fase 2) y ebullición a fuego lento (Fase 3). La Fase 1 se da con la estufa a temperatura ambiente y una masa conocida de agua a temperatura ambiente, colocada directamente sobre el medio de transferencia de calor útil del sistema, mientras se consume una cantidad conocida de combustible; esta fase termina una vez que el agua alcanza el punto de ebullición. Inmediatamente inicia la Fase 2, se ejecuta colocando una nueva masa de agua a temperatura ambiente sobre el medio de transferencia de calor de la estufa, hasta que alcance el punto de ebullición. La Fase 3 arranca desde el momento que el agua de la fase anterior ha iniciado la ebullición y se deja el sistema en esas condiciones durante 45 minutos más.

Los hallazgos más importantes que revela esta prueba son el consumo específico de combustible y las emisiones generadas, debido a su impacto negativo sobre la salud humana [34]. Para determinar el consumo de combustible se requiere un espacio resguardado del efecto del viento y equipo básico de laboratorio (cronómetro, balanza, termómetro digital, equipo para determinación de contenido de humedad en biomasa), pero para evaluar las emisiones se necesita de una capucha para recolectar los gases de combustión y equipos para sensor los gases liberados [12]. Para el análisis, se recomienda hacer al menos tres repeticiones.

Se debe considerar que los resultados obtenidos se dan en un ambiente controlado y bajo la operación de personal capacitado, además, se trata de una aproximación del proceso de cocción, por lo que no corresponde al mejor método para evaluar las condiciones de uso real en la preparación de comida, siguiendo las prácticas de cocción y utilizando los combustibles disponibles localmente [34]. Una alternativa adecuada para emplear la prueba de ebullición de agua, permitiendo comprender mejor el rendimiento de la estufa, es realizarla en paralelo con la Prueba de Cocción Controlada.

### **2.2.2 Prueba de cocción controlada**

La prueba de cocción controlada evalúa el rendimiento realizando la cocción de un platillo típico de la zona donde se evaluará la estufa; el rendimiento de la estufa se compara con el de la estufa tradicional empleada en la cocción de ese alimento. La prueba proporciona una estimación del consumo de combustible en una operación de cocción particular, el procedimiento varía de acuerdo a la comida a preparar, el diseño de la estufa y su operación [12].

Tiene la ventaja de dar resultados más confiables sobre el uso real en la cocción y su ejecución es simple, pero en sus resultados influyen más variables, a diferencia de la prueba de ebullición de agua. La prueba de cocción controlada debe ser realizada por una persona familiarizada con la preparación del platillo y la operación de la estufa. Los hallazgos de la

prueba de cocción controlada permiten tomar en consideración factores cualitativos del potencial usuario en referencia a la experiencia de utilización de la estufa. Los resultados obtenidos con esta prueba solo son representativos para un proceso, grupo social y ubicación geográfica particular, por lo que no pueden ser extrapolados. Requiere de más tiempo y recursos económicos, considerando la adecuación del diseño al objetivo planteado, instrucción de la persona usuaria acerca del funcionamiento de la estufa y adquisición de los alimentos a preparar

Los parámetros que mide la prueba de cocción controlada son la masa total de la comida preparada (medida al final de la cocción), masa de la ceniza remanente, cantidad de combustible consumida, consumo específico de combustible (razón de la comida preparada y el combustible empleado) y el tiempo de cocción total.

### **2.2.3 Prueba de rendimiento en cocina**

En el desarrollo de estufas biomásicas es importante la retroalimentación del usuario para asegurar que el diseño supla las necesidades locales y se adecuó a la disponibilidad de combustible, prácticas culturales y accesorios de cocina utilizados [34]. La prueba de rendimiento en cocina es una prueba de campo para evaluar cualitativamente los aspectos del rendimiento de la estufa mediante encuestas a nivel doméstico sobre la satisfacción del usuario; busca comparar el impacto de la estufa mejorada en los patrones de consumo de combustible en los hogares. Este tipo de pruebas se realizan en el hogar de la persona usuaria y cuando son realizadas adecuadamente arrojan los mejores resultados, en comparación con las mencionadas previamente; sin embargo, su realización es la más compleja de todas, en parte también porque son realizadas en el hogar y la incursión de equipo científico entorpece la dinámica de las actividades habituales.

El proceso de prueba incluye una fase de selección de los hogares que participarán en la encuesta, si se trata de un grupo pequeño es pertinente realizarla a todos los hogares, pero si es más grande (más de cien hogares), entonces se realizan las encuestas al 10 % de la

población. La encuesta en cuestión comprende una sección preliminar de recopilación de información personal del entrevistado y las actividades relacionadas al consumo de combustibles para cocción; posteriormente se otorga la estufa mejorada al grupo y tras un determinado periodo de utilización se ejecuta otra encuesta de seguimiento tras la implementación de la estufa mejorada.

## **2.3 Combustibles biomásicos sólidos**

### **2.3.1 Definición y composición**

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes energéticas renovables predominantes en el mundo; residuos agrícolas y leñosos son empleados por cerca de un 40 % de la población mundial como fuente de energía para cocción, principalmente en países en vías de desarrollo [3]. Corresponde a un biopolímero natural compuesto principalmente por moléculas de celulosa, hemicelulosa y lignina, interconectadas por enlaces éster, éter y puentes de hidrógeno [35]. Las fuentes de biomasa más baratas son los residuos del procesamiento agroindustrial, desechos de aserraderos y fábricas de papel; sin embargo, su disponibilidad es limitada y depende de la producción [36].

El manejo apropiado de la biomasa la puede posicionar como un recurso energético renovable y sostenible, dado que, en comparación con combustibles fósiles, tiene el potencial de reducir las emisiones netas de carbono, lo que en consecuencia, disminuye la emanación de gases de efecto invernadero [36]

Pese a que existe gran variedad en la clasificación de la biomasa, para el estudio de las estufas biomásicas son de interés la madera y productos leñosos, así como la biomasa herbácea y residuos del procesamiento agroindustrial [37]. En general, la biomasa leñosa se caracteriza por una alta densidad aparente, alto valor calorífico, bajo contenido de humedad y de cenizas; mientras que los productos no leñosos (residuos agrícolas, de origen animal, residuos sólidos y urbanos) poseen menor densidad aparente, mayor contenido de cenizas,

mayor humedad y menor valor calorífico [9]. En la mayor parte de países en vías de desarrollo se utilizan los residuos agrícolas como material combustible, debido a su alto contenido de materia volátil y su alta disponibilidad, a pesar de que sus características son deficientes en comparación con los materiales leñosos [9].

La composición de la biomasa es altamente heterogénea, debido a la extrema variación de la humedad, contenido de cenizas y aspectos genéticos [37], aunado a ello, su composición puede variar debido a la ubicación geográfica, la fuente, su variedad y la época del año en que se obtiene [9].

En comparación con otras fuentes energéticas biológicas como los almidones (yuca, maíz, cebada) y azúcares (caña de azúcar, remolacha azucarera), la biomasa lignocelulósica posee una composición más compleja y heterogénea [38]. La composición de la biomasa determina la tecnología de conversión energética adecuada y su eficiencia, en el caso de gasificación, el proceso termoquímico se ve afectado por altos contenidos de cenizas, debido a que generan disminución en la tasa de conversión y daño general en los equipos a causa de la formación de recubrimientos, por lo que aumenta la necesidad de mantenimiento [38].

### **2.3.1.1 Principales biomásas disponibles en Costa Rica**

Como parte de los objetivos estratégicos del Plan Nacional de Energía 2015-2030 se estableció: “Diversificar las fuentes de energía para la producción de electricidad”, en este apartado se insta a la utilización de energías renovables no convencionales y menciona la necesidad de realizar una cuantificación del inventario de biomasa disponible para tal fin, en ese mismo enfoque, se logró establecer que el potencial energético de la biomasa ronda los 122 MW [39]. Esta necesidad surge porque 80 % de la energía demandada en el país corresponde a petróleo, producto importado de otras latitudes y que genera dependencia y susceptibilidad a cambios de los mercados internacionales [40].

En el año 2015, el aporte de la biomasa a la matriz energética nacional fue de cerca de 16,5 %, porcentaje del cual casi dos terceras partes correspondían a consumo de biogás, mientras que la leña constituyó la fracción restante [41]. Los residuos agrícolas orgánicos son producidos por el sector agroindustrial, que a su vez consiste en el mayor consumidor a nivel nacional de biomasa para aplicaciones energéticas, principalmente en la generación de calor de proceso y energía eléctrica; entre las biomásas que destacan en este uso se encuentran el bagazo de la caña de azúcar y, el coquito de palma y su mesocarpio [42]. Las biomásas más utilizadas son: cascarilla de café, residuos de arroz y palma aceitera, leña y bagazo de caña, su disponibilidad varía de acuerdo a la zona y sus tendencias de producción. Algunos productores de biocombustibles y biomásas en el país, alineados con el Plan Nacional de energía 2015-2030 son: Agronegocios Central Azucarera Tempisque (CATSA), Coopeagropal R.L., Cooperatarrazú, Eco Energetics, Ingenio Taboga y Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA) [39].

Sin embargo, también existen biomásas que no son aprovechadas y además, representan un problema ambiental, debido a la falta de manejo adecuado. Los residuos agrícolas orgánicos generados en mayor cantidad provienen del producción de café, caña, piña, palma aceitera, banano y aserraderos [42]. La industria forestal de Costa Rica ha presentado una tasa de crecimiento anual promedio de 3,7 %, entre los años 2000-2012, esta industria tiene un nexo directo con el sector de aserraderos, mismo que produce varios residuos agrícolas orgánicos: aserrín, leña y burucha, principalmente; se puede contemplar su eventual vinculación con procesos de producción energética, de acuerdo a la disponibilidad de residuos y su costo de venta [42]. De acuerdo a diversas tasas de crecimiento anual promedio para el sector de aserraderos entre los periodos 2000-2012 y 2006-2012 y con estimación para el año 2016, la producción de biomasa seca fue de entre 254,209 toneladas y 213,506 toneladas, mientras que la energía primaria correspondería a 4702,9 TJ y 3949,9 TJ, para cada caso respectivamente [42]. Se estima que por año en Costa Rica se cosechan más de 8000 hectáreas de plantaciones forestales [39]. Uno de los principales desafíos que enfrenta este sector se aborda en el Plan Nacional de Desarrollo

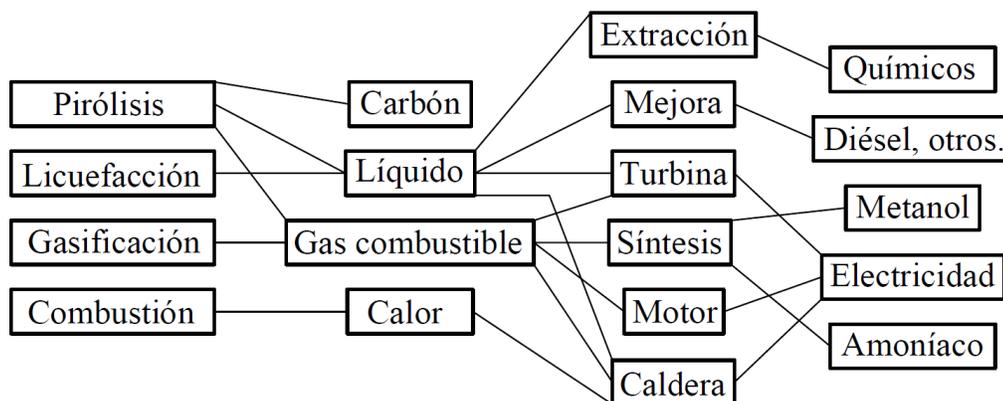
Forestal 2011-2021, se trata del fomento a una producción de energía limpia a partir de biomasa forestal y el desarrollo de un mercado competitivo [39]. El aprovechamiento de la biomasa residual del sector forestal contribuye a la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

## **2.4 Conversión termoquímica**

La biomasa representa cerca del 14 % de la demanda de energía primaria a nivel global y se posiciona como la cuarta fuente energética más grande en el mundo [43]. La bioenergía puede ser obtenida mediante dos tipos de procesos: termoquímicos y bioquímicos; cada uno de ellos trata distintos tipos de biomasa, de forma general se considera que la biomasa lignocelulósica es adecuada para transformación termoquímica, mientras que la biomasa húmeda y fermentable es apta para procesos biológicos o bioquímicos.

La conversión termoquímica transforma biomasa gracias al efecto de la temperatura y la mediación de múltiples reacciones químicas para generar los productos energéticos deseados, ellos pueden ser empleados como fuente de energía, combustibles líquidos y productos químicos; la combustión directa genera energía térmica, mientras que mediante gasificación se puede obtener energía térmica y una mezcla de gases inflamables denominada gas de síntesis, por su parte, la pirólisis puede ser usada para la obtención de carbón y otros productos [3]. Los procesos de transformación termoquímica de la biomasa son versátiles en cuanto al tipo de materia prima que pueden aceptar, por lo cual es adaptable a distintos tipos de biomasa, asimismo se caracterizan por proporcionar diversos productos con alta eficiencia [44]. En la Figura 2.2 se puede observar un resumen de los distintos procesos de transformación termoquímica, sus productos energéticos intermedios, aplicaciones y productos finales potenciales. El factor que determina si se trata de un proceso de combustión, gasificación o pirólisis es la relación equivalente: el cociente del contenido de oxígeno ( $O_2$ ) en el agente gasificante y el oxígeno requerido para la combustión estequiométrica completa del combustible; para combustión se maneja 1 o superior,

gasificación generalmente entre 0,25-0,35, porque genera los mejores resultados de composición de gas de síntesis y reducción de alquitranes [45].



**Figura 2.2.** Procesos termoquímicos y sus productos. Adaptado de [43].

Los productos de la transformación termoquímica se dividen en una fracción volátil, compuesta por gases, vapores y alquitranes, y la fracción de sólidos, que corresponde al residuo sólido rico en carbono [46]. Las distintas técnicas de procesamiento de la biomasa hacen énfasis en los subconjuntos de reacciones del amplio espectro de mecanismos químicos mediante los cuales la biomasa se convierte a productos primarios, dando origen a los productos finales de acuerdo a procesos de transformación posteriores [47].

Los compuestos inorgánicos en la biomasa son perjudiciales para ambas rutas de transformación termoquímica, su presencia propicia la corrosión de los equipos, acumulación de partículas en superficies, desactivación de catalizadores y aglomeraciones en el lecho del reactor [48]. En los procesos de transformación termoquímica la eficiencia de la conversión se ve influenciada por múltiples factores, entre ellos las características de la biomasa, el diseño del reactor y las condiciones de reacción [44].

La gasificación ofrece ventajas sobre otras rutas de transformación termoquímica debido a la flexibilidad en la alimentación y en el producto a obtener; se pueden utilizar productos ricos en carbono como residuos sólidos urbanos y municipales, y biomasa, mientras que el gas de síntesis se puede procesar para generar distintos productos [43].

### 2.4.1 Combustión

La combustión es el proceso más importante para la producción de energía, este consiste en una reacción química exotérmica en cadena, que para darse requiere necesariamente de tres factores: calor, agente oxidante y combustible. La combustión del combustible sólido promueve la liberación de su contenido energético en forma de calor sensible y luz [30].

En la combustión completa, un compuesto reacciona con un agente oxidante, como el oxígeno, vapor de agua o aire, y los productos liberados se conforman por los elementos iniciales, pero son acompañados de un elemento oxidante; el proceso de combustión de biomasa da lugar al secado y pirólisis, en presencia del agente oxidante [49].

La reacción estequiométrica típica de la combustión de biomasa se rige por la siguiente ecuación [49]:



La aplicación más básica de la combustión es en operaciones de cocción, principalmente en zonas rurales donde hay mayor disponibilidad de biomasa. En contraste, otra de sus aplicaciones es para alimentar calderas de alta presión empleadas para la generación de energía.

### 2.4.2 Gasificación de biomasa

La gasificación es una conversión termoquímica de materiales sólidos o líquidos a combustible gaseoso, a través de un proceso mediado por la adición de un agente oxidante a alta temperatura, este puede ser aire, vapor, oxígeno, dióxido de carbono o mezclas de los anteriores; los materiales empleados para la gasificación deben tener un alto contenido de carbono, como por ejemplo: carbón, biomasa, coque, entre otros [50]. Se puede ver como la transformación de la energía solar almacenada por las plantas en sus tejidos, por lo que se

considera una fuente energética sostenible, puesto que el CO<sub>2</sub> liberado fue previamente fijado por los organismos que formaron la biomasa empleada en el proceso [51].

El proceso de gasificación es similar a la combustión cuando se emplea aire o oxígeno; sin embargo, la principal diferencia entre ambos procesos es que la combustión tiene como propósito la generación de calor, mientras que la gasificación genera un gas compuesto por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno, metano, dióxido de carbono y nitrógeno, el mismo puede ser utilizado para varios fines: liberación de energía calórica, potencia y producción de otros compuestos químicos [43][50]. En contraste con la combustión, que emplea aire en exceso, los procesos de gasificación se dan bajo una atmósfera con el suplemento de oxígeno controlado, generalmente entre un 25 % - 35 % de la cantidad requerida teóricamente para la combustión completa, estas condiciones producen que se genere calor y gas conforme el material carbonoso es consumido [52][45]. A raíz de esto, es que la relación equivalente es uno de los factores con mayor peso en cuanto al desempeño global de la gasificación. La reacción de gasificación consiste en varias etapas con un rango de temperaturas entre 700 °C y 1300 °C, en las que se puede señalar el calentamiento del material combustible y su secado (etapa se da sobre los 100 °C), pirólisis, reducción (entre 300 °C y 600 °C) y oxidación (entre 700 °C y 1500 °C), gasificación y combustión del gas [53].

Previo a la gasificación, la biomasa debe ser preparada según corresponda, para adecuarse al reactor y sus condiciones de operación, se toma en cuenta si se requiere densificación o molienda de la biomasa, también se considera el porcentaje de humedad en las muestras, porque entre mayor sea dicho parámetro, el proceso de gasificación se ve perjudicado, debido al consumo de energía en la vaporización del agua, además de la posible condensación de agua en el reactor. Las consideraciones previamente mencionadas son algunas de las que desencadenan problemas en la puesta en marcha de procesos de gasificación [54]. El contenido de humedad de la biomasa afecta directamente su poder calorífico, de manera que entre mayor sea la humedad, el poder calorífico inferior (útil) se ve

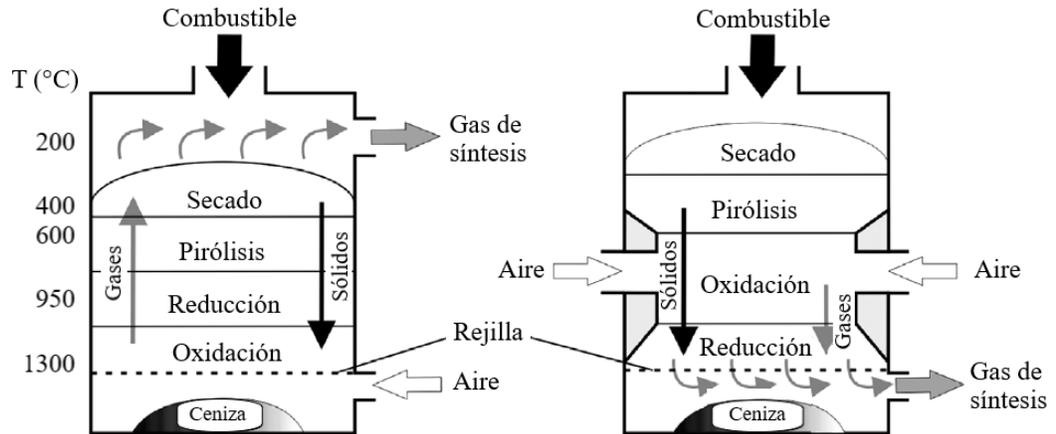
disminuido. El tamaño de partícula se relaciona con su área superficial, parámetro que aumenta conforme menor sea el volumen de la partícula.

Existen diferentes tipos de gasificadores con múltiples clasificaciones, entre ellas de acuerdo a su fuente de calor: alotérmica o autotérmica; tipo de agente oxidante: aire, oxígeno, vapor o mezclas; tipo de lecho: fijo, fluidizado o de flujo de arrastre; y de acuerdo a la presión, sea atmosférica o presurizada [53]. Los gasificadores se distinguen por la dirección del flujo de agente gasificante, sea hacia arriba o hacia abajo, lo que se define como un flujo ascendente o descendente, respectivamente. Los gasificadores usualmente son alimentados en su extremo superior y la reacción se desarrolla sobre un lecho fijo de biomasa, ocurre por zonas de acuerdo con el rango de temperatura, tal como se ilustra en la Figura 2.3.

Los tipos de gasificadores también tienen diferencias en su rendimiento. Se dice que los de flujo ascendente se adecúan a combustibles de baja calidad y sin gran injerencia del tamaño, con la desventaja de que el gas de síntesis acarrea gran contenido de alquitrán y partículas, debido a que el gas al atravesar el lecho de combustible en las zonas de pirólisis recoge alquitrán y al pasar por las zonas de secado atrapa partículas [53]. Estos efectos se ven disminuidos en los gasificadores de flujo descendente, donde los gases de pirólisis tienen que atravesar una zona de reducción, por lo que los alquitranes son descompuestos térmicamente o oxidados en la zona de oxidación, por tanto el contenido de alquitranes se reduce [53].

En general, la gasificación con aire produce gas de síntesis con poder calorífico inferior entre  $3 \text{ MJ m}^{-3}$  a  $6,5 \text{ MJ m}^{-3}$  y con mezcla vapor/oxígeno el poder calorífico inferior está entre  $12 \text{ MJ m}^{-3}$  a  $17 \text{ MJ m}^{-3}$ , estas diferencias también se manifiestan como composiciones químicas particulares [53]. Se considera gas de síntesis con bajo poder calorífico en el intervalo entre  $3,5 \text{ MJ m}^{-3}$  a  $10 \text{ MJ m}^{-3}$  y poder calorífico medio, lo comprendido entre  $10 \text{ MJ m}^{-3}$  a  $20 \text{ MJ m}^{-3}$  [52]. El poder calorífico del gas de síntesis también varía con respecto al tipo de gasificador a usar, de forma general se ha establecido que en flujo ascendente se

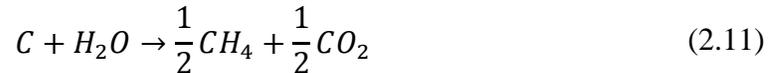
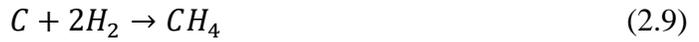
obtiene gas hasta con  $9 \text{ MJ m}^{-3}$ , mientras que en flujo descendente hasta  $13 \text{ MJ m}^{-3}$ , en ambos casos empleando mezcla vapor-oxígeno como agente gasificante [55].



**Figura 2.3.** Gasificador de flujo ascendente (izquierda) y gasificador de flujo descendente (derecha). Adaptado de [53].

El proceso de gasificación alimentado por biomasa inicia con la descomposición de celulosa, hemicelulosa y compuestos lignínicos, lo que genera producción de carbón y gases volátiles [50]. La gasificación está mediada por una serie de reacciones químicas, mostradas en seguida, de manera simplificada:





Lo que ocurre primero es la reacción de pirólisis (2.2), en la que la biomasa se descompone en forma de alquitrán y gases hidrocarburoados volátiles con trazas de hidrógeno, como consecuencia de los cambios térmicos que dan lugar al secado y la producción de carbón [52]. Las reacciones (2.3) y (2.5) corresponden a la fase de oxidación, mediada por la presencia de oxígeno; además, la mayor parte del oxígeno que ingresa al reactor es consumido en estas reacciones [52]. Las reacciones (2.3) y (2.4) son exotérmicas, lo que en consecuencia permite el proceso de secado de la biomasa y brinda la energía para romper enlaces químicos, como parte de la pirólisis [43]. La gasificación se da por las reacciones endotérmicas (2.6) y (2.7), esas son denominadas *reacciones agua-gas*, cuyo producto principal es la producción de H<sub>2</sub> [52]. Con respecto a la (2.10), se denomina reacción de metanización, ocurre lentamente a bajas temperaturas en la ausencia de catalizadores [52].

Dicha reacción es reversible y su dirección depende de factores como la temperatura, presión y concentraciones de reactivos en el sistema [43]. La reacción (2.11) es poco dependiente de la temperatura, lo que sugiere que se pueda dar la gasificación con poca transferencia de calor, pero la concentración de productos no es tan alta como las reacciones (2.7) y (2.8) [52].

Como todos los procesos bioenergéticos, la gasificación genera algunos subproductos: carbón, ceniza y alquitrán. El carbono fijo y las cenizas son los subproductos generados por la materia no vaporizada en la pirólisis [56]. El reciclaje de dichas materias es importante para añadir valor a las tecnologías de gasificación, en cuyo caso particular debido al régimen de temperaturas, las cenizas contenidas en el material carbonoso salen del proceso en forma sólida, y como ha sido históricamente, pueden ser empleadas como fertilizante mineral en suelo, en función de la composición química de los materiales [57]. Uno de los mayores problemas de la gasificación de biomasa es el manejo del alquitrán producido, su formación es un indicador de reducción en la eficiencia de gasificación debido a que implica que menor cantidad de materia se convierte gas de síntesis; el mismo se constituye por una mezcla de hidrógeno condensable, anillos aromáticos y complejos hidrocarburos aromáticos policíclicos [50]. Los alquitranes se condensan en componentes fríos del sistema (ductos, tuberías, entre otras), dificultan la limpieza de los sistemas y el costo asociado a su manejo es alto; pero en ciertos sistemas el alquitrán es tolerable, específicamente en aquellos donde el gas de síntesis es usado como combustible en un quemador, en esos casos el contenido energético del alquitrán se suma al del gas de síntesis [56].

En cuanto al diseño de gasificadores, es importante conocer cuál es la tasa específica de gasificación, este parámetro determina la necesidad de gas de síntesis para cumplir con un requerimiento energético específico [58]. Por supuesto influye la composición del gas de síntesis, las características de la biomasa y la geometría del reactor; sin embargo, existen algunas relaciones derivadas de múltiples estudios, como el que se muestra a continuación.

### **2.4.3 Procesos termoquímicos en estufas biomásicas**

Una estufa biomásica consiste en una estructura que contiene aire y combustible para la liberación de energía dirigida hacia la cocción de un alimento, proceso que consiste en la aplicación de calor para modificar la composición de los alimentos, de forma que se aumenta su sabor, consistencia, digestibilidad y vida útil; además, es una operación básica para reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por alimentos [59]. Se estima que el requerimiento energético para preparar alimentos en el hogar es de  $7 \text{ MJ kg}^{-1}$ , mientras que para recalentar se requieren hasta  $2 \text{ MJ kg}^{-1}$  [60]. También se ha estimado que la cocción de alimentos para una familia de seis miembros corresponde a  $15,8 \text{ MJ}$  [61].

En las zonas rurales la mayor demanda energética en los hogares corresponde a las actividades de preparación de alimentos, principalmente utilizando combustibles biomásicos como leña y residuos de cultivos [62]. La utilización de estos recursos en la combustión presenta efectos negativos directamente sobre la salud de los usuarios, debido a la contaminación del aire y la exposición al calor, también genera contaminación ambiental y otros efectos indirectos como la erosión de suelos y deforestación [62]. El uso de combustibles biomásicos también ha fomentado un patrón social de recarga de labores del hogar sobre las mujeres, porque ha sido culturalmente aceptado que sean ellas las responsables de suplir esta necesidad energética [62].

Estudios desarrollados en África Subsahariana han demostrado que la principal fuente de energía para las comunidades son los sistemas agroforestales, de donde se obtiene la leña [26]. Como se mencionó antes, las principales encargadas de recolectar la biomasa son las mujeres, en el caso de ciudades como Kibugu y Embu, en Kenia, la recolección de leña implica recorrer distancias de ocho kilómetros, en promedio; dicha tarea toma entre dos y cuatro horas y cuya carga promedio ronda los  $59 \text{ kg}$ , la misma puede durar como máximo una semana [26]. En contraste, en países como Sri Lanka se reportan consumos mensuales de  $47,8 \text{ kg}$  [63]. Indistintamente de la cantidad de biomasa requerida, su recolección conlleva un gran esfuerzo y ha sido demostrado que la eficiencia de las estufas de leña tradicionales

es de aproximadamente un 10 %, por lo que surge la necesidad de buscar alternativas más eficientes [63].

En el estudio desarrollado por Northcross, Katharine Hammond, Canuz y Smith [6] se midió que la concentración de dioxinas y furanos en el aire durante la cocción de alimentos con fogatas es de  $0,032 \pm 0,007 \text{ ng m}^{-3}$ , los resultados globales indican que la exposición de grupos etarios como bebés, infantes menores de cinco años y mujeres adultas, sobrepasan en 46 %, 26 % y 5 % los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Además, las exposiciones pueden ser mucho menores al valor real porque no se ha cuantificado la exposición a toxinas por medio de la ingesta de alimentos, la vía más común de ingreso al organismo humano.

Con respecto a los diseños *mejorados* destacan la estufa cohete (referidas como *rocket cook stove*, del inglés) y las estufas gasificadas. Las estufas rocket se han popularizado desde finales de los años 90, aproximadamente; su diseño más común es el de escuadra [64]. De acuerdo con Gandigude y Nagarhalli [64], las características geométricas del diseño determinan la eficiencia de la transferencia de calor y señala algunas observaciones sobre consideraciones para su diseño, en función de alcanzar una eficiencia adecuada:

- Aislar la cámara de combustión con material aislante para reducir las pérdidas por conducción, es deseable que el material sea liviano.
- Instalar un quemador aislado para la colocación de los utensilios, procurar que su longitud sea corta para evitar pérdidas de calor.
- Promover un buen ingreso de aire por medio de entradas secundarias para favorecer la combustión debido a la succión generada por la diferencia de densidad en el fluido.
- Colocar la biomasa sobre una rejilla, a manera de *piso falso*, por donde el aire ingrese por abajo para mejorar la combustión.

Los puntos señalados anteriormente corresponden a consideraciones de diseño previo necesarias para determinar una configuración adecuada para el desarrollo de una estufa

mejorada y algunos pueden ser emuladas en las estufas gasificadas. Otro factor importante en las estufas mejoradas es el uso de chimeneas, se considera que las que cuentan con ella son superiores porque las emisiones son, en su mayoría, sacadas de la cocina, por lo que la exposición del usuario es menor; sin embargo, dichas emisiones tienen implicaciones ambientales, por lo que la solución no es únicamente la chimenea [65]. La emisión de partículas y gases liberados en las estufas se ve influenciada por factores como el tipo de sistema empleado, tipo de combustible y su contenido de humedad, temperatura de operación y las prácticas de cocción.

El contenido de humedad de la leña alcanza con el tiempo un valor de equilibrio que depende de la temperatura ambiente y humedad relativa, por lo que en general se considera que varía entre 4 % y 25 % en base seca, en climas secos y húmedos, respectivamente. Conforme mayor sea el contenido de humedad en la leña, al hacer pruebas de combustión en una estufa mejorada (específicamente la Envirofit G-3300), las reacciones que transforman el CO a CO<sub>2</sub> se reducen, de igual forma, otros productos de la pirólisis como el CH<sub>4</sub>, formaldehído y acetaldehído, se convierten en CO y luego en CO<sub>2</sub> [66]. De acuerdo con Mukunda *et al.* [65], es importante el desarrollo e investigación de estufas biomásicas en busca de alta eficiencia y bajas emisiones, pero en el escenario actual se presenta la necesidad de promover el uso de residuos agro industriales para su revalorización.

#### **2.4.3.1 Estufa gasificada**

Desde una perspectiva económica y ambiental, la gasificación es una alternativa promisoriosa y superior para la utilización de biomasa como combustible, en comparación con la combustión [9]. Aunque la microgasificación es un término que se ha venido acuñando desde antes de los años 90 [15], las estufas gasificadas son una novedad en la producción de energía térmica para la cocción y su uso aún no se ha expandido [15], son especialmente útiles en zonas rurales de países en vías desarrollo [25]. Su funcionamiento se basa en la combustión de gas producido *in situ* a partir de biomasa sólida seca, mediante un proceso termoquímico

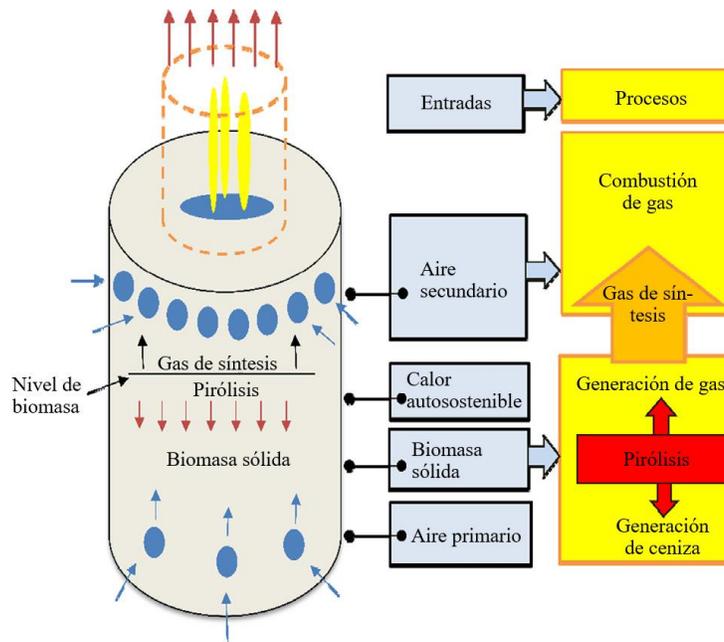
[4]. Las etapas del proceso de producción de gas a partir de biomasa son cuatro: secado, pirólisis o carbonización, gasificación y combustión del gas. Se pueden separar los procesos de combustión en dos grupos: modo de llama y de carbón, el primero se manifiesta por la presencia de llamas que se propagan a través de la capa de biomasa consumiendo los compuestos volátiles presentes, mientras el segundo, consiste en el consumo del carbón residual; cada uno se diferencia por el rango de temperaturas (el pico se alcanza en el modo de llama), composición del gas de síntesis y tasa específica de consumo de biomasa (aproximadamente se consume 70 % en el modo de llama) [3].

La mayor ventaja que presentan las estufas gasificadas es que aprovechan más la biomasa, observado como una baja producción de carbón y ceniza remanente; además, sus emisiones son menores, estos comportamientos son consecuencia de la separación de los procesos de separación de gases combustibles emitidos por la biomasa y su combustión subsecuente cuando dichos gases se mezclan con aire [15][25]. Así se logra que la demanda de combustible sea menor, debido a que la combustión biomásica es completa, lo que ayuda a reducir la exposición de las personas usuarios a compuestos nocivos para la salud [4].

Existen dos tipos de estufas gasificadas denominadas de acuerdo a la ubicación y dirección del ingreso de agente oxidante, cuando viene del fondo del reactor se denomina de corriente ascendente (*Top-lit updraft*) o si ingresa en la parte media o superior, se trata de flujo descendente (*Downdraft*). Las entradas principales de aire se ubican de acuerdo al tipo de cocina en cuestión, pero lo más usado es de flujo ascendente con entradas secundarias para la combustión del gas producido en el reactor pirolítico [11].

El diseño más sencillo de estufa gasificada de flujo ascendente posee la entrada primaria de aire separada de la secundaria, la primera provee el agente oxidante para dar lugar a la pirólisis y su expansión sobre la columna de material combustible, como consecuencia del calor generado se liberan gases volátiles, cuya ignición se da con el agente oxidante que ingresa por la entrada secundaria [25], ver Figura 2.4. Lo más común en este tipo de estufas es que la unidad de cocción sea colocada inmediatamente sobre la llama

generada por la combustión del gas de síntesis. El aire secundario provee oxígeno en las zonas con alta concentración de gas combustible, su adecuado posicionamiento y velocidad promueven mezclado turbulento de ambas partes, favoreciendo la combustión completa y temperaturas altas de combustión; además de eso, otro aspecto que reduce la emisión de contaminantes es el precalentamiento del aire secundario [67]. Dicho precalentamiento puede darse cuando el aire ingresa y es forzado a pasar al lado de las paredes del reactor de la estufa.



**Figura 2.4.** Diagrama de estufa gasificada de flujo ascendente, adaptado de [25].

Pueden ser muchos los materiales de construcción de las estufas gasificadas, así como también pueden ser portátiles o estacionarios [4]. En su mayoría, las estufas gasificadas poseen excelente transferencia de calor, son eficientes energéticamente y reducen las emisiones, son livianas, por lo que pueden ser portátiles y generan carbón, que se le puede dar un uso para cocción o como enmienda en suelo; sin embargo, como características negativas se encuentra que usualmente su costo es alto, se alimentan por lote, se encendido es lento y tiene limitada versatilidad con respecto al combustible a utilizar [25]. Según reporta MacCarty, Still y Ogle [34], las estufas gasificadas funcionando adecuadamente reducen la

emisión de materia particulada en un promedio de 90 %, comparado con una fogata de tres piedras.

Las estufas gasificadas pueden tener ingreso de agente gasificante por convección natural o forzada, algunos investigadores han realizado estudios de rendimiento al variar esta característica con un mismo equipo. Comercialmente existen estufas como la Philips (véase Figura 2.5 (a)), desarrollada en los Países Bajos por Royal Philips Electronics, esta cuenta con ventilador que funciona con batería recargable o generador termoeléctrico; según un estudio a escala de laboratorio, dicha estufa mostró reducción de 90 % con respecto a emisiones de monóxido de carbono y materia particulada [25]. Otra versión popular es la Oorja (véase Figura 2.5 (b)), esta cuenta con un ventilador de batería recargable y se comercializa en India, su desempeño provee una eficiencia superior al 35 % y bajas emisiones de monóxido de carbono [25]. De convección natural también hay algunas estufas gasificadas comerciales, como la Vesto, Champion, Karve, Sampada; la última cuenta con 27 % de eficiencia [68].



(a) Philips HD4008. Tomado de [69].



(b) Oorja. Tomado de [70].

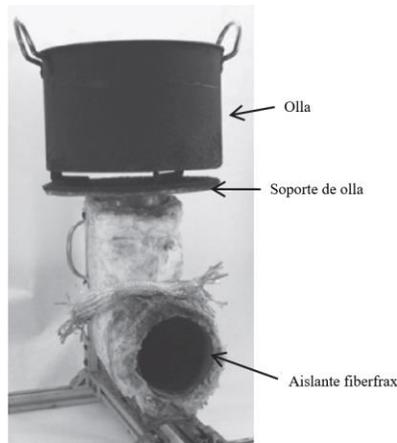
**Figura 2.5.** Algunas estufas gasificadas comerciales.

## 2.5 Materiales aislantes

El uso de materiales aislantes provee la posibilidad de reducir la pérdida o ganancia de calor en los límites de un sistema cuando sus superficies tienen temperatura mayor o menor a la del ambiente circundante [71]. Su aplicación en estufas biomásicas previene la pérdida de calor hacia los alrededores, lo que es beneficioso para que las reacciones esperadas se den eficientemente [15], pero también protege a los usuarios de potenciales quemaduras por exposición a alta temperatura. La eficiencia de una estufa rocket presenta una mejora de aproximadamente 8 % al aislar las paredes externas y esto también redujo en 5 % el consumo de combustible [31].

Un material puede ser usado como aislante térmico si presenta una baja capacidad de transmitir calor, debido a su configuración física y química, esta característica se denomina resistencia térmica, inverso de la conductividad térmica; materiales comúnmente usados y con un alto rendimiento en aislamiento térmico son: fibra de vidrio, asbestos, lana de roca, entre otros [72]. Un atributo que hace que un material sea apto para usarse como aislante térmico es la presencia de vacíos y burbujas en su estructura, aunque el material, por sí mismo, tenga una alta conductividad térmica [72], como sería el caso de la arena.

En estufas biomásicas es común el uso de fibras sintéticas como la fibra vidrio y manta cerámica o materiales como el cemento refractario (ver Figura 2.6), como el caso de la cocina Baussmann [73], el modelo rocket de Agenbroad, DeFoort, Kirkpatrick y Kreutzer [74] o la cocina gasificada de Panwar [75], respectivamente. Las fibras son materiales cuya composición física es fina y alargada, ordenadas de forma paralela entre sí, razón por la cual se comportan como un buen aislante térmico y acústico, debido a los espacios vacíos que presenta su estructura [76]. Sin embargo, considerando el contexto socioeconómico de utilización de estufas mejoradas, usar materiales aislantes alternativos representa una gran oportunidad.



(a) Manta aislante en cocina rocket. Adaptado de [74].



(b) Paredes de cemento refractario en cocina gasificada. Adaptado de [75].

**Figura 2.6.** Uso de material aislante en algunas estufas mejoradas.

En el ámbito agroindustrial existe una amplísima variedad de subproductos de cultivos, algunos de ellos cumplen o podrían cumplir con las características higroscópicas deseadas para ser reutilizados como aislante térmico; además, su disponibilidad los pone en ventaja en comparación con materiales derivados del petróleo [77]. Por ejemplo, se reporta que la ceniza de residuos de palma africana, utilizada en las calderas de sistemas de vapor de las industrias aceiteras, tiene conductividad térmica de  $0,69 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [78]. Los corazones de mazorcas de maíz fueron transformados en láminas tras un proceso de trituración y tratamiento químico para disminuir su degradación e inflamabilidad al ser expuesto a altas temperaturas, así como reducir efectos degradantes de microorganismos; el tratamiento químico consta de aplicación de ácido bórico, hidróxido de aluminio, ácido acético y ácido láctico previo a la formación de las láminas [77]. Según los hallazgos, el pico de transferencia de calor del material es a los  $320 \text{ }^\circ\text{C}$  con una tasa de liberación de calor de aproximadamente  $80 \text{ W g}^{-1}$  [77]. Otro material llamativo debido a su bajo precio y su eficiencia en disminuir la tasa transferencia de calor en aislamiento doméstico corresponde a la fibra de coco [78]. Sin

embargo, para procesos de transformación termoquímica, debido a los rangos de temperatura se debe considerar que el material requiere tener una baja inflamabilidad.

## **2.6 Equipos auxiliares para la gasificación de biomasa**

El proceso de gasificación se da en un reactor relativamente simple, pero para un adecuado funcionamiento del sistema es necesaria la preparación y alimentación de biomasa, así como la purificación del gas de síntesis, de ser necesario para la aplicación en que será utilizado.

Es poco común que para gasificación la biomasa pueda ser utilizada sin realizar ningún tratamiento previo. La preparación o acondicionamiento de la biomasa consiste en su secado y dimensionamiento, de acuerdo a los requerimientos del reactor de gasificación, debido a que la geometría de la biomasa influye directamente sobre el rendimiento de las reacciones termoquímicas que dan lugar a la gasificación. La limpieza del gas de síntesis corresponde a la remoción de materia particulada en suspensión, reducción de alquitrán y compuestos alcalinos.

### **2.6.1 Preparación y manejo de la biomasa**

Las características de humedad y granulometría de la biomasa son variables que deben acoplarse a los sistemas de alimentación y gasificación, en la mayoría de los casos se determina cuál es la mejor combinación mediante experiencias prácticas con un diseño de gasificador particular.

#### **2.6.1.1 Secado**

El contenido de humedad de la biomasa recién cosechada varía de acuerdo al tipo de material, pero en general se mantiene por encima del 60 % en base seca si se trata de residuos

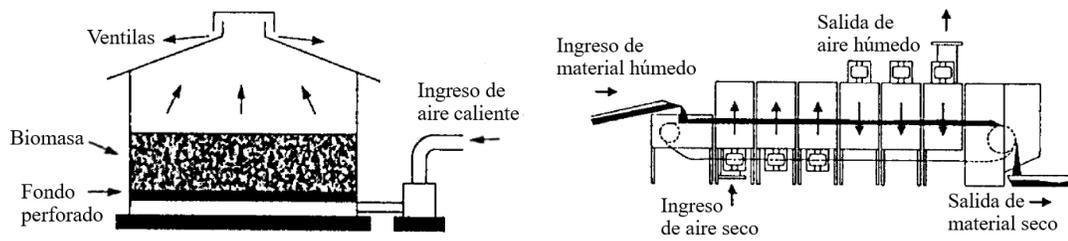
agrícolas o cercano al 20 %, cuando es madera fresca [49]. La mayoría de los sistemas de gasificación requieren humedades de biomasa entre el 10-20 % en base seca, para su funcionamiento adecuado, debido a que la humedad trae efectos negativos en los sistemas de alimentación, pues genera obstrucciones y condensación; además, se asocia directamente a la disminución del poder calorífico del gas de síntesis [79]. Por ello, se considera necesario el secado cuando la biomasa excede el 25 % de humedad en base húmeda previo a la gasificación [80].

Los procesos de secado tienen una alta demanda de energía en gasificación a mediana y gran escala, característica que puede disminuir la eficiencia global del sistema de producción energética [79]. Este aspecto puede ser mejorado si se aprovecha el calor desprendido por el gasificador dirigiéndolo a secadores de biomasa, algunas de las fuentes de calor de desecho que pueden ser aprovechadas son el gas de síntesis caliente, intercambiadores de calor y la combustión de subproductos del proceso [79].

El proceso de secado depende del tipo de equipo a usar, tamaño de partícula a secar y su tipo, y la capacidad de secado requerida para cumplir con las necesidades del sistema de gasificación. Por tanto, su selección se realiza de acuerdo a las variables mencionadas. Los secadores comerciales varían en tipo, forma y tamaño, a continuación (Figura 2.7) se comenta sobre algunos:

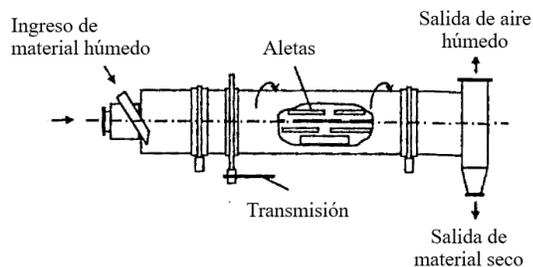
- Lecho fijo con fondo perforado (Figura 2.7 (a)): ofrecen una de las alternativas más simples para el secado de la biomasa, estos equipos son principalmente usados para el secado de granos, pero son adaptables a plantas de biomasa pequeñas [79]. El sistema consiste en una cámara a través de la cual fluye aire caliente por su fondo, con temperaturas menores a los 100 °C, el aire sube atravesando una columna de material a secar, donde se genera un gradiente vertical de humedad [79]. Debido a esta razón, el producto secado debe ser mezclado y se suele dejar reposar hasta que alcanza el contenido de humedad de equilibrio [79]

- Banda continua (Figura 2.7 (b)): se rigen bajo un funcionamiento sencillo y tienen la ventaja de permitir un flujo continuo de material seco. El material se transporta en una banda permeable y el aire es impulsado por ventiladores a través del material y la banda. Se manejan profundidades de columna de material comprendidas entre 2-15 cm, razón por la cual se da un secado uniforme. El sistema de secado puede estar compuesto de múltiples bandas y el tiempo de secado se controla mediante el ajuste de la velocidad de desplazamiento de la banda.
- Horno rotativo (Figura 2.7 (c)): corresponde a un cilindro de lenta rotación con diámetros variables, de acuerdo con su capacidad; en su interior cuenta con aletas longitudinales que favorecen el mezclado de los materiales mientras el medio de secado fluye longitudinalmente. Son los más usados en proyectos a gran escala de gasificación y combustión de madera molida.



(a) Lecho fijo con fondo perforado.

(b) Banda continua.



(c) Horno rotativo.

**Figura 2.7.** Algunos sistemas de secado de biomasa. Adaptado de [79].

### **2.6.1.2 Molienda**

El tamaño inadecuado de la biomasa afecta los sistemas de alimentación e inhibe la fluidización del lecho, cuando aplica; además, influye directamente sobre la densidad aparente, lo cual tiene efecto sobre la cantidad de biomasa en el reactor y su transferencia de calor. Los equipos más comunes para el dimensionamiento de la biomasa son las trituradoras de cuchillas (referidas como chipeadoras) y los molinos de martillos, ambas son máquinas rotativas.

Las chipeadoras corresponden a equipos cuyo propósito es la trituración de materiales leñosos, para dichas labores operan a alta velocidad, en general por encima de las 1800 rpm [79]. Corresponde a una operación de molienda gruesa [81]. La madera ingresa a la máquina y es recibida en cilindros rotatorios con cuchillas, que se encargan de desmenuzar la madera. Se debe tener especial cuidado en evitar el ingreso de cuerpos extraños de alta dureza, como metales, que pueden venir mezclados con la madera, pues pueden generar daños en las cuchillas, principalmente quebraduras [79]. En especial, este tipo de problemas se da cuando se utilizan de materiales residuales.

Los molinos de martillos también son equipos de rotación, usados para molienda fina, pero se diferencian de las chipeadoras porque en vez de cortar la madera, lo que hacen es quebrarla [79][81]. Al ingresar a la máquina, la madera es golpeada por los martillos rotatorios y luego impacta la superficie de quebrado, posteriormente, la materia ingresa a través de los martillos, efecto por el cual el tamaño de partícula se reduce más; por último, el material molido pasa a través de cribas para una separación del material cuyo tamaño aún no es el deseado. Este tipo de molinos tienen la capacidad de trabajar con biomasa de tamaños inferiores a 4 cm, de no ser así, se requiere procesamiento previo.

Adicionalmente, otro paso que se puede presentar en el proceso de beneficiado de la biomasa es la selección por tamaño, realizada mediante uso de cribas (manuales o mecánicas) o por métodos de flotación. Mediante ambos métodos se puede separar el material aceptable del no aceptable y recircularlo, para darle el tamaño adecuado [79]. Debido a su

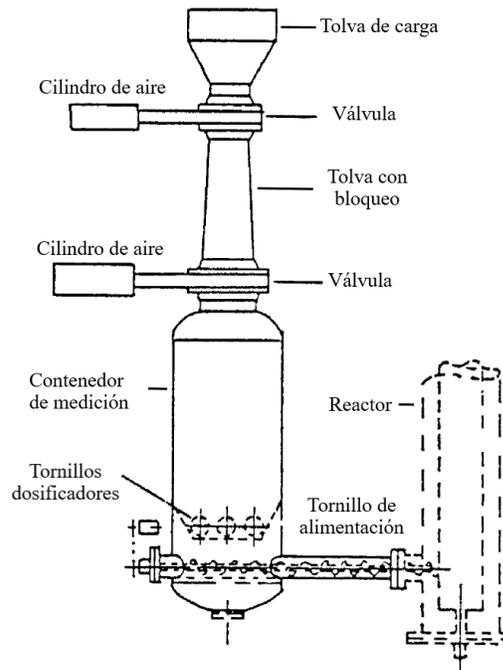
funcionamiento, la selección de tamaño de partícula por flotación presenta mayor complejidad comparado con el uso de cribas.

### **2.6.2 Sistemas de transporte y alimentación**

Los sistemas de alimentación han sido desarrollados para aplicaciones específicas y la información publicada acerca de su diseño es reducida, dado que es una industria en la que los fabricantes ofrecen soluciones adecuadas a las necesidades específicas de acuerdo a su experiencia [79]. Se espera que un sistema de alimentación sea capaz de proveer un flujo continuo y permita su preciso control.

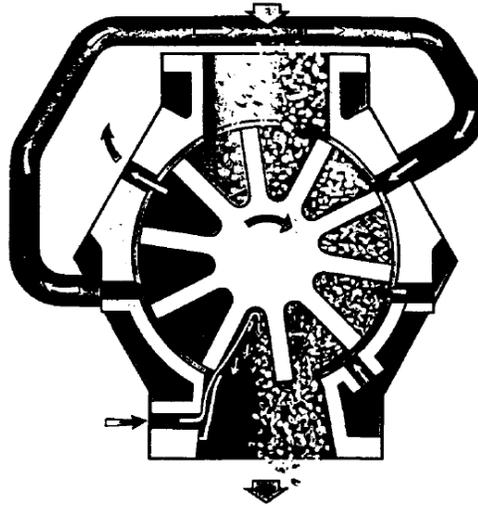
La forma de alimentar la biomasa y su preparación dependen de la calidad del combustible, el sistema de alimentación a emplear y el tipo de reactor. Del alimentador se busca confiabilidad y bajos costos de construcción, mantenimiento y consumo de energía; específicamente para aplicaciones de gasificación se busca que el sistema de alimentación sea capaz de mantener la presión interna del reactor, para impedir el escape de gases del reactor a través del sistema de alimentación [82]. Los sistemas alimentadores de *tolva-tornillo sin fin* son los más utilizados en aplicaciones de bioenergía [83].

Una de las opciones que se emplean a gran escala son las tolvas de alimentación con bloqueo y descarga libre por gravedad sobre un transportador de tornillo sin fin. Estos alimentadores son adecuados para presiones menores a 3,5 MPa y requieren de la inyección de gas inerte presurizado en una cámara (tolva) previo a la apertura de la compuerta que permite el ingreso de la biomasa, posteriormente puede ser medida para aplicar la dosis requerida y luego se transporta al reactor, mediante tornillo sin fin [82]. Un diseño destacado de alimentador con tolva de bloqueo es el desarrollado por Thomas R. Miles Consulting Engineers [82], que se muestra en la Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Sistema alimentador de tolva con bloqueo. Adaptado de [84].

Otro sistema empleado son las válvulas rotativas de alimentación, consiste en el transporte del combustible de una cámara sin presión a una presurizada, dentro del espacio entre aletas rotativas, ajustadas mediante un sello de presión colocado sobre la carcasa circular [82]. Se puede presentar descarga incompleta cuando el material es pegajoso. En la Figura 2.9 se presenta un diagrama de funcionamiento del alimentador de válvula rotativa para madera molida de A. Ahlstrom Corporation [82].

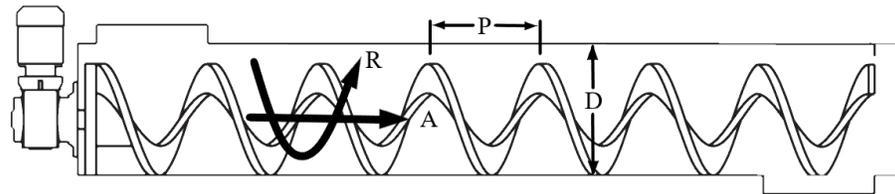


**Figura 2.9.** Sistema de alimentación con aletas rotativas. Tomado de [82].

Los transportadores de tornillo sinfín consisten en un eje rotatorio con aletas helicoidales que empujan el material a lo largo de un canal horizontal o levemente inclinado [85]. Los empleados en gasificación son de canoa cerrada, como un tubo, y para prevenir el escape de gases del reactor, poseen una geometría cónica, que se estrecha conforme se acerca al gasificador [79]. Esta disposición geométrica causa que la biomasa gane presión, dificultando la salida a los gases; se estima que tienen un rango de operación estimado entre 0,5 MPa a 1,5 MPa [79]. En general, los tornillos sinfín tienen la fuente de potencia en el extremo de la descarga, para que el eje experimente tensión, pero en gasificación esta disposición es más complicada.

Similar a los tornillos sinfín, existen los transportadores de espiral, por tanto también son helicoidales, pero se diferencian porque no poseen un eje de rotación; también se conocen como transportadores de tornillo flexible [86]. La estimación de su rendimiento no se puede medir directamente, pero una manera de aproximar es mediante la recolección del material a granel en el extremo de descarga [86]. El tamaño de partícula es crítico, así que se debe asegurar que no haya lugar para atascamientos entre la espiral y la pared del tubo; como se muestra en la Figura 2.10, el material transportado se expone a dos fuerzas: axial (A), para

mover el material a lo largo del tubo y radial (R), que comprime el material contra las paredes del transportador [86]. Se ha determinado que para el diseño de la espiral o del tornillo sinfín se puede aproximar su paso (P) igual al diámetro (D) del tubo [87].



**Figura 2.10.** Diagrama de transportador de espiral. Adaptado de [88].

Un aspecto influyente en el transporte y alimentación de biomasa es su fluidez, y específicamente la madera molida en forma de chips, es de los materiales más difíciles, caracterizado por ser ligeramente abrasivo, no corrosivo, pero de lenta fluidez y con ángulo de reposo mayor a los 45 °C [89]. Los chips de madera tienden a formar aglomerados en los transportadores y gracias a ello, generar resistencia al movimiento; lo más recomendable es la utilización de tornillos flexibles operando a bajas revoluciones [90].

## 3 METODOLOGÍA

---

El presente estudio fue realizado como parte del proyecto de investigación “Incremento de la eficiencia de las cocinas de leña mediante la utilización de técnicas de gasificación”, presentado ante la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, con el número B5061 y adjudicado al Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII). El estudio está constituido por un apartado experimental y otro de análisis de datos.

La etapa experimental abarca diseño, construcción, puesta en marcha y evaluación del microgasificador; mientras que el análisis de datos busca determinar el desempeño de la estufa, en términos de eficiencia térmica y su comparación con estufa rocket y fogón de ladrillos.

### 3.1 Estufa

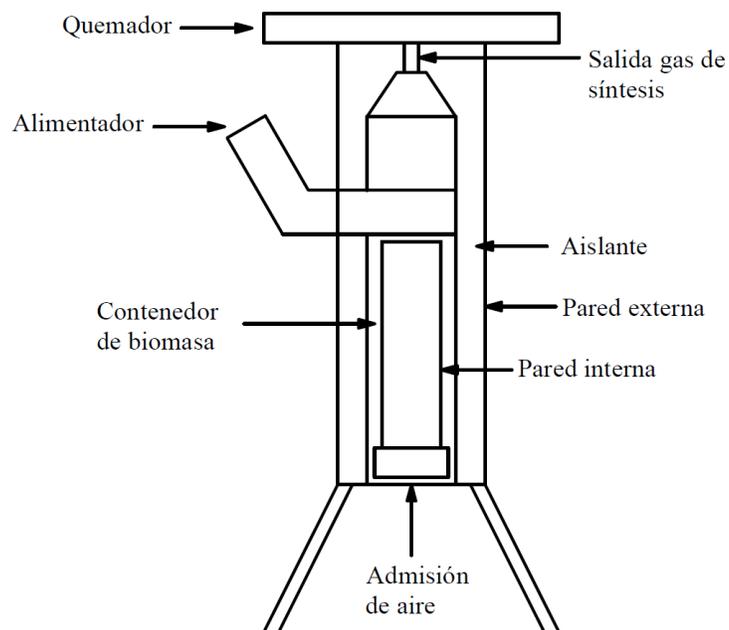
#### 3.1.1 Planteamiento del diseño

Se definió que se trataría de un gasificador de flujo ascendente, como referencia se presenta la Figura 3.1.

Por razones de seguridad para la persona usuaria y la disminución de pérdidas de calor, el reactor requiere un recubrimiento aislante, colocado entre la pared externa y la pared interna.

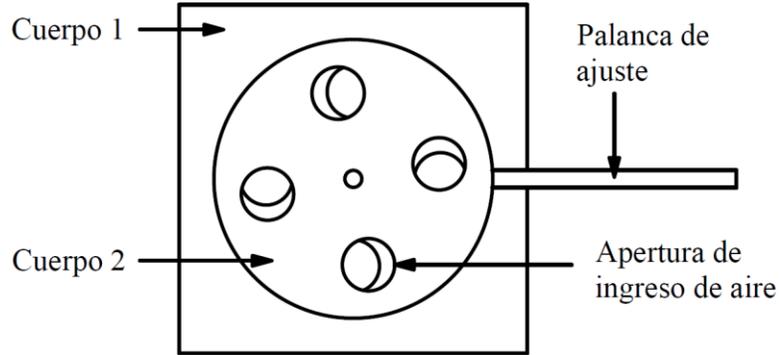
Para el sistema de alimentación de biomasa se plantea la utilización de un mecanismo de espiral sinfín accionada manualmente, contenida dentro de una cubierta redonda de hierro, de forma que se permita el transporte de la biomasa desde el exterior hasta el interior del reactor de gasificación. Como parte del sistema de alimentación también se requiere de la adición de una tolva para la dosificación de la biomasa. También, es necesaria una zona para

la combustión del gas de síntesis, que se contempla en la sección superior y se denomina quemador.



**Figura 3.1.** Diagrama general de diseño de la cocina.

Debido a las condiciones que rigen el proceso de gasificación, es necesario que el reactor cuente con un mecanismo de regulación de la admisión de aire. En este caso se recurrió a la implementación de una compuerta con agujeros dispuestos en un patrón circular, construida con lámina metálica, la misma cuenta con un eje sobre el que rota otra lámina de forma circular, con la misma distribución de agujeros (ver Figura 3.2). Su funcionamiento es de accionamiento manual y lo que consigue es regular la apertura de los agujeros.



**Figura 3.2.** Mecanismo de regulación de admisión de aire.

En la parte inferior se ubica la admisión principal de aire y también es la zona de remoción de cenizas, por lo tanto, se requiere disponibilidad de espacio.

### 3.1.2 Dimensionamiento del reactor

Se sigue la metodología de diseño establecida por Panwar y Rathore [61]. Se parte de una necesidad energética ( $Q_n$ ) de  $15,8 \text{ MJ h}^{-1}$ . A partir de ello se establece: flujo de biomasa requerido ( $\dot{m}_B$ ); diámetro del reactor ( $D_R$ ), en este caso se calcula el área transversal asociada y se iguala a las dimensiones de un cuadrado, para calcular el ancho  $L_R$  del perfil cuadrado emplear; y la altura del reactor ( $H_R$ ).

$$\dot{m}_B = \frac{Q_n}{PCI \cdot \eta_g} \quad (3.1)$$

$$D_R = \left[ \frac{1,27 \cdot \dot{m}_B}{TEG} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

$$L_R = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1,27 \cdot \dot{m}_B}{TEG}} \quad (3.3)$$

$$H_R = \frac{TEG \cdot T}{\rho_B} \quad (3.4)$$

Donde:

- $\dot{m}_b$ : flujo de biomasa requerido ( $\text{kg h}^{-1}$ ).
- $PCI$ : poder calorífico inferior de la biomasa ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ).
- $\eta_g$ : eficiencia de gasificación (decimal).
- $D_R$ : diámetro del reactor (m).
- $TEG$ : tasa específica de gasificación ( $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ).
- $T$ : tiempo de uso de la estufa (h).
- $\rho_B$  densidad aparente de la biomasa ( $\text{kg m}^{-3}$ ).
- $L_R$ : lado de sección transversal cuadrada (m).
- $H_R$ : altura del reactor.

### 3.1.3 Dimensiones del alimentador

Consiste en un transportador flexible de espiral con actuación manual para controlar el ingreso de la biomasa. El paso se define por el diámetro en el que será albergado y su sección transversal es circular. Cuenta con una tolva para depositar la biomasa a emplear.

### 3.1.4 Diseño computacional

El modelado tridimensional de la estufa se realizó con el software Autodesk Inventor 2019.

### 3.2 Construcción

La construcción se realizó en el Taller de la Unidad de Recursos Forestales (INII), en el Taller de Ingeniería Mecánica y en el Taller de Ingeniería de Biosistemas.

Para el proceso constructivo se empleó máquina de soldar de arco eléctrico (SMAW), esmeriladora, taladro, prensa de banco, dobladora de láminas, y torno para madera (ver Figura 3.3); además de herramientas manuales como cinta métrica, calibrador, escuadra convencional y magnética, desarmadores, sargentos, llaves fijas, entre otras. Para todas las soldaduras se empleó electrodo revestido E6013 en diámetro 2,38 mm (3/32”).



(a) Soldadora.



(b) Esmeriladora.



(c) Taladro.



(d) Prensa de banco.

**Figura 3.3.** Algunas de las herramientas más utilizadas.

### 3.3 Biomasa

La materia prima utilizada consistió en residuos de madera de ciprés (*Cupressus lusitanica*), obtenida en el aserradero Tarimas Oreamuno, ubicado en La Lima de Cartago. La biomasa se compone por trozas (residuo del proceso de aserrado debido a la presencia de corteza), como se puede observar en la Figura 3.4 (a). La biomasa fue tomada de las pilas y acomodada en sacos (ver Figura 3.4 (b)) para su transporte y almacenamiento hasta su respectivo acondicionamiento, previo a la gasificación.



(a) Pilas de leña.



(b) Biomasa en sacos.

**Figura 3.4.** Biomasa empleada.

#### 3.3.1 Acondicionamiento

Antes de ser utilizada en el reactor de gasificación la madera debió ser preparada para un adecuado funcionamiento, de forma que se adapte al correcto funcionamiento del alimentador de biomasa. La primera etapa consistió en clasificar el material para eliminar cualquier cuerpo extraño, como trozos de otros tipos de madera, clavos, tornillos, basura, entre otros.

Después se utilizó un triturador de ramas y desechos orgánicos de marca GTM Professional GTS 1300C, dicho equipo fue facilitado por la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, el propósito fue obtener una distribución granulométrica uniforme para ser usado en la estufa gasificada, como se muestra en la Figura 3.5. Otra parte de la biomasa fue picada utilizando un cuchillo, para su uso en fogón de ladrillos.



(a) Trituradora GTM Professional GTS 1300C.



(b) Madera triturada

**Figura 3.5.** Preparación de biomasa.

### 3.3.2 Caracterización de biomasa

#### 3.3.2.1 Contenido de humedad

Para determinar de humedad se empleó la norma ASTM E871-82. La prueba consiste en colocar 50 g (o más) de biomasa en un recipiente previamente secado (a  $103 \pm 1$  °C durante 30 min en horno) y pesado, entonces se registra la masa inicial como el conjunto recipiente-muestra. Posteriormente se coloca el conjunto en un horno a  $103 \pm 1$  °C durante 16 h.

Transcurrido ese tiempo, el conjunto se saca del horno y se coloca en un desecador hasta que alcance temperatura ambiente. Después se pesa y se registra la masa. Se vuelve a

colocar la muestra en el horno a  $103 \pm 1$  °C durante 2 h más y se repite el proceso hasta que se alcanza una variación en el peso final menor al 2 %.

El contenido de humedad en base húmeda se determina cómo se muestra a continuación:

$$CH_{bh} = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_c} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Donde:

- $CH_{bh}$ : contenido de humedad en base húmeda (%).
- $m_i$ : masa inicial (g).
- $m_f$ : masa final (g).
- $m_c$ : masa del contenedor (g).

Para realizar este proceso se utilizó un horno convectivo Precision Scientific 625-B y una balanza analítica Ohaus Traveler TA3001 (ver Figura 3.6).



(a) Horno Precision Scientific 625-B.



(b) Balanza analítica Ohaus  
Traveler TA3001.

**Figura 3.6.** Proceso de determinación del contenido de humedad.



(c) Colocación de muestras en el horno.

**Figura 3.6.** Proceso de determinación del contenido de humedad (continuación).

### 3.3.2.2 Densidad aparente

Se empleó la norma ASTM E873-82. Para la prueba se requiere una caja con dimensiones internas de 30,5 cm x 30,5 cm x 30,5 cm, debe tener agarraderas y construida con material estable; adicionalmente se necesita una balanza.

El primer paso es registrar la masa de la caja y después llenarla con material cayendo desde una altura de 60 cm, medidos desde el borde superior de la caja. Una vez llena, la caja debe ser levantada a una altura de 15 cm y dejada caer sobre una superficie sólida, este proceso se realiza 5 veces. Cada vez se debe añadir más material y extraer lo que sobrepase el borde superior, según se presenta en la Figura 3.7. Por último, se registra la masa de la caja y la muestra de biomasa (en conjunto) y se aplica la siguiente ecuación, para determinar la densidad aparente:

$$\rho_a = \frac{m_{mc} - m_c}{v_c} \quad (3.6)$$

Donde:

- $\rho_a$ : densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ).
- $m_{mc}$ : masa del conjunto caja y muestra (g).
- $m_c$ : masa de la caja (g)
- $v_c$ : volumen de la caja ( $\text{cm}^3$ ).



(a) Llenado inicial.

(b) Remoción de excesos.

(c) Estado final.

**Figura 3.7.** Cambio de densidad aparente de la leña triturada.

### 3.3.2.3 Poder calorífico

Se realizó en el Laboratorio de Recursos Forestales del INII con utilización de una bomba calorimétrica LECO AC500. Previo a su análisis, la biomasa requiere ser finamente molida y para ese fin, las muestras a se procesan en el molino Fritsch Pulverisette P19. Los equipos antes mencionados se presentan respectivamente en la Figura 3.8. Una vez determinado el poder calorífico superior de la biomasa se procede a determinar el poder calorífico inferior de forma indirecta con la ecuación (3.7) [91], aplicable a volumen constante, la misma sustrae el calor de vaporización del agua contenida en la biomasa.

$$PCI = PCS \cdot (1 - CH_{bh}) - 2,447 \cdot CH_{bh} \quad (3.7)$$

Donde:

- $PCI$ : poder calorífico inferior ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ).
- $CH_{bh}$ : contenido de humedad en base húmeda (decimal).
- 2,447: calor latente de vaporización del agua a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



(a) Bomba calorimétrica LECO AC500.

(b) Molino Fritsch Pulverisette P19.

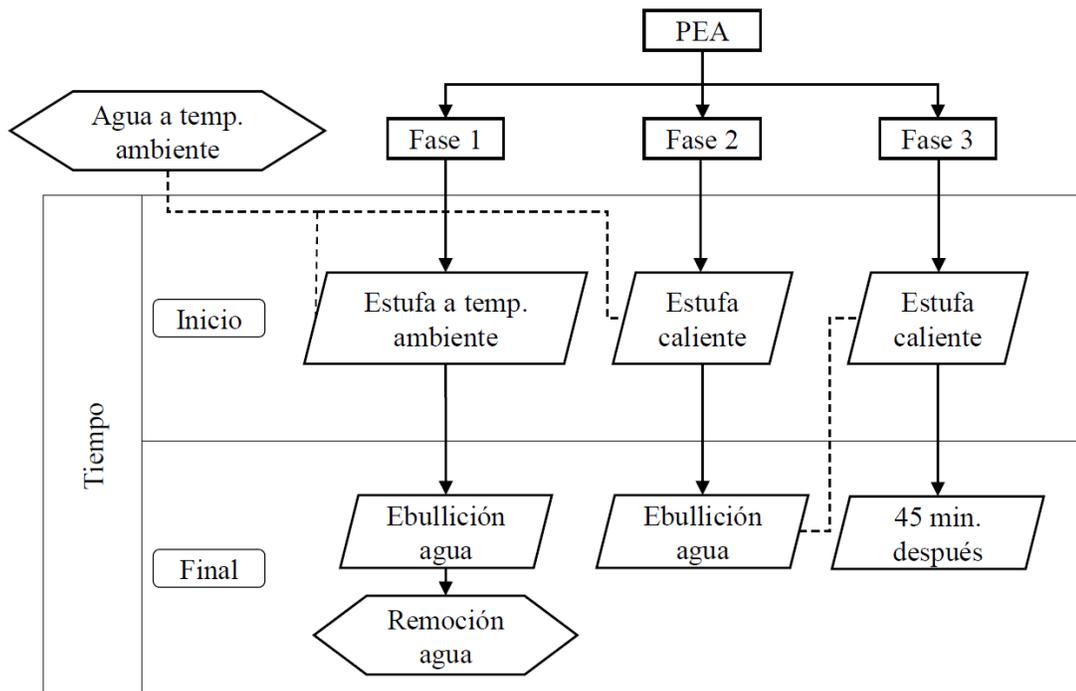
**Figura 3.8.** Equipos para determinación del poder calorífico.

### 3.4 Evaluación del rendimiento de la estufa

Se seguirá el protocolo de evaluación establecido por *Clean Cooking Alliance* denominado prueba de ebullición de agua. Se escoge esta prueba porque de acuerdo con el fin de este trabajo es la más apta para la evaluación del diseño propuesto y su comparación con otros diseños como el fogón de ladrillos. Su ejecución se verá favorecida por la disponibilidad de equipo de laboratorio adecuado y por el manejo del tiempo para lograr los objetivos planteados.

Para la prueba de ebullición de agua se requiere de una estufa, combustible, una olla y agua a temperatura ambiente. La fase 1 de la prueba (arranque frío) se extiende desde que se enciende la estufa y hasta que un determinado volumen de agua llega a la ebullición, la fase 2 (arranque caliente) contempla desde que se remueve el agua de la fase anterior e ingresa a la olla un nuevo volumen de agua a temperatura ambiente y termina cuando llega a

la ebullición, la fase 3 (baja potencia) corresponde a 45 minutos tras el momento en que el agua llegó a ebullición o un descenso de 6 °C. Refiérase al diagrama del procedimiento empleado en la Figura 3.9.



**Figura 3.9.** Diagrama de la prueba de ebullición de agua.

Se estima que cada prueba toma entre 1,5 y 2 horas, por lo que la realización de las tres repeticiones recomendadas por estufa toma entre 4,5 y 6 horas. Para estas pruebas de ebullición de agua se utilizarán dos ollas con diámetro de 30 cm y altura de 18,5 cm. Con una capacidad de aproximadamente 13 L. El propósito de utilizar dos ollas es para que en la etapa 1 y etapa 2 de la prueba de ebullición de agua, la olla se encuentre a temperatura ambiente y no se altere la temperatura del agua contenida. En la Figura 3.10 se presentan las dos ollas usadas en el experimento.



(a)



(b)

**Figura 3.10.** Ollas utilizadas para las pruebas.

Es deseable contar con la caracterización de propiedades químicas del combustible biomásico, mas no es obligatorio para el desarrollo de la prueba de ebullición de agua. La guía define todos los parámetros de evaluación y la metodología a seguir, entre ellos destaca la tasa de consumo de combustible para llevar el agua a ebullición y también se debe considerar el consumo específico para realizar una tarea, como llevar un litro de agua a ebullición o la cocción de determinado alimento. Se calcula efectuando mediciones de masa antes y después del proceso de transformación termoquímica. La eficiencia térmica ( $\eta_T$ ) corresponde a la razón de la energía producida por el calentamiento y evaporación ( $E_c + E_e$ ) de agua sobre la energía liberada por la biomasa ( $E_b$ ).

$$\eta_T = \frac{E_c + E_e}{E_b} \quad (3.8)$$

La fase 1 y fase 2 de la prueba requieren de la medición directa de la masa de combustible antes de la prueba (g), masa de agua en el recipiente a usar (g), temperatura del agua al inicio de la prueba ( $^{\circ}\text{C}$ ), tiempo al inicio de la prueba (min), masa de combustible tras la prueba (g), masas de agua en el recipiente tras la prueba (g), temperatura del agua al final de la prueba ( $^{\circ}\text{C}$ ) y tiempo transcurrido hasta el final de la prueba. La fase de fuego lento requiere de la medición directa de masa inicial de combustible (g), masa inicial de agua (g),

temperatura del agua al inicio de ( $^{\circ}\text{C}$ ), tiempo de inicio de la fase (min), masa de combustible sin consumir tras la prueba (g), masa de carbón tras la prueba (g), temperatura del agua al final de la prueba ( $^{\circ}\text{C}$ ) y tiempo de finalización de la prueba (min).

### 3.4.1 Estufas utilizadas para comparación

Para comparar la estufa gasificada se construyó un fogón de ladrillos y se utilizó la plantilla de gas licuado de petróleo, mostrados en la Figura 3.11 (a) y (b), respectivamente.



(a) Fogón de ladrillos.



(b) Plantilla de gas licuado de petróleo.

**Figura 3.11.** Estufas para comparación de eficiencia térmica mediante prueba de ebullición de agua.

### 3.4.2 Toma de datos

Se utiliza el sistema de adquisición de datos HOBO UX120-014M presentado en la Figura 3.12 (a), este dispositivo cuenta con cuatro canales para termopares. Para generar el perfil de temperatura del calentamiento del agua en la olla se coloca la termocupla tipo J marca OMEGA mostrada en la Figura 3.12 (a); esta tiene que estar sumergida en el agua, ubicada en el centro de la olla y a 5 cm del fondo, como lo define la PEA. En el caso de la estufa gasificada, se toman datos de temperatura dentro del reactor, durante todo el tiempo de prueba, esto mediante el uso de las termocuplas tipo K marca OMEGA, presentadas en la

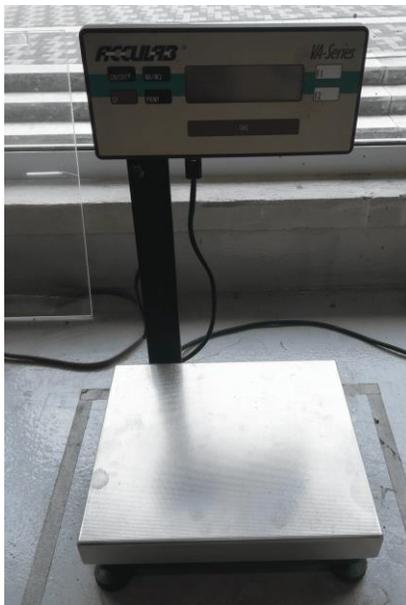
Figura 3.12 (b). También se hace un registro de temperatura y humedad relativa con el psicrómetro HOBO de la Figura 3.12 (c).

Se usó la balanza Acculab VA-Series (precisión  $\pm 0,5$  g) para pesar las masas de la biomasa utilizada en la prueba de ebullición de agua, mientras que para pesar el cilindro de gas licuado de petróleo y determinar su consumo, se utilizó la balanza LAX LX36575 (precisión  $\pm 5$  g); ambas balanzas se muestran en la Figura 3.13.



(a) Temperatura de olla. (b) Temperatura de reactor. (c) Datos atmosféricos.

**Figura 3.12.** Equipos de adquisición de datos.



(a) Acculab VA-Series.



(b) LAX LX 36575.

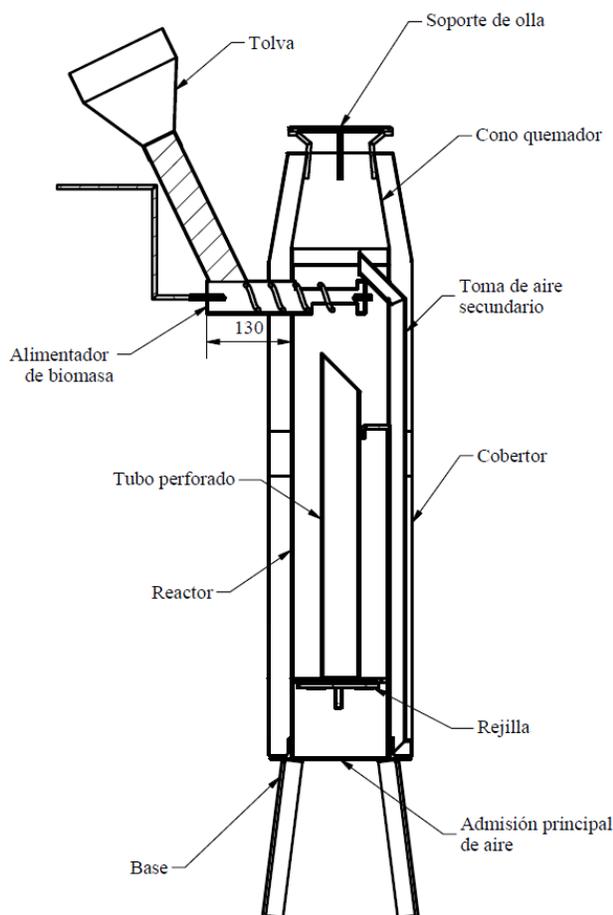
**Figura 3.13.** Balanzas utilizadas en pruebas de ebullición de agua.

## 4 RESULTADOS

---

### 4.1 Diseño

A continuación, se muestra una vista transversal de la estufa gasificada, desarrollado en Autodesk Inventor (Figura 4.1). Se nombran los componentes y se presenta una reseña sobre cada una de ellas. El diseño propuesto no pretende alcanzar una conversión química perfecta ni tampoco la máxima eficiencia, se expone como una guía para que los potenciales usuarios puedan tomar las ideas y realizar sus propias estufas gasificadas con materiales disponibles localmente. Para más detalles, ver Anexo 1.



**Figura 4.1.** Modelo general de la estufa gasificada.

#### 4.1.1 Reactor de gasificación

Las estufas gasificadas tienden a ser diseñadas con sección transversal circular, para disminuir las pérdidas por fricción y puntos de estancamiento. Sin embargo, en este abordaje se utilizó sección transversal cuadrada de 15 x 15 cm (6" x 6") debido a que se trata de un perfil más barato y es más sencillo para trabajar en operaciones de adición de elementos.

Para estimar el flujo másico de biomasa se emplea la ecuación (4.1) considerando una necesidad energética de 15,8 MJ h<sup>-1</sup>, que corresponde a la energía necesaria para preparar comida para seis personas [75], previniendo que se pueda emplear biomasa de poca calidad y/o húmeda, se toma el poder calorífico inferior de 15 MJ kg<sup>-1</sup> y una eficiencia de gasificación  $\eta_g$  de 60 %. Bajo esas condiciones se estima el flujo másico de combustible:

$$\dot{m}_B = \frac{15,8}{15 \cdot 0,6} = 1,78 \text{ kg h}^{-1} \quad (4.1)$$

Para determinar el ancho del perfil cuadrado requerido se empleó la ecuación (3.3), tomando como referencia el flujo másico estimado antes (Ecuación ((4.1)) y la tasa específica de gasificación a 25 °C más baja reportada por Kaupp [58], correspondiente a aproximadamente 110 kg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Se estima que la dimensión lateral es de 0,127 m, lo que se aproxima al perfil comercial inmediatamente superior de 0,15 m (6").

$$L_R = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1,27 \cdot 1,78}{110}} = 0,127 \text{ m} \quad (4.2)$$

El cálculo de la altura de reactor  $HR$  se realizó con la ecuación (3.4), tomando como referencia la tasa específica de gasificación mencionada anteriormente, un periodo de utilización de 1,5 h y una densidad aparente de biomasa de 320 kg m<sup>-3</sup> [89]. Se aproxima entonces la altura del reactor a 0,55 m.

$$H_R = \frac{110 \cdot 1,5}{320} = 0,51 \text{ m} \quad (4.3)$$

El valor de  $HR$  se utilizó como restricción mínima para el diseño, pues el tiro de chimenea mejora con la altura, factor de peso para el correcto funcionamiento mediante convección natural [12]. Se deja también un espacio libre de 12,5 cm en la parte inferior, para la colocación de la rejilla, este espaciamento pretende disminuir la posibilidad de escape de gases debido a la presión presentada en la columna de biomasa; en la parte superior se encuentra el alimentador, el ducto perforado y la salida de aire secundario, elementos que descuentan espacio útil para la biomasa. Finalmente se establece una altura de 0,76 m, ver Anexo 2.

El material de la rejilla es lámina expandida y sus dimensiones dependen de la sección transversal interna del reactor de gasificación. Este componente se encuentra dentro del reactor, su función es soportar la biomasa, y posibilitar su interacción con el oxígeno. Consiste en una compuerta cuyo movimiento es restringido por bisagras y pasador, es móvil debido a que su apertura permite la descarga de ceniza; además, como debe permitir el paso de aire, tiene que realizarse con lámina expandida. Ver Anexo 3.

#### **4.1.2 Toma de aire principal**

La admisión principal de aire se ubicó en la parte inferior del reactor debido al tipo de técnica de gasificación a implementar. Consta de una sección cuadrada con compuerta fijada por bisagras, posee una manija para el cierre y otra para regular la admisión de aire, según se muestra en el Anexo 4. Las manijas cuentan con un recubrimiento de madera para evitar quemaduras en las personas usuarias, debido a la conducción de calor del metal. Este mecanismo permite el control de la admisión de aire, promoviendo las condiciones necesarias para gasificar mediante convección natural.

La cantidad de aire admitida en el reactor determina si la biomasa se consume mediante combustión o gasificación. La admisión de aire también tiene efectos sobre la tasa de gasificación, su regulación contribuye a un mejor control de la operación de cocción y consumo de biomasa, así como la posibilidad de poder adecuar el funcionamiento del reactor a distintos tipos de biomasa y condiciones atmosféricas. Reed y Larson [92] presenta un abordaje similar para permitir un amplio rango de admisión de aire, señalando la regulación del aire como una de las principales ventajas del proceso de gasificación. En busca de un diseño eficiente y versátil para utilizar distintos tipos de biomasa, Panwar [75] utilizó un regulador de aire con un patrón circular de tres triángulos equidistantes en dos placas circulares, una con la libertad de rotar mediante el accionamiento de una manija .

En este diseño se busca que el ajuste entre la placa cuadrada y las paredes del reactor sea apretado, para que al limitar el ingreso de aire se logre el efecto deseado de regulación. Debido a la heterogeneidad de las biomásas que se pueden emplear en la estufa, este mecanismo de regulación brinda la opción de adecuar las condiciones para dar el efecto deseado sobre la llama obtenida y, en consecuencia, sobre la transferencia de calor para procesos de cocción.

#### **4.1.3 Toma de aire secundaria**

La reacción de gasificación tiende a consumir la totalidad del aire que ingresa por la toma de aire principal, por lo que los gases de la pirólisis son expulsados del reactor sin oxígeno disponible, imposibilitando su combustión. Por tanto, para asegurar la combustión de los gases emitidos resulta imprescindible la adición de una toma de aire secundaria.

El precalentamiento del aire secundario favorece una mejor combustión, con mayores temperaturas de combustión y en consecuencia, un incremento de la eficiencia del sistema [12]. Otro factor importante para asegurar una combustión adecuada del gas de síntesis y reducción de emisiones es proporcionar turbulencia a la salida de la admisión de aire

secundario, de acuerdo con Sakthivadivel e Iniyan [3] una inclinación de 45° asegura los mejores resultados.

Con estas consideraciones se propone un ducto rectangular colocado en contacto con la pared del reactor, ver Anexo 5. Con esa disposición se aprovecha el calor transferido desde las paredes del reactor para calentar el aire secundario mientras sube por el ducto gracias al efecto convectivo, debido al diferencial de temperatura entre los alrededores y la salida del aire secundario. Se realiza con una sección en forma de C de tubo cuadrado de 10 cm x 10 cm (4" x 4"). Su salida debe estar por encima del nivel máximo de llenado, regulado por el alimentador de biomasa, para evitar su obstrucción y la carente o nula combustión de los gases emitidos.

#### **4.1.4 Ducto perforado**

Un espacio libre dentro del reactor para el movimiento de fluido (tanto de aire como productos de gasificación) provee una solución a posibles problemas de estancamiento causados por los efectos de la fricción en las paredes, así como por la presión hidrostática generada por la columna de biomasa, a su vez, contribuye a mejorar el tiro del reactor, actuando como una chimenea larga.

Su implementación tiene la disposición opuesta a lo propuesto por Bantu, Nuwagaba, Kizza y Turinayo [93], quienes utilizaron un reactor con agujeros en las paredes para la salida del gas de síntesis, pero el fin último de ambos abordajes busca lo mismo: facilitar el movimiento de los gases. La colocación de un tubo en el centro del reactor es similar al diseño de Adem y Ambie [94]; sin embargo, dichos autores utilizaron este método para suplir aire secundario tomado desde un espacio libre en el fondo de un reactor de flujo descendente.

Su fabricación requiere un tubo de hierro galvanizado de 43,75 mm (1,75") con cortes a través de la pared distribuidos uniformemente sobre toda la superficie. El tubo requiere tener en su extremo superior un ángulo de 45° tapado con lámina expandida, esta geometría busca distribuir la biomasa que pueda ser depositada sobre la superficie y evitar su obstrucción, para favorecer el flujo de gases hacia la parte superior del reactor. Ver Anexo 6.

#### **4.1.5 Alimentador de biomasa**

La utilización del alimentador es una característica novedosa en estufa gasificada y abre la posibilidad de mejorar las operaciones de cocción al incrementar el tiempo de operación continua de la estufa manteniendo estabilidad en la temperatura del reactor. Como se mencionó previamente, la tendencia es utilización de reactores que funcionan por lote y que, por ende, el aprovechamiento de energía se da por un tiempo restringido por la capacidad volumétrica del reactor y el contenido energético de la biomasa. En respuesta a esa problemática es que la adición de un alimentador se considera para dar la posibilidad de utilizar la estufa por periodos extensos.

El alimentador corresponde al elemento crítico del diseño de la estufa, porque su colocación no debe afectar el ingreso de aire secundario y también porque existe la posibilidad de que actuase como una chimenea.

Al tratarse de un gasificador de flujo ascendente (cuyo frente de reacción sube por la columna de combustible) resulta conveniente agregar nueva biomasa sobre el lecho de combustible, pues la afectación sobre el desarrollo de la reacción es mínima. Para esto es necesario implementar un sistema de tolva y alimentador de espiral, con paso aproximadamente igual al diámetro de la cubierta. Dicha cubierta pretende ser corta, para evitar el atascamiento de biomasa en la espiral. Por ello la parte exterior tiene un ángulo de inclinación de  $64^\circ$ , cuyo propósito es acercar la biomasa al reactor aprovechando el deslizamiento de la biomasa a través del ducto, gracias al efecto de la gravedad. El ángulo utilizado se escogió dando una inclinación más pronunciada que la propuesta por Sakthivadive e Iniyan como mínima [3], por dos razones: facilitar la entrada de biomasa al aumentar la componente de aceleración paralela al plano del alimentador y disminuir el torque asociado a la carga de biomasa en el alimentador al reducir el brazo de palanca, procurando el espacio suficiente para colocar una olla en el quemador. Bajo estas condiciones, la distancia neta de transporte del tornillo es de 15 cm. El alimentador es de

accionamiento manual mediante palanca, la agarradera se cubre con madera para evitar quemaduras y la posibilidad de otros accidentes relacionados. Ver Anexo 7.

Una desventaja de utilizar un sistema de transportador y tolva es la posible liberación de gases a través de la estructura. Este efecto pretende ser minimizado al colocar el eje del transportador en dirección perpendicular al flujo de gases y también, se debe procurar mantener la tolva llena de biomasa, para suplir de una alta pérdida de presión del flujo a través de esta. Para evitar el escape de gases en puntos indeseados, otros autores han implementado sistemas de alimentación con bloqueo, que consisten en una doble compuerta [95]; esta opción resulta compleja para su construcción porque se busca proporcionar un cierre completamente hermético. El diseño propuesto busca que al mantener lleno de biomasa el sistema alimentador-tolva se genere una presión tal que los gases encuentren mayor facilidad al fluir a través del reactor, gracias a los aglomerados formados por la biomasa al experimentar la fuerza axial y radial ejercidas por la espiral. Para detalles de la tolva, ver Anexo 8.

#### **4.1.6 Cono quemador y soporte de olla**

Para evitar la pérdida del gas de síntesis por el efecto de corrientes de aire y proveer una buena combustión, se opta por adicionar una estructura metálica en forma de pirámide truncada de base cuadrada. Esta estructura reduce la pérdida de calor excesiva hacia los alrededores a través de las paredes gracias a su aislamiento y concentra el flujo de calor hacia la olla. Debido a su forma piramidal, se genera turbulencia y con esto se favorece el mezclado de los gases y mejora los resultados sobre su proceso de combustión. Ver Anexo 9.

La apertura para el soporte de olla tiene efectos directos sobre el tiro de la estufa, por lo que para prevenir el estancamiento de gases se optó por dejar un espacio de 3 cm, según lo recomienda Bryden *et al.* [96], para cámaras de combustión cuadradas de 12 cm x 12 cm. La forma del soporte de olla es cuadrada, así se da la posibilidad de utilizar fondos planos o convexos. Ver Anexo 10.

#### **4.1.7 Cobertor**

Para resguardar el material aislante se requiere de la adición de una cubierta. Esta cubierta debe seguir la geometría establecida por las partes que resguarda, por tanto, se realizó mediante cuatro piezas independientes de lámina galvanizada lisas, para facilitar su instalación y colocar correctamente el aislante. Los detalles del cobertor se pueden consultar en el Anexo 11.

### **4.2 Construcción**

Seguidamente se presenta una descripción del proceso constructivo de cada una de las partes definidas en la sección anterior.

#### **4.2.1 Reactor**

Se procedió a cortar una sección de la longitud establecida utilizando una esmeriladora de 112,5 mm (4,5”) y marcando con escuadra la línea de corte. Posteriormente, en el trozo obtenido se realizó el corte para el alimentador de biomasa y la toma de aire secundario.

Debido a que cuando se realizó el agujero para el alimentador no hubo disponibilidad de herramientas para hacer un corte con una broca sierra, se procedió a realizar una serie de agujeros de 6,25 mm (0,25”) con taladro manual. Posteriormente, para asegurar que no existieran fugas de gases en la superficie de contacto entre el reactor y el alimentador se fabricó en un taller un anillo para unir ambos elementos con soldadura. En la Figura 4.2 (a) se puede observar el estado del primer agujero, en la Figura 4.2 (b) la preparación de la pared del reactor para la soldadura, en la Figura 4.2 (c) la preparación del anillo, donde se observa el bisel generado en las esquinas y en la Figura 4.2 (d) el resultado final de la unión por soldadura.

En la Figura 4.3 se muestra el agujero rectangular realizado para la admisión de aire secundario. Esta operación se realizó con esmeriladora y posteriormente, con lima se realizaron dos chaflanes en el borde externo e interno señalados en la Figura 4.3, para obtener finalmente un ajuste apretado para dificultar la salida de gases en la superficie de contacto.

Durante la realización de las operaciones mencionadas antes se encontró la dificultad de hacer que los ajustes fueran apretados para disminuir las pérdidas o fugas de gases. Esto a razón de que se usaron herramientas manuales, como la esmeriladora, para hacer los cortes, cuya precisión es bastante reducida, en especial al tratarse de dimensiones pequeñas como estas. Como las operaciones posteriores de unión serían fijas, con soldadura, era importante que no quedaran grandes aberturas que podían posibilitar la perforación del material debido al efecto del calor.



(a) Agujero.



(b) Preparación de superficie de reactor.

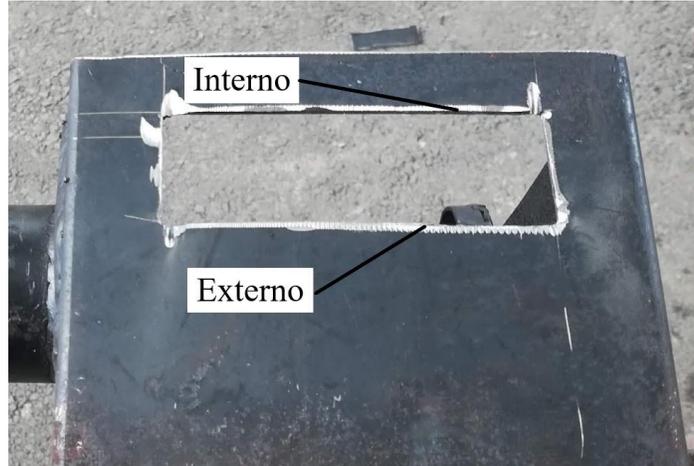


(c) Preparación de anillo.



(d) Unión resultante.

**Figura 4.2.** Instalación de alimentador de biomasa.

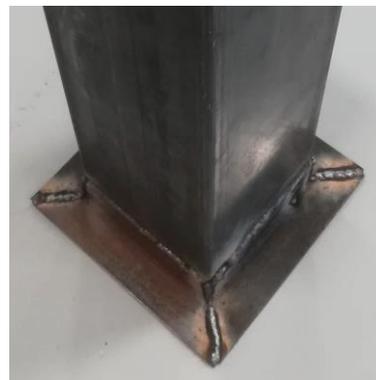


**Figura 4.3.** Agujero del reactor para la admisión de aire secundario.

En el extremo opuesto se colocó un marco de angular de 25 mm (1”), con cortes de 45°, para su posterior unión con soldadura, según se observa en la Figura 4.4. Este corresponde a un elemento estructural para fijar y soportar otras partes, como la toma principal de aire y las patas, pues posibilita aumentar su separación horizontal respecto al centro de masa y con un ángulo de inclinación, para generar una mayor estabilidad del conjunto. Las patas fueron realizadas con angular de 25 mm (1”) y se unieron mediante soldadura a las cuatro esquinas del marco de angular, previamente mencionado.



(a) Colocación inicial.



(b) Marco de angular soldado al reactor.

**Figura 4.4.** Colocación del marco de angular.

#### 4.2.2 Ducto perforado

Se empleó un tubo convencional de hierro galvanizado de 43,75 mm (1,75”) y se realizaron cortes de aproximadamente 25 mm (1”) de largo en toda su superficie, mediante el uso de esmeriladora. Como su posicionamiento es en el centro de la sección transversal del reactor, justo debajo del alimentador de biomasa, se realizó un corte de 45° en uno de sus extremos y se tapó con lámina expandida, para evitar la acumulación de biomasa a dentro del tubo.

El resultado obtenido se presenta en la Figura 4.5. Su fijación se realizó mediante una varilla, que conecta la pared del tubo con la pared del reactor, en ambos elementos se realizó un agujero, por el cual se introdujo la varilla y luego se soldaron juntos.



(a) Cortes y tapa de lámina expandida.



(b) Fijación de varilla al tubo perforado.



(c) Fijación de varilla a la pared del reactor.

**Figura 4.5.** Construcción e instalación del tubo perforado.

### 4.2.3 Rejilla

Consta de un marco, cuya construcción se realizó mediante doblado de varilla de construcción, y sobre este se colocó lámina expandida, como se observa en la Figura 4.6 (a). Se posiciona en la parte inferior del reactor, a 12,5 cm de la entrada de aire principal. Se realizaron bisagras con trozos de angular de 25 mm (1") y un picaporte de accionamiento manual, elaborado con varilla de construcción, con guías para su deslizamiento, también con el mismo angular se fijó un tope a la pared, para la adecuada restricción de movimiento, según se muestra en la Figura 4.6 (b). El adecuado posicionamiento de las guías del picaporte es importante porque durante la fijación, mediante soldadura, estas partes tienen a desalinearse, lo cual genera roce del picaporte y dificultad de accionamiento. Es una de las partes que requieren una mejora, pues al realizar la descarga de las cenizas residuales tras haber utilizado la estufa gasificada, se debe accionar el picaporte por la zona inferior mediante el uso de una varilla, y esto implica que el usuario se debe agachar y acercar sus manos a estas superficies que pueden estar a alta temperatura. Lo cual resulta incómodo y peligroso para el usuario.



(a) Construcción.



(b) Instalación y adición de bisagras, pasador y tope.

**Figura 4.6.** Construcción e instalación de la rejilla.

#### 4.2.4 Toma de aire principal

El proceso de construcción consistió en cortar un cuadrado de 15 cm x 15 cm (6" x 6") en una lámina de hierro negro. Luego se ajustó mediante desbaste con lima para que entrara apretado en el marco de angular mencionado en la Sección 4.2.1. Adicionalmente sobre otra porción de la lámina se trazó una superficie circular con diámetro de 143,75 mm (5,75"), cortada también con el uso de esmeriladora.

Se procedió a marcar el centro de ambas piezas y con un centro punto se hizo la marca para después perforar un agujero con broca de 6,25 mm (0,25") en cada una. Luego se unieron con tornillo y tuerca para ser perforados en 4 puntos equidistantes, con broca de 14 mm (0,5625"), con esto se obtuvo el resultado presentado en la Figura 4.7 (a) y (b).

Al marco de angular fijado al reactor se le realizaron los agujeros para montar una bisagra de 75 mm (3"), para el montaje y apertura de la toma de aire, como se presenta en la Figura 4.7 (c). Posteriormente, a la parte circular se le soldó una varilla de 6,25 mm (0,25") para colocar la manija de apertura de la escotilla. Así mismo, en el marco de angular se perforó un agujero para colocar el cierre de la compuerta y se soldaron dos topes para limitar el rango (de mínimo a máximo) de apertura de la escotilla. El cierre de la compuerta consiste en un pasador que al deslizarse sobre la placa cuadrada la empuja hasta llegar al mismo plano que el marco de angular, como se muestra en la Figura 4.7 (d).



(a) Placa cuadrada.



(b) Placa circular.

**Figura 4.7.** Toma principal de aire.



(c) Montaje.



(d) Cierre de compuerta.

**Figura 4.7.** Toma principal de aire (continuación).

#### 4.2.5 Sistema de alimentación de biomasa

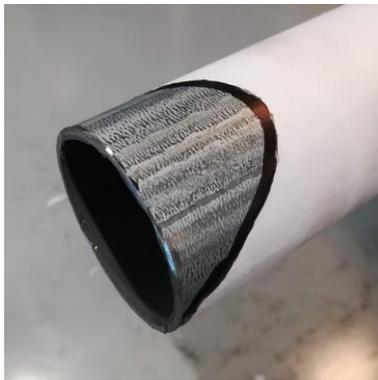
Para realizar la cubierta se utilizaron dos segmentos de tubo redondo de hierro galvanizado. Debido al ángulo y posición entre ellos, fue necesario realizar una unión tipo *boca de pescado*.

El proceso de construcción inició colocando la pieza horizontal en una prensa de banco y se formó un cilindro de papel del ancho del tubo, este fue ajustado utilizando tijera hasta formar el ángulo deseado entre las piezas. Luego se procedió a colocar el cilindro de papel en el otro segmento de tubo y se marcó la forma obtenida en el papel, para poder realizar con esmeriladora el corte y desbaste para dar el ajuste requerido. Después se marcó el tubo horizontal con la geometría obtenida del tubo inclinado y se dio el corte y ajuste requerido.

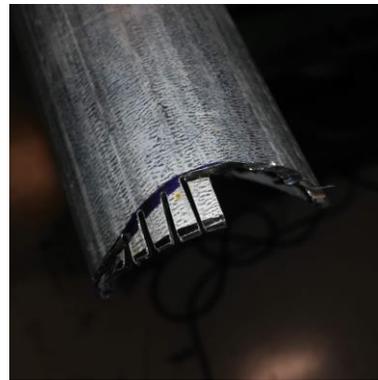
Después, habiendo alcanzado el ángulo deseado se unieron ambas piezas mediante puntos de soldadura. Se verificó el ángulo y luego se soldó por completo. También se cortó y soldó la tapa para el extremo interior del alimentador. Se puede observar el proceso de construcción en la Figura 4.8 y Figura 4.9.

La construcción de la espiral fue realizada principalmente mediante doblado empleando prensa de banco y alicate, hasta obtener la forma deseada. Inicialmente el resultado no fue bueno, pero se siguió mejorando hasta obtener un resultado adecuado, según se puede observar en el progreso mostrado en la Figura 4.9. Los ajustes finales se realizaron una vez realizado el agujero de la tapa interna de la cubierta del alimentador, que funciona como eje de rotación para la espiral y el resultado obtenido fue una espiral de 37,5 mm (1,5”) de diámetro y de paso, como se presenta en la Figura 4.10.

La palanca se realizó de forma sencilla, doblando una varilla de 6,25 mm (0,25”) en dos puntos y luego se colocaron unos refuerzos para mejorar su estabilidad. Dicha palanca fue posteriormente unida mediante soldadura al eje de la espiral del alimentador. La empuñadura se realizó con madera de cedro y su forma se obtuvo mediante el uso de un torno para madera. El proceso en sus distintas etapas se puede observar en la Figura 4.11.

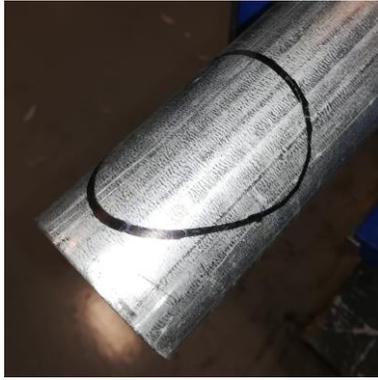


(a) Ajuste para segmento inclinado.



(b) Corte de segmento inclinado.

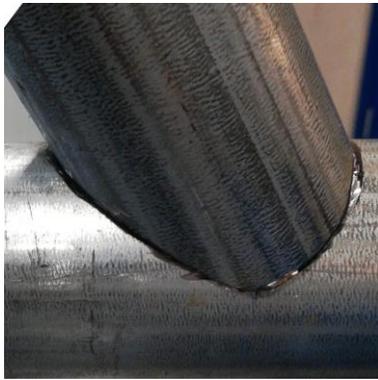
**Figura 4.8.** Construcción de la cubierta del alimentador.



(c) Ajuste para segmento horizontal.



(d) Corte de segmento horizontal.



(e) Ajuste *boca de pescado* obtenido.



(f) Unión por puntos de soldadura.

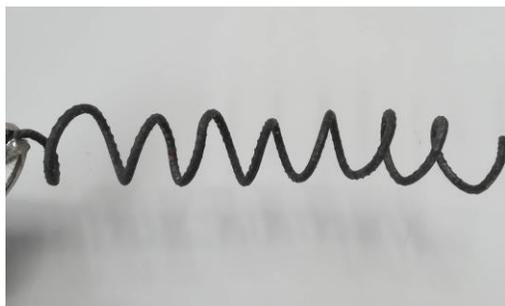


(g) Unión de tapa interna.

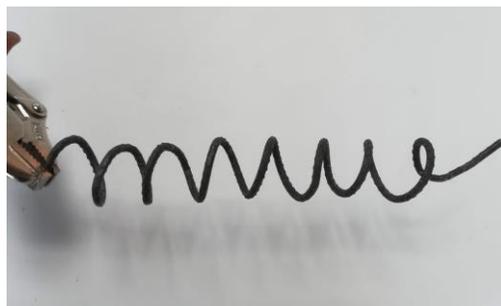


(h) Unión final.

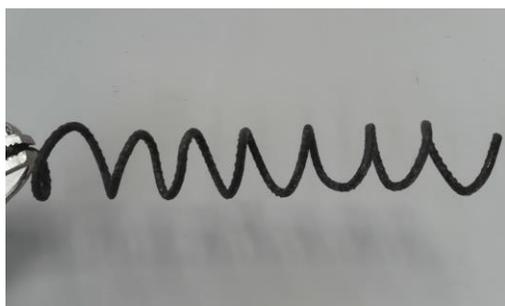
**Figura 4.8** Construcción de la cubierta del alimentador (continuación).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.9.** Construcción de la espiral.

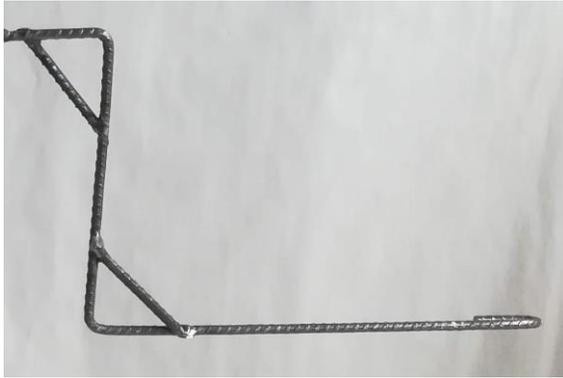


(a) Diámetro.



(b) Paso.

**Figura 4.10.** Dimensiones finales de la espiral.



(a) Palanca.



(b) Empuñadura.



(c) Empuñadura.

**Figura 4.11.** Construcción de palanca.

#### 4.2.6 Toma de aire secundaria

Su construcción consistió en cortar a lo largo un perfil cuadrado de 10 cm (4”), para obtener dos secciones en forma de *C*, como la presentada en la Figura 4.12 (a). Se realizó la adición del segmento inclinado con ángulo de 45° en el extremo de una de las secciones y al mismo se le añadió una tapa, realizada con lámina plana, para formar el ducto dentro del reactor (ver Figura 4.12 (b)).

Después, las secciones obtenidas fueron unidas mediante soldadura, primero mediante puntos y luego con un cordón de soldadura. El resultado obtenido fue el presentado en la Figura 4.12 (c) y (d), que después fue ajustado a la longitud requerida. Por falta de más

material, la toma de aire ubicada en la parte inferior fue realizada con lámina, esta se cortó y dobló de acuerdo con la forma del resto del ducto (ver Figura 4.13 (a)).

La colocación de la toma de aire se presenta en la Figura 4.13 (b), donde se puede observar que también se colocó lámina expandida en la salida, para evitar que por alguna razón pueda entrar alguna partícula grande de biomasa por el ducto. En la parte superior se realizó un cordón de soldadura en los tres lados expuestos del corte rectangular en la pared del reactor, como se señala en la Figura 4.13 (c). El estado final de la toma de aire secundaria es el mostrado en la Figura 4.13 (d).



(a) Sección *C* del tubo cuadrado de 4".



(b) Segmento inclinado.

**Figura 4.12.** Construcción de la toma de aire secundaria.



(c) Vista lateral.



(d) Vista frontal.

**Figura 4.12.** Construcción de la toma de aire secundaria (continuación).



(a) Admisión de aire.



(b) Vista interior.

**Figura 4.13.** Instalación de la toma de aire secundaria.



(c) Vista exterior.



(d) Montaje final.

**Figura 4.13.** Instalación de la toma de aire secundaria (continuación).

#### 4.2.7 Quemador y soporte de olla

En el quemador y el soporte de la olla se utilizó el mismo material que el de las paredes del reactor. Este fue cortado a la longitud requerida con esmeriladora y luego se marcaron las líneas para hacer los cortes que forman la pirámide de base cuadrada, como se puede observar en la Figura 4.14 (a) y obtener el resultado presentado en la Figura 4.14 (b).

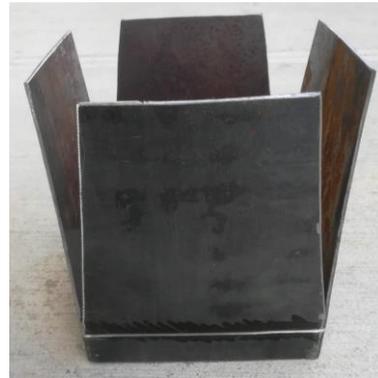
Posteriormente se llevó a la prensa de banco, donde mediante la ayuda de un sargento se doblaron las caras hasta que todas estuvieran en contacto, según se muestra en la Figura 4.14 (c). Seguidamente se unieron mediante un punto de soldadura en cada uno de los vértices, como se ve en la Figura 4.14 (d).

El soporte de la olla se construyó con varilla de 6,25 mm (0,25”) y el proceso consistió en cortar y doblar (en la prensa de banco) cuatro soportes laterales, mostrados en la Figura 4.15 (a), que fueron soldados a los vértices superiores de la pirámide de base cuadrada. Seguidamente se dobló una varilla en forma de cuadrado y sus dos extremos se unieron mediante un punto de soldadura, el resultado se presenta en la Figura 4.15 (b). Luego el cuadrado fue unido a los soportes laterales con soldadura en sus vértices, como se presenta en la Figura 4.15 (c). Adicionalmente se realizaron soportes para el ajuste del quemador sobre el reactor, consiste en cuatro secciones de varilla dobladas en forma de *U* que fueron soldadas

en las esquinas de la base recta del quemador, se pueden observar en la Figura 4.15 (d), estas al acoplarse hacen que el ajuste entre ambos elementos sea apretado.



(a) Marcado del tubo cuadrado.



(b) Corte de tubo cuadrado.



(c) Doblado de las paredes.



(d) Unión de las paredes inclinadas.

**Figura 4.14.** Construcción del quemador.



(a) Soportes laterales.



(b) Soporte cuadrado.



(c) Fijación del quemador.



(d) Adición de soportes de acople.

**Figura 4.15.** Soporte para olla.

#### 4.2.8 Cobertor y aislamiento

La pared se realizó con lámina de hierro negro de 1,5 mm (1/16"). Su función es albergar la capa de aislante y por esa razón sus dimensiones son mayores que las paredes externas del reactor. Para fines prácticos, se realizó en cuatro secciones: dos inferiores (regular) y dos superiores (piramidales), como se presenta en la Figura 4.16 (a); esto para facilitar el montaje del aislante y por las restricciones de longitud para trabajar con la dobladora de láminas mostrada en la imagen. Para la conformación de la pirámide de base cuadrada se empleó la misma técnica del quemador, como se presenta en la Figura 4.16 (b) y (c).



(a) Secciones de pared y dobladora usada.



(b) Marcado.



(c) Corte.

**Figura 4.16.** Construcción de la pared externa.

Para unir las dos piezas piramidales se realizó un marco, también con lámina; el mismo se conforma por cuatro piezas individuales que se unen a cada lado de las paredes inclinadas, esto se puede observar en la Figura 4.17 (a), (b) y (c).



(a) Pieza individual.



(b) Conformación del marco.



(c) Colocación del marco.

**Figura 4.17.** Construcción de pared piramidal.

Una vez finalizada la preparación de la pared externa se prosiguió a trabajar con el material aislante: manta cerámica. Esta fue instalada en dos partes, debido a que su ancho es menor que la longitud del reactor y quemador. Se estimó la cantidad requerida para cubrir el reactor al colocarlo sobre la manta y envolverlo, entonces se dejaron unos 5 cm adicionales.

La manta se colocó sobre la pared del reactor y se amarró con una cuerda, para moldearlo a la forma requerida. Luego se colocaron las paredes externas y se prensaron con sargentos hasta alcanzar las dimensiones establecidas, en ese momento se fijaron las piezas con tornillos. El proceso se puede apreciar en la Figura 4.18. Mientras que el resultado final del proceso de construcción se presenta en la Figura 4.19.



(a) Rollo de manta cerámica.



(b) Sección inferior.



(c) Sección superior.



(d) Apertura para toma de aire secundaria.

**Figura 4.18.** Instalaciones de aislante y pared externa.



**Figura 4.19.** Estufa gasificada construida.

#### **4.2.9 Resumen de cambios en el diseño**

El diseño inicial, presentado en el diagrama de la Figura 3.1, se planteó que el gas de síntesis sería conducido por una tubería y llevado hacia el quemador para su combustión; sin embargo, mediante experimentación se observó que esa propuesta no era viable desde que, al poner el reactor en marcha, los gases escaparon por la zona inferior y la entrada del alimentador. De esa forma se ideó la adición de un quemador abierto como el observado en el diseño final, cuya mayor apertura provee mejores condiciones de flujo; mas no fue suficiente solo esto para tener un sistema funcional, dado que surgió la necesidad de agregar una entrada de aire secundaria para suplir de aire para dar lugar a la combustión del gas de síntesis.

### 4.3 Evaluación

#### 4.3.1 Biomasa

El combustible sólido residual utilizado corresponde a ciprés. Para su utilización en la estufa gasificada fue procesado en la trituradora GTM Professional GTS 1300C para obtener los chips de madera, se realizaron tres pasadas para alcanzar la granulometría adecuada para el buen funcionamiento del alimentador. Los cambios en la granulometría pueden ser observado en la Figura 4.20.

Para el fogón se utilizó leña sin ningún tipo de acondicionamiento especial, más que en trozos de aproximadamente 45 cm de longitud, con diámetros en el rango de 3 cm a 8 cm, como se muestra en la Figura 4.21.



(a) Primera.

(b) Segunda.

(c) Tercera.

**Figura 4.20.** Pasadas de biomasa por la trituradora.



**Figura 4.21.** Leña utilizada en el fogón.

Se determinó que las características promedio de contenido de humedad en base húmeda y poder calorífico inferior de la biomasa corresponden a  $14,5 \pm 0,10 \%$  y  $15,15 \pm 0,09 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Los chips presentaron una densidad aparente promedio de  $183,76 \pm 2,39 \text{ kg m}^{-3}$ . Dicha densidad aparente se mantiene dentro del rango de  $111,7 \text{ kg m}^{-3}$  a  $228,6 \text{ kg m}^{-3}$  para chips obtenidos de coníferas con contenido de humedad en base húmeda entre  $10 \%$  a  $40 \%$ , según lo reportado por Gendek, Aniszewska y Chwedoruk [97].

#### **4.3.2 Pruebas de ebullición de agua**

Las estufas por evaluar con la prueba de ebullición de agua fueron la estufa gasificada, el fogón de ladrillo y la plantilla de gas licuado de petróleo, presentadas en las Figura 3.11 y Figura 4.19, respectivamente. El montaje experimental para la realización de la prueba de ebullición de agua, con el sistema de adquisición de datos en funcionamiento se presenta en la Figura 4.22.



(a) Estufa gasificada.



(b) Fogón de ladrillos.



(c) Plantilla de gas licuado de petróleo.

**Figura 4.22.** Montaje experimental de la prueba de ebullición de agua.

#### 4.3.2.1 Ignición

Para desencadenar la gasificación se requiere proveer un calor suficiente al combustible, por dicha razón se empleó carbón humedecido con kerosén para hacer el encendido, específicamente se utilizaron 70 g y 12,5 g, respectivamente de cada material. La ignición se realizó dentro del reactor, con la entrada principal de aire abierta, para dar aire en exceso y, además, aprovechar al máximo el calor liberado para calentar el reactor y facilitar la gasificación. Una vez alcanzada una temperatura de 300 °C, aproximadamente 2 minutos

después de la ignición, se adicionan los chips de forma progresiva, para no extinguir el fuego. Una vez superada la temperatura de 450 °C, inicia la gasificación y se debe seguir adicionando biomasa, de forma lenta y constante, utilizando el alimentador, hasta tener una llama sostenida.

El combustible líquido utilizado para la ignición es excluido del balance de energía de la prueba de ebullición de agua, debido a que su aporte de energía es instantáneo, únicamente para promover la combustión precursora del proceso de gasificación. Entonces, se considera que los aportes de dicha energía al proceso de ebullición de agua son despreciables.

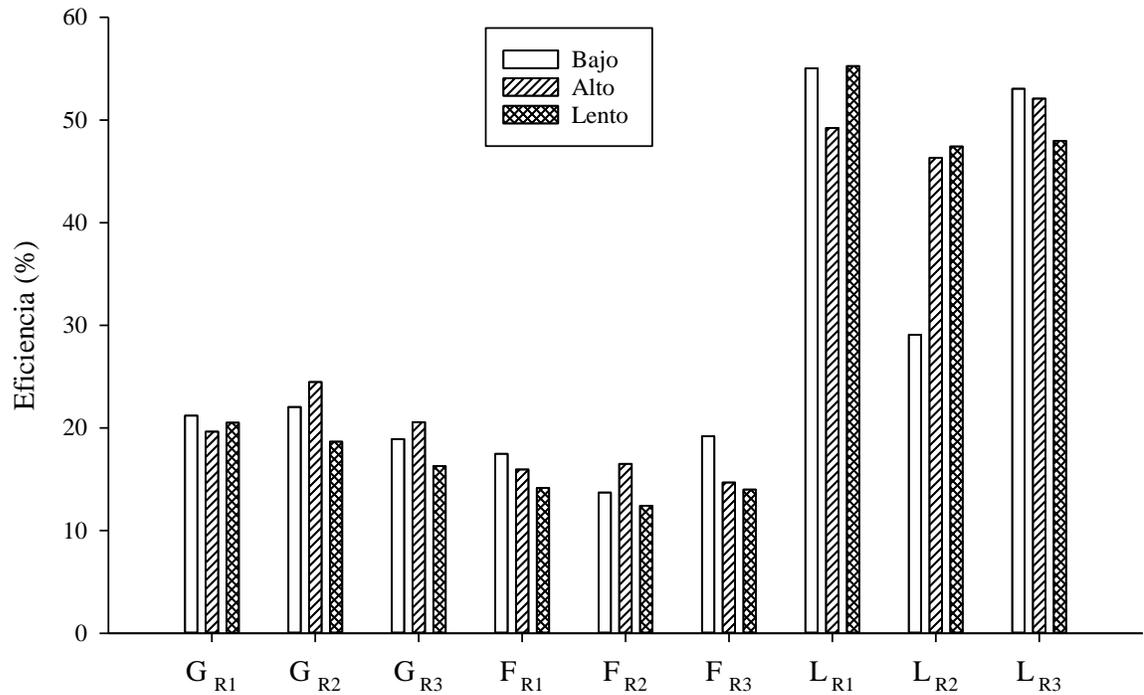
#### **4.3.2.2 Toma de datos térmicos**

En todas las pruebas se registró la temperatura del agua durante la duración del proceso. Pero únicamente para la estufa gasificada se pudo hacer el registro de temperatura dentro del reactor, debido a que por razones físicas se imposibilita colocar las termocuplas dentro del fogón. En el caso de la estufa gasificada, se colocaron tres termocuplas, ubicadas a 10 cm, 30 cm y 45 cm del extremo inferior del reactor, que corresponden al aire previo a la gasificación, el centro del reactor y la parte alta.

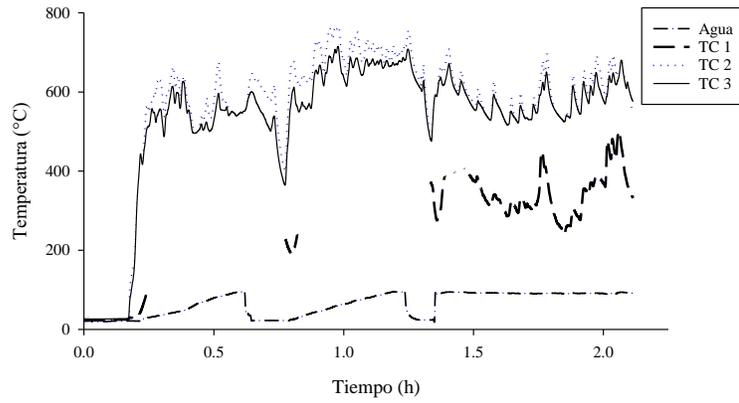
#### **4.3.2.3 Resultado de la prueba de ebullición de agua**

La experimentación es la herramienta que permite conocer el desempeño de un sistema, en este sentido se realizaron las pruebas, conformadas por tres repeticiones para cada una de las estufas en estudio. Los datos generales de eficiencia se presentan en Figura 4.23, donde se puede observar una tendencia similar de eficiencia entre la estufa gasificada y el fogón, en contraste con un rendimiento muy superior de la plantilla de gas licuado de petróleo. Las curvas de calentamiento se presentan en la Figura 4.24, Figura 4.25 y Figura 4.26, para la estufa gasificada, el fogón de ladrillos y la plantilla de gas licuado de petróleo.

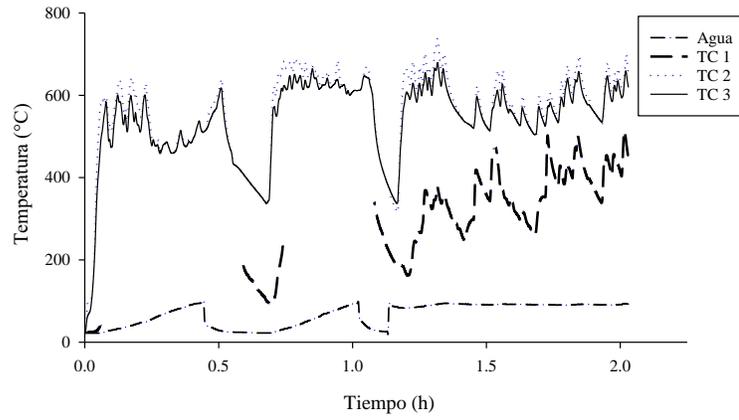
Para la estufa gasificada se pudo obtener la temperatura en el agua, y el interior del reactor mediante las termocuplas (TC) que registraron datos térmicos dentro del reactor.



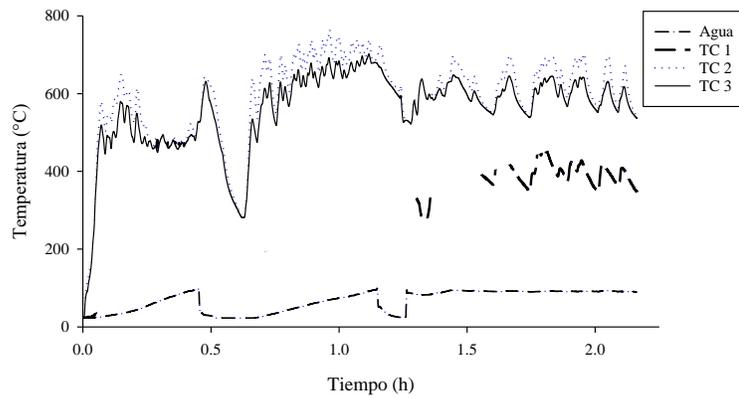
**Figura 4.23.** Resultados de eficiencia para las estufas evaluadas con la prueba de ebullición de agua (G: gasificada, F: fogón, L: GLP) en tres repeticiones.



(a) Prueba uno.

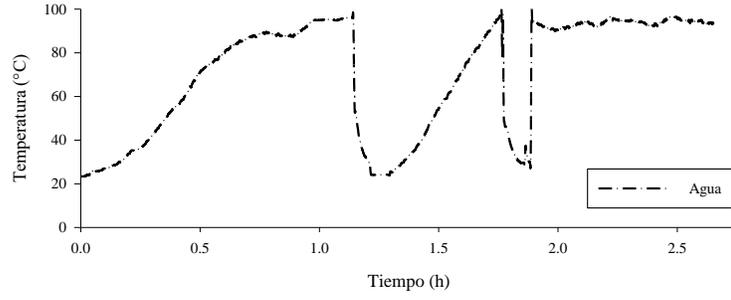


(a) Prueba dos.

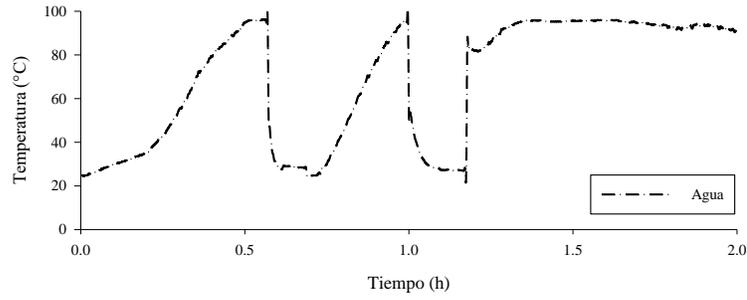


(b) Prueba tres.

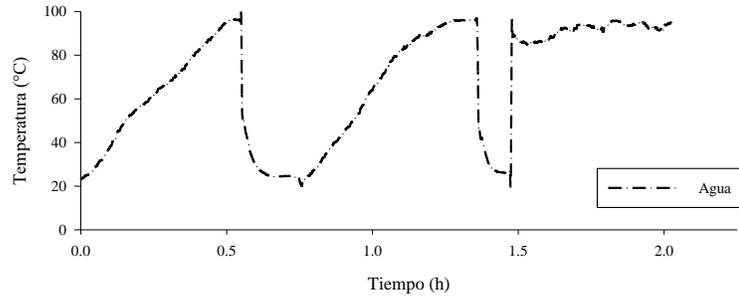
**Figura 4.24.** Curvas de temperatura de la estufa gasificada (TC: termocupla).



(a) Prueba uno.

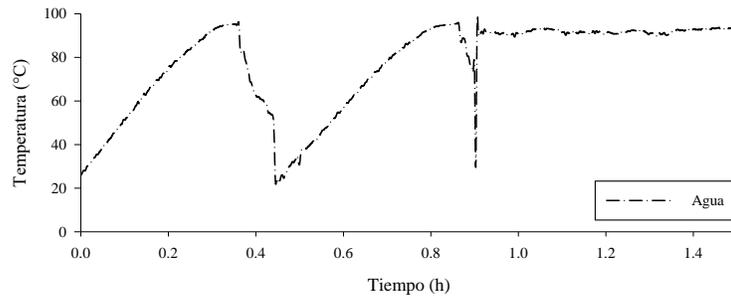


(b) Prueba dos.

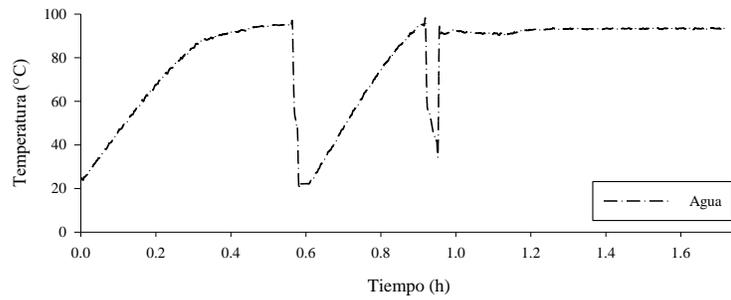


(c) Prueba tres.

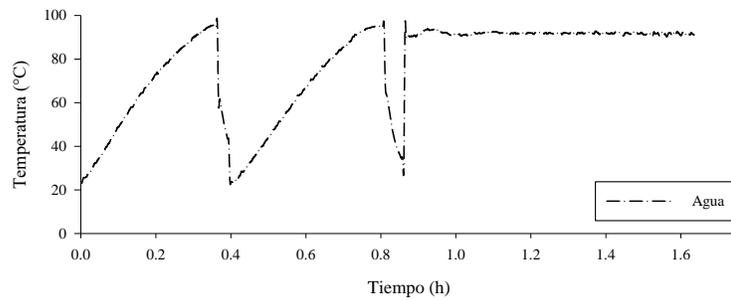
**Figura 4.25.** Curvas de temperatura del fogón de ladrillos.



(a) Prueba uno.



(b) Prueba dos.



(c) Prueba tres.

**Figura 4.26.** Curvas de temperatura de la plantilla de gas licuado de petróleo.

Los resultados obtenidos de consumo de energía para completar la prueba de ebullición de agua fueron comparados con el valor de referencia de 30 MJ establecido por MacCarty et al. [34], para uso internacional en análisis de estufas biomásicas; los mismos se resumen en el Cuadro I. Según la información, el promedio de energía consumida por la

estufa gasificada se posiciona 3,51 % por encima de la expectativa para completar la prueba de ebullición de agua, lo que indica que el consumo es un poco superior a lo aceptable. En relación con la energía promedio requerida por el fogón, presentó un porcentaje de diferencia del 72,71 %; este valor es bastante alto y entre sus causas puede ser debido a la geometría del fogón, la liberación de calor por convección y el dimensionamiento de la biomasa. Sin embargo, más allá de los valores, la aceptación de uso de un sistema depende de su desempeño, conveniencia, precio, apariencia, entre otras. En ese enfoque, los fogones son más simples de construir y su costo de adquisición es mucho más bajo, así como también se requiere de menos recursos para construirlo, la leña utilizada como combustible no requiere de una preparación previa y su manejo es más sencillo.

**Cuadro I.** Energía requerida para completar la prueba de ebullición de agua para las dos estufas biomásicas analizadas.

Estufa	Energía (MJ)
Gasificada	31,05 ± 2,26
Fogón	51,81 ± 14,63

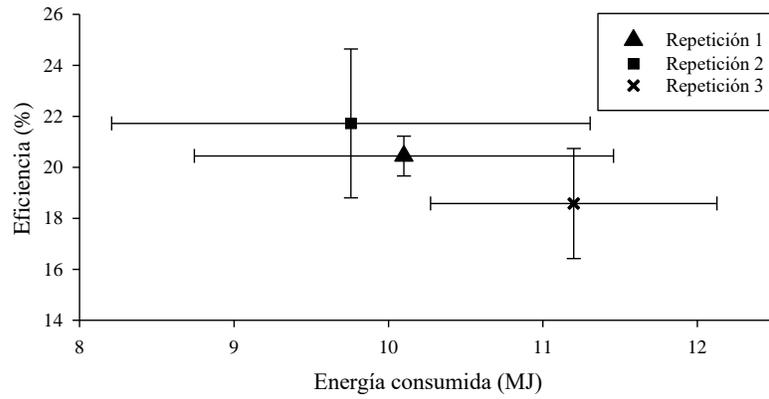
La relación entre el consumo de energía y la eficiencia se puede analizar en la Figura 4.27. Las tres estufas presentan una tendencia a la disminución de eficiencia con el aumento de energía suministrada, lo cual sugiere que, a pesar de tener una alta entrada de energía, la cantidad de calor transferido para el calentamiento de la olla es menor. De acuerdo con Sutar, Singh, Karmakar y Rathore [98], al incrementar el suministro de energía las llamas aumentan sus dimensiones y con ello, mayor es la pérdida de calor hacia los alrededores, en consecuencia, reduciendo la eficiencia térmica. El comportamiento más estable en cuanto a consumo de energía lo presenta la plantilla de gas licuado de petróleo, seguido por la estufa gasificada, mientras que el fogón tuvo la mayor variación. En referencia a la eficiencia, la estufa gasificada tuvo la menor variación, seguido por el fogón y, por último, la plantilla de

gas licuado de petróleo; este último comportamiento se relaciona con lo observado en la Figura 4.26 (b), donde la primera etapa de la prueba de ebullición de agua se extendió más que en las otras dos.

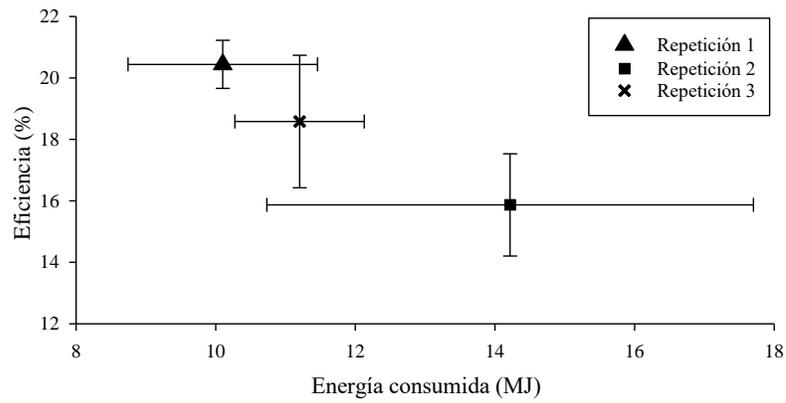
El promedio general de eficiencia térmica que se obtuvo con la estufa gasificada es inferior al de otras estufas gasificadas analizadas en estudios previos, como es el caso de Panwar y Rathore con 26,5 % [61], Panwar con 35 % [75], y Adem y Ambie, quienes reportan un 39,6 % [94], todas para sistemas operando con convección natural y examinadas con la prueba de ebullición de agua. De igual forma, en comparación con estufa gasificada comerciales que operan mediante convección forzada, los resultados obtenidos para el diseño propuesto fueron superados, las estufas Oorja-Plus, Philips y TERI, presentaron eficiencias de 32,3 %, 38,7 % y 39,3 %, respectivamente, en la prueba de ebullición de agua [33]. El aspecto común de todas las estufas mencionadas, y que difiere con el diseño propuesto, es que funcionan con alimentación por lote. Por su parte, la eficiencia de la estufa gasificada sí fue superior al fogón de ladrillos, indicando un mejor aprovechamiento energético. De igual forma, ninguna de las anteriores tuvo resultados comparables con la plantilla de gas licuado de petróleo, con un promedio cercano al 50 % de eficiencia (refiérase al Cuadro II).

**Cuadro II.** Resumen de eficiencia térmica obtenido en la prueba de ebullición de agua.

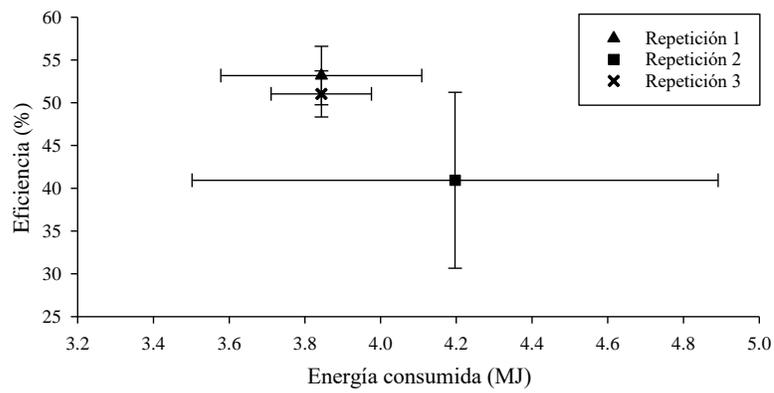
Estufa	Eficiencia térmica (%)	
	Promedio	Desviación estándar
Gasificada	20,25	2,31
Fogón	15,34	2,12
Gas licuado de petróleo	48,38	7,95



(a) Estufa gasificada.



(b) Fogón de ladrillos.



(c) Plantilla de gas licuado de petróleo.

**Figura 4.27.** Energía consumida contra eficiencia térmica para las estufas estudiadas.

#### 4.3.2.4 Análisis de transferencia de calor

Se realizó mediante el abordaje de convección natural, el cuál determina la tasa de transferencia de calor según la siguiente relación:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (4.4)$$

Para realizar la estimación se acude al método de red de resistencias térmicas, definido por la ecuación (4.8), bajo el que se asume transferencia de calor en estado estacionario a través de una pared plana de espesor, área y conductividad térmica determinada. También se asumió que el efecto de la transferencia de calor por radiación es despreciable. Por tanto, es necesario determinar una temperatura de referencia dentro del reactor, de paredes internas y externas, y del ambiente. Con ese fin, se promediaron los datos térmicos recopilados y se contempló la información de propiedades térmicas de los materiales que constituyen la estufa gasificada.

Con la disponibilidad de datos térmicos se procedió a calcular la temperatura de película mediante la ecuación (4.5), que indica un valor promedio entre las superficies ( $T_s$ ) y los alrededores ( $T_{\infty}$ ). Este proceso se realizó para la pared interna y el centro del reactor, como para la pared externa y el ambiente. Con la temperatura de película se consultaron las tablas de propiedades del aire a presión atmosférica [99] y se obtuvieron los valores requeridos para utilizar la correlación empírica del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre placas verticales, expresado en la ecuación (4.6). Para el análisis se consideran las cuatro paredes de la estufa gasificada como una única placa de longitud de 0,935 m.

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} \quad (4.5)$$

$$\text{Nu} = \left( 0,825 + \frac{0,387\text{Ra}_L^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (4.6)$$

Una vez obtenido el número de Nusselt se procedió a despejar el valor estimado del coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ , para el interior y exterior del reactor, mediante la ecuación (4.7).

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L_c} \quad (4.7)$$

Con las consideraciones anteriores y de acuerdo con los datos presentados en el Cuadro III y Cuadro IV, se obtuvo un valor de  $3,37 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$  y  $0,82 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ , para el interior y exterior de la estufa gasificada, respectivamente.

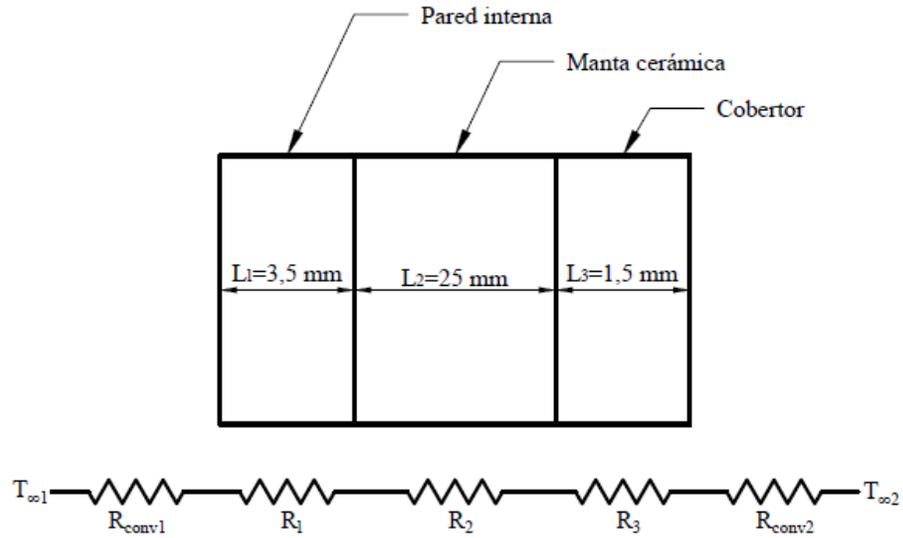
**Cuadro III.** Resumen de datos para cálculo de  $h$  interno.

Item	Abreviatura	Valor	Unidades
Temperatura de película	$T_f$	503,08	°C
Conductividad térmica	$k$	0,06	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$
Número de Prandtl	Pr	0,67	-
Longitud característica	$L_c$	0,94	$m$
Fuerza gravitacional	$g$	9,81	$m \cdot s^{-2}$
Coefficiente de expansión volumétrica	$\beta$	$1,99 \times 10^{-3}$	$\text{°C}^{-1}$
Diferencia de temperaturas	$T_s - T_i$	44,34	°C
Viscosidad cinemática	$\nu$	$7,86 \times 10^{-5}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Número de Raleigh	$\text{Ra}_L$	$7,7 \times 10^7$	-
Número de Nusselt	Nu	56,33	-
Coefficiente de convección	$h_{conv_1}$	3,37	$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C}^{-1}$

**Cuadro IV.** Resumen de datos para cálculo de  $h$  externo.

Item	Abreviatura	Valor	Unidades
Temperatura de película	$T_f$	34,71	$^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica	$k$	0,03	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
Número de Prandtl	Pr	0,74	-
Longitud característica	$L_c$	0,94	$\text{m}$
Fuerza gravitacional	$g$	9,81	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Coefficiente de expansión volumétrica	$\beta$	$2,88 \times 10^{-2}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Diferencia de temperaturas	$T_s - T_i$	22,60	$^{\circ}\text{C}$
Viscosidad cinemática	$\nu$	$1,65 \times 10^{-5}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Número de Raleigh	$\text{Ra}_L$	$1,26 \times 10^{10}$	-
Número de Nusselt	Nu	273,76	-
Coefficiente de convección	$h_{conv_1}$	7,98	$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Para proceder a estimar la tasa de transferencia de calor con las ecuaciones (4.4) y (4.8), además de los  $h$  debemos conocer la conductividad térmica de los materiales de involucrados, estos se resumen en el Cuadro V. El análisis se realizó según el esquema mostrado en la Figura 4.28.



**Figura 4.28.** Red térmica para análisis de la transferencia de calor en la estufa gasificada.

**Cuadro V.** Conductividad térmica de materiales analizados.

Material	Abreviatura	Conductividad térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C$ )	Referencia
Hierro negro	$k_1$	45,3	[99]
Manta cerámica	$k_2$	0,13	[100]

Para la realización del cálculo de resistencia total se emplea la ecuación (4.9), en la que se considera un único valor de área  $A = 0,56 \text{ m}^2$  definido por una longitud de 94 cm y ancho de 60 cm. A pesar de que las áreas aumentan, su influencia es despreciable en el resultado final del cálculo. Se requiere considerar los datos  $h_n$  presentados en el Cuadro III y Cuadro IV, valores  $L_n$  presentados en la Figura 4.28, los valores de  $k_n$  del Cuadro V y el valor de  $A$  definido previamente, para poder determinar el valor de  $R_{total} = 0,87 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , el cual tiene sentido físico desde que la fibra cerámica tiene una conductividad térmica tan baja.

$$R_{total} = R_{conv1} + R_{pared1} + R_{pared2} + \dots + R_{paredn} + R_{conv2} \quad (4.8)$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{conv_1}A} + \frac{L_1}{k_1A} + \frac{L_2}{k_2A} + \frac{L_3}{k_3A} + \frac{1}{h_{conv_2}A} \quad (4.9)$$

$$R_{total} = 0,872 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.10)$$

Se determinó la temperatura promedio del medio interno  $T_\infty$  y de los alrededores  $T_{\infty_2}$ , para poder estimar la tasa de transferencia de calor por convección a través de las paredes y después, considerando el tiempo promedio  $\Delta t = 6180$  s, se estima el calor perdido, según se muestra a continuación:

$$\dot{Q} = \frac{484,11^\circ\text{C} - 23,41^\circ\text{C}}{0,87^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}} = 528,06 \text{ W} \quad (4.11)$$

$$Q_p = \dot{Q} \cdot \Delta t = 3,26 \text{ MJ} \quad (4.12)$$

Con el valor de  $Q_p$  se puede estimar la eficiencia térmica teórica de la estufa gasificada, considerando el valor promedio de energía suministrada  $Q_i = 31,05 \pm 2,26 \text{ MJ}$ , como el producto del poder calorífico inferior por la masa.

$$\eta_T = \frac{Q_i - Q_p}{Q_i} = \frac{31,05 \text{ MJ} - 3,26 \text{ MJ}}{31,05 \text{ MJ}} = 90 \% \quad (4.13)$$

De acuerdo con el valor estimado y los hallazgos experimentales obtenidos mediante la prueba de ebullición de agua en el Cuadro II, queda demostrado que existe una diferencia notoria entre ambas. El abordaje utilizado para el análisis de calor fue simplificado, pues se utilizaron valores promedio de temperatura para realizar cálculos, no se tomaron en cuenta

las pérdidas de calor por radiación, y la estufa gasificada se consideró como una pared plana, por lo que superficies expuestas como el alimentador, la toma de aire secundario y patas, fueron despreciadas. Sin embargo, al observar la distribución de temperatura en la imagen térmica presentada en la Figura 4.29 se nota que las partes mencionadas, y que fueron despreciadas, son puntos calientes que están en contacto con zonas a alta temperatura y pueden ser lo principales focos de pérdida de energía. Al estar conformada por materiales metálicos, su capacidad de conducción térmica es excelente y así en esas partes, se da transferencia de calor hacia los alrededores por convección y radiación. Estos hallazgos demuestran principalmente que, por una parte, la implementación de características como el alimentador ayuda a utilizar la cocina por más tiempo, pero a su vez, es un punto clave para la pérdida de energía. Este es el elemento crítico, porque puede actuar incluso como ducto para la salida de una cierta proporción de los gases de la combustión y gas de síntesis, por lo que aporta pérdidas por conducción, convección y posible deriva de gases.



**Figura 4.29.** Imagen térmica de la estufa gasificada en operación.

## 5 CONCLUSIONES

---

La estufa gasificada propuesta logró gasificar de forma satisfactoria mediante convección natural y cumplir con el requerimiento energético para completar la prueba de ebullición de agua; sin embargo, mediante dicha prueba se determinó un desempeño inferior a diseños desarrollados en otros estudios.

La estufa gasificada presentó eficiencia térmica promedio ligeramente superior al fogón de ladrillos, lo cual implica un menor consumo de biomasa para cumplir con los mismos requerimientos energéticos.

A pesar de eso, su construcción fue mucho más complicada, laboriosa y demandó el uso de muchas herramientas; además, para su puesta en marcha, el acondicionamiento de la biomasa fue dependiente del consumo de otras fuentes energéticas.

El análisis de transferencia de calor indica que las pérdidas por convección a través de las paredes del reactor dan como resultado una eficiencia del sistema del 90 %, mientras que la prueba de ebullición de agua arrojó un promedio cercano al 20 %, indicando que la mayor parte de las pérdidas de energía no están relacionadas con esta parte de la estructura. Lo cual sugiere que los otros partes identificados como puntos calientes (el alimentador, el sistema de admisión de aire primario y secundario) tuvieron gran influencia en la transferencia de calor hacia los alrededores.

## 6 RECOMENDACIONES

---

Caracterizar la composición de las emisiones de la estufa gasificada y las estufas de referencia para realizar una comparación y analizar el potencial impacto a la salud asociado con el uso de cada una.

Utilizar otras biomásas para realizar las pruebas de ebullición de agua y definir los efectos sobre el rendimiento energético del sistema.

Realizar modelación mediante dinámica computacional de fluidos para analizar el proceso de transferencia de calor y definir puntos de mejora.

Optimizar las dimensiones que conforman la estufa gasificada y realizar una nueva evaluación de rendimiento.

Realizar pruebas de cocción de alimentos en condiciones más cercanas a la realidad de un potencial usuario y caracterizar el rendimiento térmico y requerimiento energético de la estufa gasificada.

Identificar y probar materiales alternativos para el aislamiento del reactor.

## 7 REFERENCIAS

---

- [1] R. Heltberg, «Factors determining household fuel choice in Guatemala», *Environment and Development Economics*, vol. 10, n.º 3, pp. 337-361, 2005.
- [2] World Health Organization, «Household air pollution and health», *Fact Sheets*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>. [Accedido: 17-oct-2019].
- [3] D. Sakthivadivel y S. Iniyar, «Combustion characteristics of biomass fuels in a fixed bed micro-gasifier cook stove», *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, n.º 2, pp. 995-1002, 2017.
- [4] M. Njenga, J. K. Gitau, M. Iiyama, R. Jamnadassa, Y. Mahmoud, y N. Karanja, «Innovative biomass cooking approaches for sub-Saharan Africa», *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, vol. 19, n.º 1, pp. 14066-14087, 2019.
- [5] J. Baumgartner, K. R. Smith, y A. Chockalingam, «Reducing CVD through improvements in household energy: Implications for policy-relevant research», *Global Heart*, vol. 7, n.º 3, pp. 243-247, 2012.
- [6] A. L. Northcross, S. Katharine Hammond, E. Canuz, y K. R. Smith, «Dioxin inhalation doses from wood combustion in indoor cookfires», *Atmospheric Environment*, vol. 49, pp. 415-418, 2012.
- [7] N. MacCarty, D. Ogle, D. Still, T. Bond, y C. Roden, «A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves», *Energy for Sustainable Development*, vol. 12, n.º 2, pp. 56-65, 2008.
- [8] W. Yang, Y. Zhu, W. Cheng, H. Sang, H. Yang, y H. Chen, «Characteristics of Particulate Matter Emitted from Agricultural Biomass Combustion», *Energy and Fuels*, vol. 31, n.º 7, pp. 7493-7501, 2017.
- [9] K. A. Motghare, A. P. Rathod, K. L. Wasewar, y N. K. Labhsetwar, «Comparative study of different waste biomass for energy application», *Waste Management*, vol. 47, pp. 40-45, 2016.
- [10] I. Ruiz-Mercado, O. Masera, H. Zamora, y K. R. Smith, «Adoption and sustained use of improved cookstoves», *Energy Policy*, vol. 39, n.º 12, pp. 7557-7566, 2011.
- [11] Y. Mehta y C. Richards, «Gasification performance of a top-lit updraft cook stove», *Energies*, vol. 10, n.º 10, 2017.

- [12] K. B. Sutar, S. Kohli, M. R. Ravi, y A. Ray, «Biomass cookstoves: A review of technical aspects», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1128-1166, 2015.
- [13] J. Bronowski, «The Hidden Structure», en *The Ascent of Man*, Londres: BBC, 2011, p. 97.
- [14] R. Wrangham, «Control of fire in the paleolithic: Evaluating the cooking hypothesis», *Current Anthropology*, vol. 58, n.º S16, pp. S303-S313, 2017.
- [15] Manoj Kumar, Sachin Kumar, y S. K. Tyagi, «Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 265-285, 2013.
- [16] Regional Wood Energy Development in Asia y FAO, «Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: a Development Manual», Bangkok, 1993.
- [17] A. Jerneck y L. Solson, «Smoke: cooking, coughing and collective action in Kenya», en *Ecology and Power: Struggles over Land and material Resources in the past*, A. Hornborg, B. Clark, y K. Hermele, Eds. Nueva York: Routledge, 2012, pp. 274-276.
- [18] J. Ramakrishna, M. . Durgaprasad, y K. R. Smith, «Cooking in India : the impact of improved stoves on indoor air quality», *Environmental International*, vol. 15, pp. 341-352, 1989.
- [19] C. Somerville, «Support for the First Generation Projects», en *Drought and Aid in the Sahel: A Decade of Development Cooperation*, Nueva York: Routledge, 2018, pp. 193-195.
- [20] B. Westhoff y D. Germann, «Stove Trials and Tribulations», en *Stove images: A Documentation of Improved and Traditional Stoves in Africa, Asia and Latin America*, Frankfurt, 1995, pp. 22-23.
- [21] S. F. Baldwin, «Stove Design», en *Biomass stoves: Engineering design, development and dissemination*, Arlington: VITA, 1987, pp. 34-63.
- [22] S. . Sharma, B. P. . Sethi, y S. Chopra, «Thermal Performance of the “Rohini” - An improved Cooksove», *Energy Conversion and Management*, vol. 30, n.º 4, pp. 409-419, 1990.
- [23] K. R. Smith y D. Keyun, «A Chinese National Improved Stove Program for the 21st Century to Promote Rural, Social, and Economic Development», *Energy Policy Research*, n.º 1, pp. 24-25, 2010.
- [24] C. Venkataraman, A. D. Sagar, G. Habib, N. Lam, y K. R. Smith, «The Indian National Initiative for Advanced Biomass Cookstoves: The benefits of clean combustion»,

- Energy for Sustainable Development*, vol. 14, n.º 2, pp. 63-72, 2010.
- [25] M. P. Kshirsagar y V. R. Kalamkar, «A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 580-603, 2014.
- [26] M. Njenga *et al.*, «Gasifier as a cleaner cooking system in rural Kenya», *Journal of Cleaner Production*, vol. 121, pp. 208-217, 2016.
- [27] K. Mano Geleta, «Traditional Three Stone Stove at Gewane Afar Cluster», 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/Traditional-Three-Stone-Stove-at-Gewane-Afar-Cluster\\_fig3\\_322112882](https://www.researchgate.net/figure/Traditional-Three-Stone-Stove-at-Gewane-Afar-Cluster_fig3_322112882). [Accedido: 04-jun-2020].
- [28] «Chulhas linked to 25% of pollution-related deaths in India», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://lawgupshup.com/2018/01/chulhas-linked-to-25-of-pollution-related-deaths-in-india/>. [Accedido: 04-jun-2020].
- [29] Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, *Estufas Ahorradoras de Leña para el Hogar Rural: validación y construcción*. Turrialba: CATIE, 1994.
- [30] X. Meng, W. De Jong, y T. Kudra, «A state-of-the-art review of pulse combustion: Principles, modeling, applications and R&D issues», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 73-114, 2016.
- [31] M. Sedighi y H. Salarian, «A comprehensive review of technical aspects of biomass cookstoves», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, n.º February 2015, pp. 656-665, 2017.
- [32] P. Verhaart, «On designing woodstoves», *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section C: Engineering Sciences*, vol. 5, n.º 4, pp. 287-326, 1982.
- [33] P. Raman, J. Murali, D. Sakthivadivel, y V. S. Vigneswaran, «Performance evaluation of three types of forced draft cook stoves using fuel wood and coconut shell», *Biomass and Bioenergy*, vol. 49, pp. 333-340, 2013.
- [34] N. MacCarty, D. Still, y D. Ogle, «Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance», *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, n.º 3, pp. 161-171, 2010.
- [35] L. Kou, Y. Song, X. Zhang, y T. Tan, «Comparison of four types of energy grasses as lignocellulosic feedstock for the production of bio-ethanol», *Bioresource Technology*, vol. 241, pp. 424-429, 2017.
- [36] J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, C. T. Wright, R. D. Boardman, y N. A. Yancey, «A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods», *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual*

*International Meeting 2011, ASABE 2011*, vol. 3, pp. 2053-2083, 2011.

- [37] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva, y T. J. Morgan, «An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass», *Fuel*, vol. 94, pp. 1-33, 2012.
- [38] K. C. Surendra, R. Ogoshi, H. M. Zaleski, A. G. Hashimoto, y S. K. Khanal, «High yielding tropical energy crops for bioenergy production: Effects of plant components, harvest years and locations on biomass composition», *Bioresource Technology*, vol. 251, n.º December 2017, pp. 218-229, 2018.
- [39] Ministerio de Ambiente y Energía y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Plan Nacional de Energía 2015-2030», San José, 2015.
- [40] C. Roldán Villalobos, «Informe de capacidad de energías limpias disponibles en Costa Rica 2010», Cartago, 2012.
- [41] L. Chacón, O. Coto, y M. Flores, «Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica», 2018.
- [42] O. C. Coto, «Uso de los Residuos Agrícolas Orgánicos como Fuente de Energía : Aprovechamiento de Recursos y Reducción de Gases de Efecto Invernadero en Costa Rica», San José, 2013.
- [43] L. Zhang, C. Xu, y P. Champagne, «Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass», *Energy Conversion and Management*, vol. 51, n.º 5, pp. 969-982, 2010.
- [44] V. Pasangulapati, K. D. Ramachandriya, A. Kumar, M. R. Wilkins, C. L. Jones, y R. L. Huhnke, «Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass», *Bioresource Technology*, vol. 114, pp. 663-669, 2012.
- [45] U. Arena, «Fluidized bed gasification», en *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*, Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 765-812.
- [46] M. Balat, M. Balat, E. Kirtay, y H. Balat, «Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems», *Energy Conversion and Management*, vol. 50, n.º 12, pp. 3147-3157, 2009.
- [47] A. Demirbaş, «Supercritical fluid extraction and chemicals from biomass with supercritical fluids», *Energy Conversion and Management*, vol. 42, n.º 3, pp. 279-294, 2001.
- [48] Q. Liu, S. C. Chmely, y N. Abdoumoumine, «Biomass Treatment Strategies for

- Thermochemical Conversion», *Energy and Fuels*, vol. 31, n.º 4, pp. 3525-3536, 2017.
- [49] S. Dassapa, «Thermochemical Conversion of Biomass», en *Transformation of Biomass: Theory to Practice*, A. Hornung, Ed. Chichester: Wiley, 2014, pp. 133-155.
- [50] M. Balat, M. Balat, E. Kirtay, y H. Balat, «Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems», *Energy Conversion and Management*, vol. 50, n.º 12, pp. 3158-3168, 2009.
- [51] C. Roth, «Cooking on wood-gas from dry biomass - how it works», Frankfurt, 2014.
- [52] J. Rezaiyan y N. P. Cheremisinoff, «Principles of gasification», en *Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists*, Hoboken: Taylor & Francis, 2005, pp. 5-10.
- [53] S. Heidenreich, M. Müller, y P. U. Foscolo, «Fundamental Concepts in Biomass Gasification», en *Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility*, Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press, 2016, pp. 7-10.
- [54] W. De Jong y J. R. van Ommen, «Physical Pretreatment of Biomass», en *Biomass as a sustainable energy source for the future: fundamentals of conversion processes*, Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014, pp. 233-236.
- [55] S. Dassapa, «Reactor Design and Its Impact on Performance and Products», en *Transformation of Biomass: Theory to Practice*, A. Hornung, Ed. Chichester: Wiley, 2014, pp. 83-84.
- [56] J. Rezaiyan y N. P. Cheremisinoff, «Biogasification», en *Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists*, Hoboken: Taylor & Francis, 2005, pp. 127-132.
- [57] D. Müller-Stöver, J. Ahrenfeldt, J. K. Holm, S. G. S. Shalatet, U. Henriksen, y H. Hauggaard-Nielsen, «Soil application of ash produced by low-temperature fluidized bed gasification: Effects on soil nutrient dynamics and crop response», *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 94, n.º 2-3, p. 194, 2012.
- [58] A. Kaupp, «Design considerations for a rice hull gas producer», en *Gasification of Rice Hulls: Theory and Praxis*, Braunschweig: Springer, 1984, p. 272.
- [59] T. J. Hager y R. Morawicki, «Energy consumption during cooking in the residential sector of developed nations: A review», *Food Policy*, vol. 40, pp. 54-63, 2013.
- [60] X. Li, C. Lin, Y. Wang, L. Zhao, N. Duan, y X. Wu, «Analysis of rural household energy consumption and renewable energy systems in Zhangziying town of Beijing», *Ecological Modelling*, vol. 318, pp. 184-193, 2015.

- [61] N. L. Panwar y N. S. Rathore, «Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove», *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, n.º 12, pp. 1349-1352, 2008.
- [62] V. L. Pandey y A. Chaubal, «Comprehending household cooking energy choice in rural India», *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, n.º 11, pp. 4724-4731, 2011.
- [63] P. D. C. Wijayatunga y R. A. Attalage, «Analysis of household cooking energy demand and its environmental impact in Sri Lanka», *Energy Conversion and Management*, vol. 43, n.º 16, pp. 2213-2223, 2002.
- [64] A. Gandigude y M. Nagarhalli, «Simulation of Rocket Cook-Stove Geometrical Aspect for its Performance Improvement», *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, n.º 2, pp. 3903-3908, 2018.
- [65] H. S. Mukunda *et al.*, «Gasifier stoves - science, technology and field outreach», *Current Science*, vol. 98, n.º 5, pp. 627-638, 2010.
- [66] L. Van Zyl *et al.*, «Effects of Fuel Moisture Content on Emissions from a Rocket-Elbow Cookstove», *Environmental Science and Technology*, vol. 53, n.º 8, pp. 4648-4656, 2019.
- [67] J. J. Caubel, V. H. Rapp, S. S. Chen, y A. J. Gadgil, «Optimization of Secondary Air Injection in a Wood-Burning Cookstove: An Experimental Study», *Environmental Science and Technology*, vol. 52, n.º 7, pp. 4449-4456, 2018.
- [68] J. J. Jetter y P. Kariher, «Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions», *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, n.º 2, pp. 294-305, 2009.
- [69] Clean Cooking Alliance, «Philips HD4008», *Clean Cooking Catalog*. [En línea]. Disponible en: <http://catalog.cleancookstoves.org/stoves/46>. [Accedido: 18-dic-2020].
- [70] Clean Cooking Alliance, «Oorja», *Clean Cooking Catalog*. [En línea]. Disponible en: <http://catalog.cleancookstoves.org/test-results/413>. [Accedido: 18-dic-2020].
- [71] ASHRAE, «Insulation for mechanical systems», en *Handbook of Fundamentals*, 2009, pp. 338-339.
- [72] F. Hu, S. Wu, y Y. Sun, «Hollow-Structured Materials for Thermal Insulation», *Advanced Materials*, vol. 31, n.º 38, pp. 1-17, 2019.
- [73] N. A. MacCarty y K. M. Bryden, «A unified set of experimental data for cylindrical, natural draft, shielded, single pot, wood-fired cookstoves», *Energy for Sustainable Development*, vol. 26, pp. 62-71, 2015.

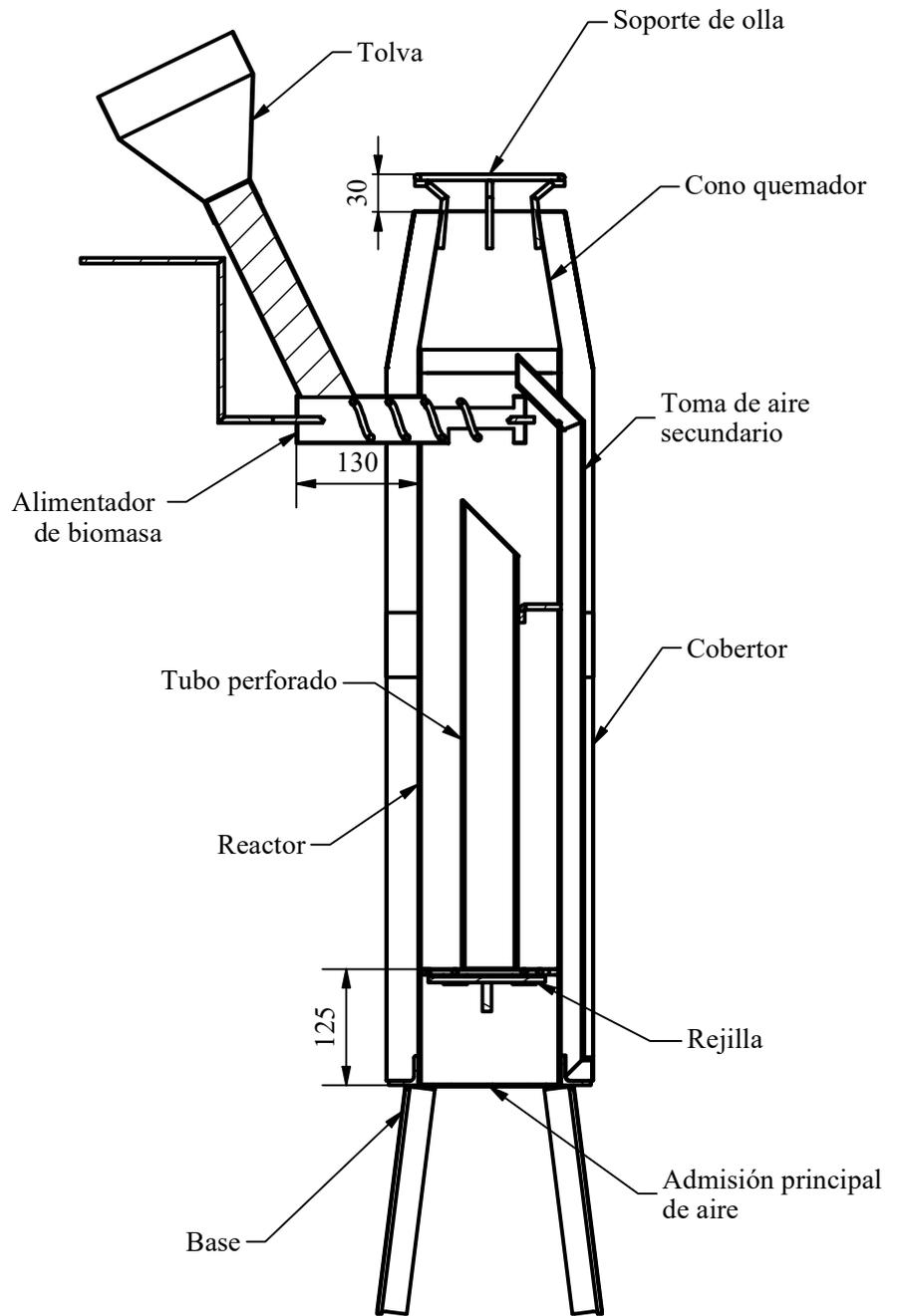
- [74] J. Agenbroad, M. DeFoort, A. Kirkpatrick, y C. Kreutzer, «A simplified model for understanding natural convection driven biomass cooking stoves-Part 2: With cook piece operation and the dimensionless form», *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, n.º 2, pp. 169-175, 2011.
- [75] N. L. Panwar, «Design and performance evaluation of energy efficient biomass gasifier based cookstove on multi fuels», *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 14, n.º 7, pp. 627-633, 2009.
- [76] ASHRAE, «Indoor Environmental Health», en *Handbook of Fundamentals*, 2009, pp. 140-152.
- [77] M. Palumbo, A. M. Lacasta, A. Navarro, M. P. Giraldo, y B. Lesar, «Improvement of fire reaction and mould growth resistance of a new bio-based thermal insulation material», *Construction and Building Materials*, vol. 139, pp. 531-539, 2017.
- [78] E. Aminudin, M. F. Md Din, M. W. Hussin, A. H. Abdullah, K. Iwao, y Y. Ichikawa, «Properties of agro-industrial aerated concrete as potential thermal insulation for building», en *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 47.
- [79] K. R. Cummer y R. C. Brown, «Ancillary equipment for biomass gasification», *Biomass and Bioenergy*, vol. 23, n.º 2, pp. 113-128, 2002.
- [80] T. B. Reed y A. Das, «Gasifier Fuels», en *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*, Colorado: SERI . U.S. Department of Energy, 1988, p. 19.
- [81] A. González Hassig, C. A. García Ubaque, y G. F. Talero Rojas, «Estudio de planta piloto para peletización de residuos madereros y su utilización como combustible en hornos ladrilleros», *Revista Tecnura*, vol. 18, n.º 40, p. 64, 2014.
- [82] C. Wilén y A. Rautalin, «Handling and feeding of biomass to pressurized reactors: Safety engineering», *Bioresource Technology*, vol. 46, n.º 1-2, pp. 77-85, 1993.
- [83] J. Dai y J. R. Grace, «A model for biomass screw feeding», *Powder Technology*, vol. 186, n.º 1, pp. 40-55, 2008.
- [84] J. Dai, H. Cui, y J. R. Grace, «Biomass feeding for thermochemical reactors», *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, n.º 5, pp. 724-725, 2012.
- [85] J. . Metcalf, «The mechanichs of the screw feeder», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 180, n.º 6, pp. 131-146, 1965.
- [86] A. Cowell, «Small-scale bulk handling operations», en *Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation*, D. McGlinchey, Ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2008, pp. 250-285.

- [87] L. Bates, «Screw Conveyors», en *Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation*, D. McGlinchey, Ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2008, pp. 197-220.
- [88] Nova Bulk Handlers, «Nova Bulk Handlers», *Shaft Less Screw Conveyor*, 2020. .
- [89] KWS Design Engineering Manufacturing, «Bulk Material Characteristics», *Screw Conveyors: Engineering Guide*, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.kwsmfg.com/engineering-guides/screw-conveyor/>. [Accedido: 01-sep-2020].
- [90] KWS Design Engineering Manufacturing, «Types of Screw Conveyors», *Screw Conveyors: Engineering Guide*, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.kwsmfg.com/engineering-guides/screw-conveyor/>. [Accedido: 01-sep-2020].
- [91] B. Boundy, S. W. Diegel, L. Wright, y S. C. Davis, «The Effect of Moisture on Heating Values», Oak Ridge, 2011.
- [92] T. B. Reed y R. Larson, «A wood-gas stove for developing countries», *Energy for Sustainable Development*, vol. 3, n.º 2, pp. 34-37, 1996.
- [93] A. A. Bantu, G. Nuwagaba, S. Kizza, y Y. K. Turinayo, «Design of an Improved Cooking Stove Using High Density Heated Rocks and Heat Retaining Techniques», *Journal of Renewable Energy*, vol. 2018, pp. 1-9, 2018.
- [94] K. D. Adem y D. A. Ambie, «Performance and emission reduction potential of micro-gasifier improved through better design», *AIMS Energy*, vol. 5, n.º 1, pp. 63-76, 2017.
- [95] B. Gumino, N. A. Pohlman, J. Barnes, y P. Wever, «Design Features and Performance Evaluation of Natural-Draft , Continuous Operation Gasifier Cookstove», *Clean Technologies*, pp. 252-269, 2020.
- [96] M. Bryden *et al.*, «Designing Stoves with Baldwin and Winiarski», en *Design Principles for Wood Burning Cook Stoves*, 2006, p. 18.
- [97] A. Gendek, M. Aniszewska, y K. Chwedoruk, «Bulk density of forest energy chips», *Agricultural and Forest Engineering*, vol. 67, n.º 67, pp. 101-111, 2016.
- [98] K. B. Sutar, R. Singh, A. Karmakar, y V. Rathore, «Experimental investigation on thermal performance of three natural draft biomass cookstoves», *Energy Efficiency*, vol. 12, n.º 3, pp. 749-755, 2019.
- [99] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, «Tablas y diagramas de propiedades (Sistema Internacional)», en *Transferencia de calor y de masa: fundamentos y aplicaciones*, 4.<sup>a</sup> ed., México: McGraw-Hill, 2011, pp. 849, 885.

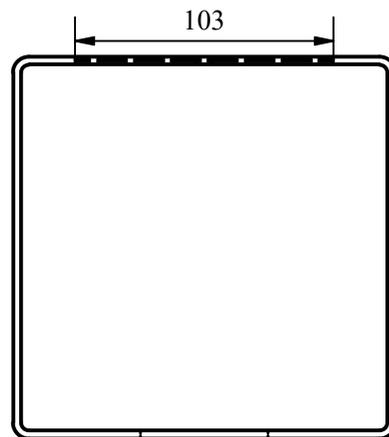
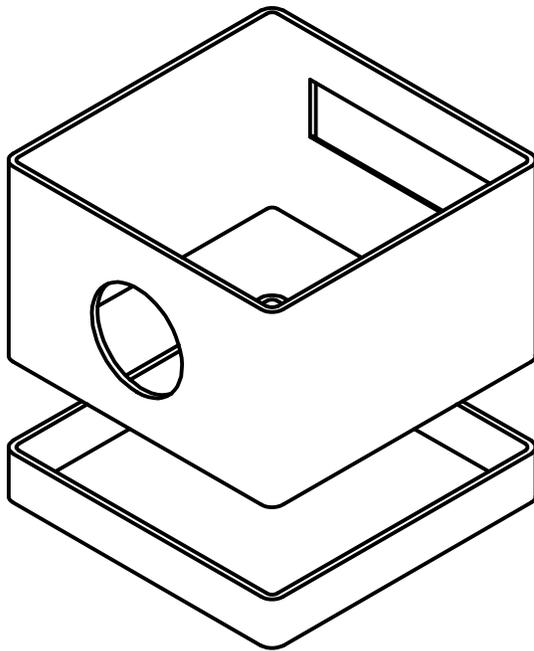
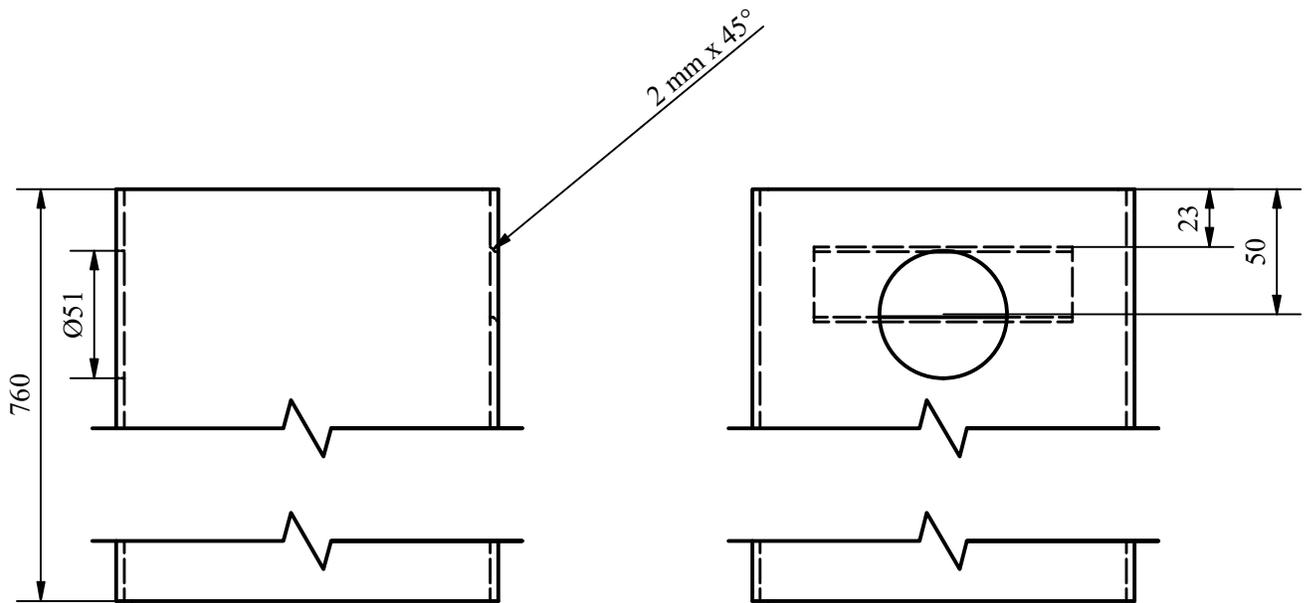
[100] Morgan Advanced Materials, «Refractory Ceramic Fiber Blanket», *Datasheet Code US: 5-14-205*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.lynnmfg.com/wp-content/uploads/data/DATA-TC-514-205.pdf>. [Accedido: 08-ene-2021].



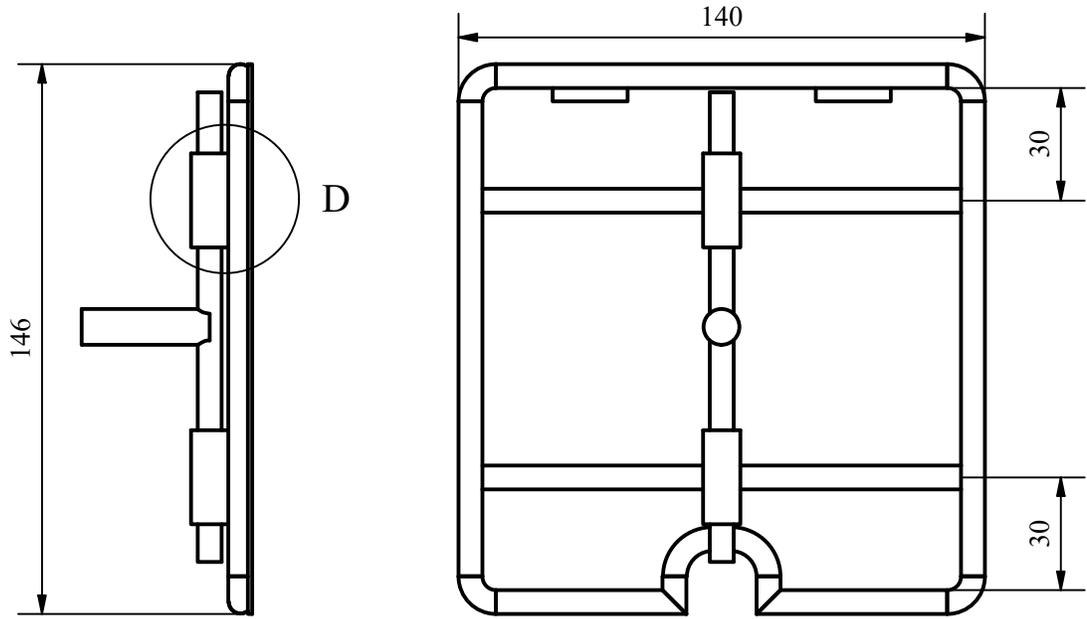
Detalle J-J ( ESC: 0.125:1 )



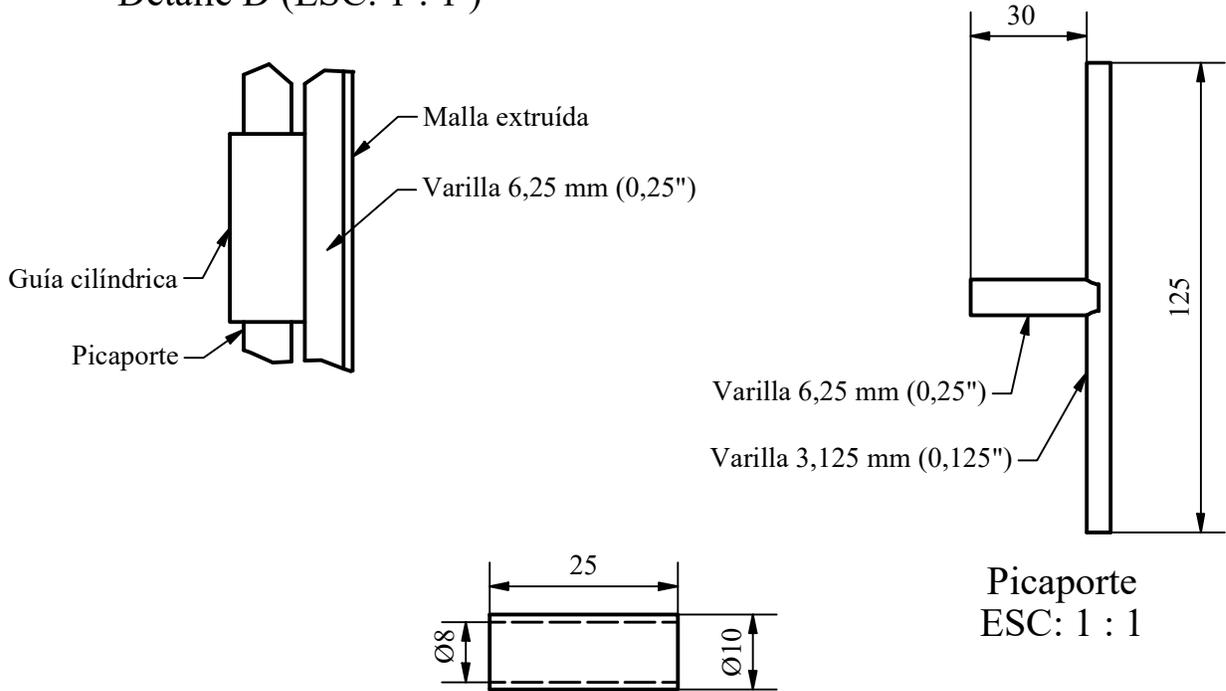
Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Ensamble general		Escala del dibujo ESC: 0.125:1		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Varios	Anexo 1	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 1/11



Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Paredes del reactor		Escala del dibujo ESC: 1 : 3		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Perfil de 15 cm x 15 cm (6" x 6")	Anexo 2	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 2/11

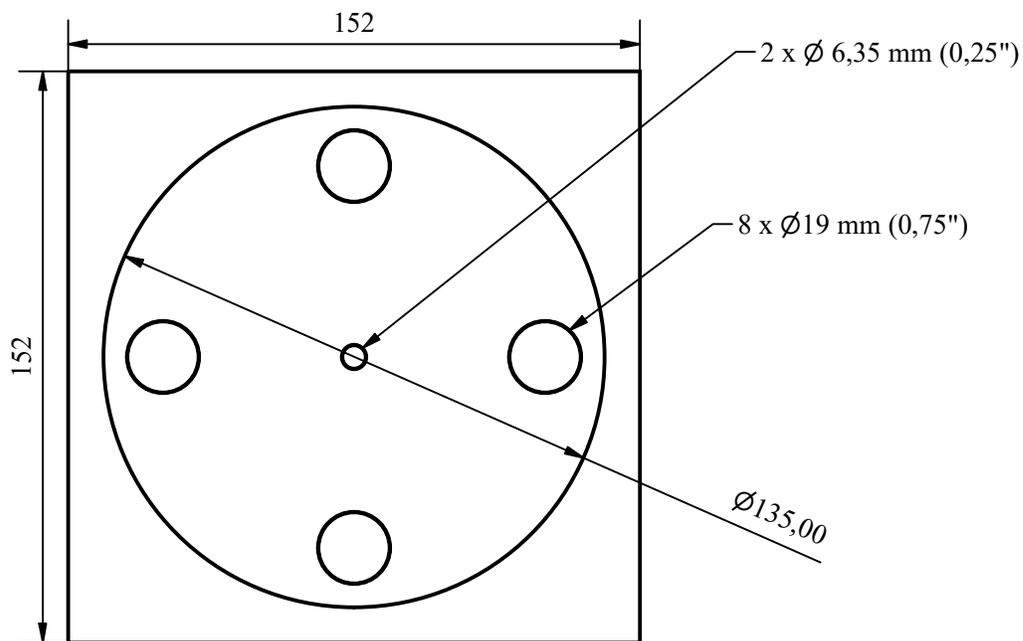


Detalle D (ESC: 1 : 1 )

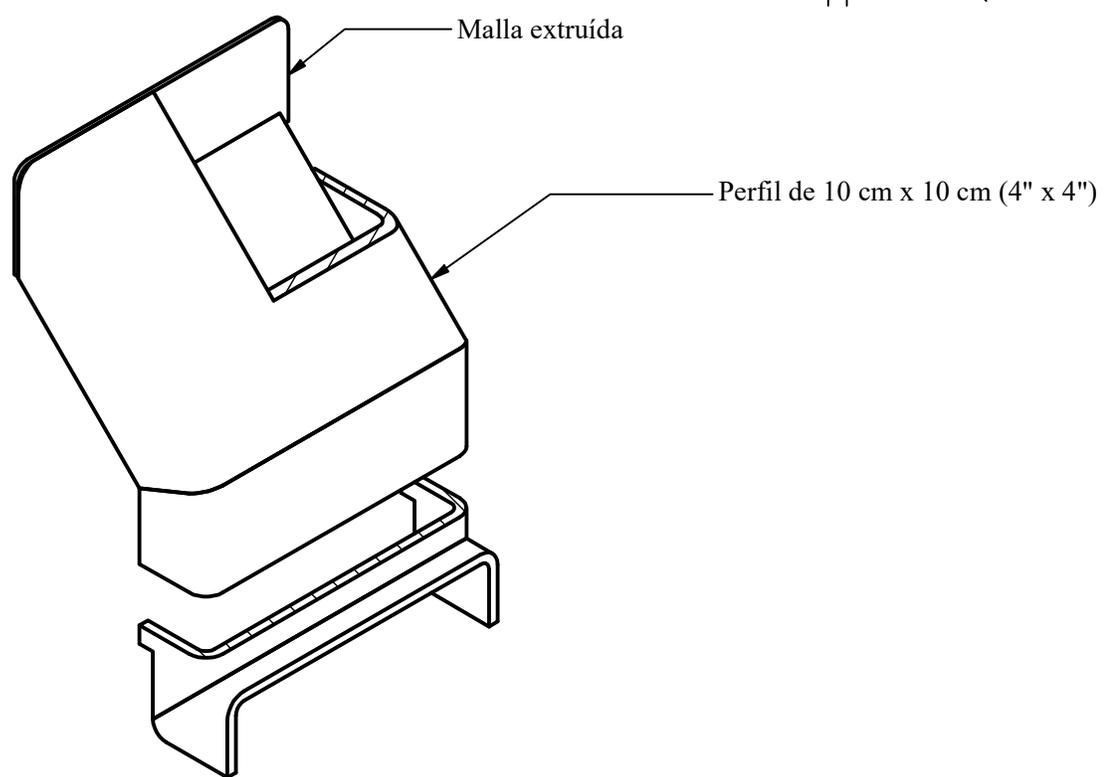
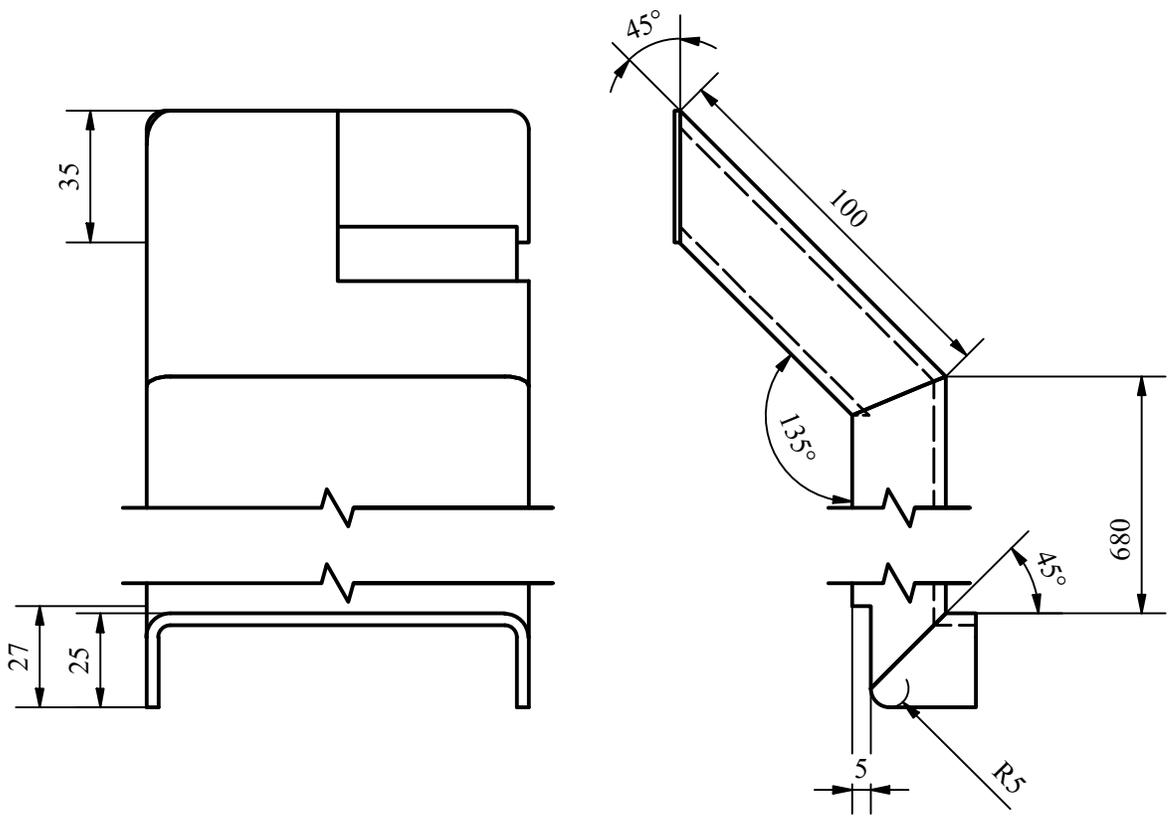


Guía cilíndrica de acero 1020  
ESC: 1 : 1

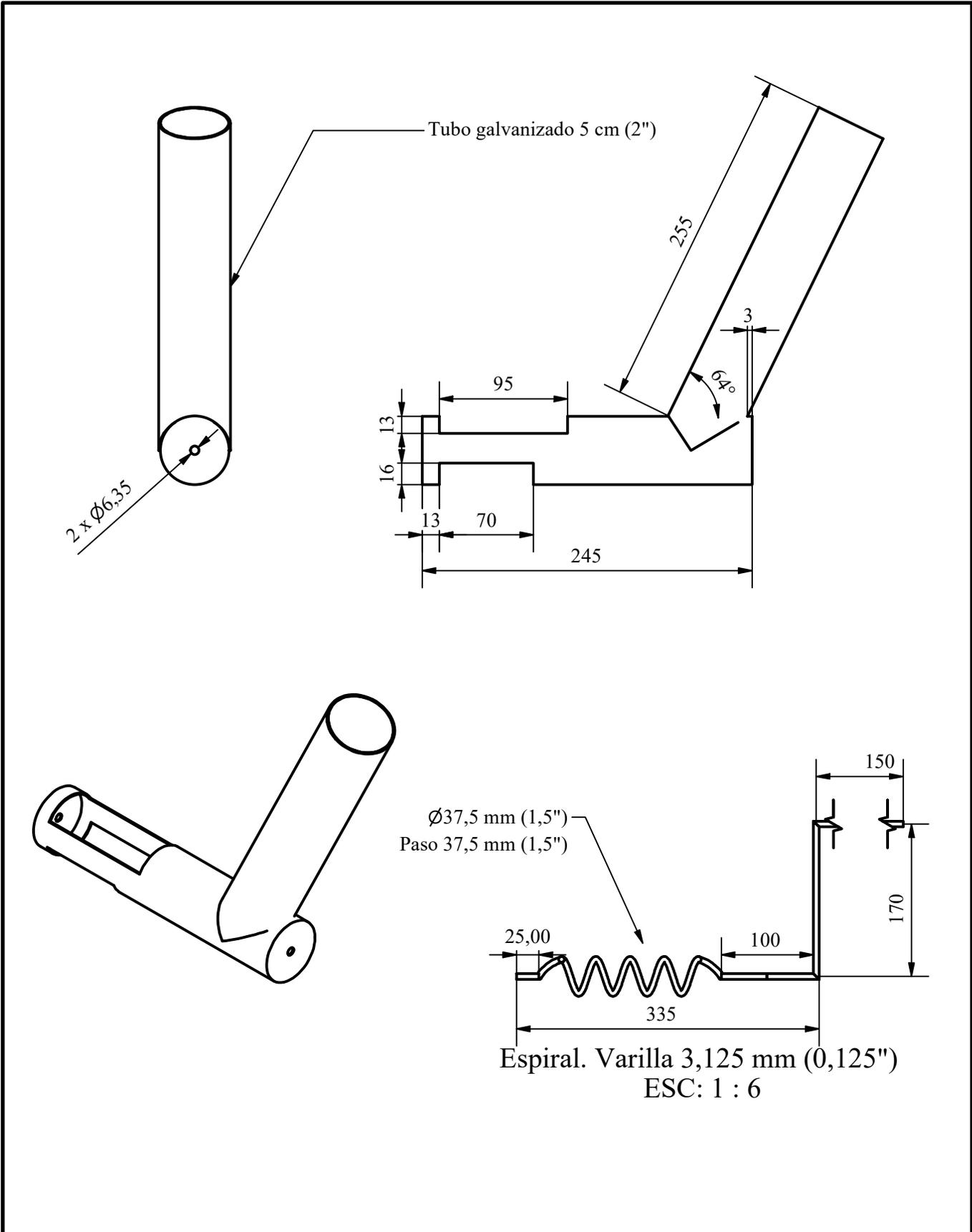
Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Rejilla		Escala del dibujo ESC: 1 : 2		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Varios		Anexo 3	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp
				Lámina 3/11		



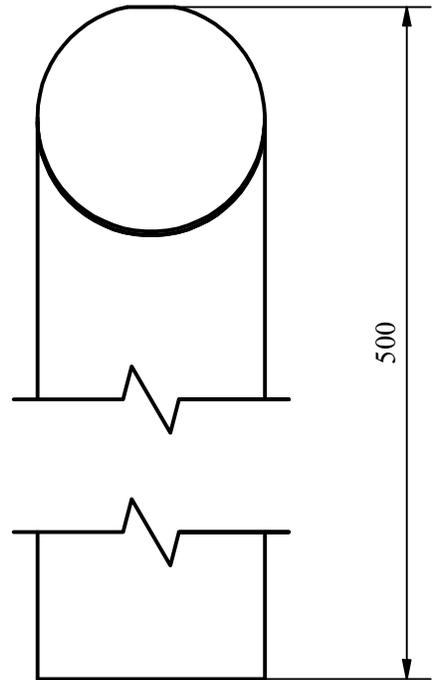
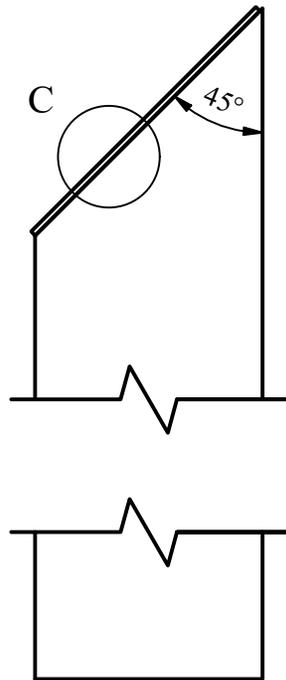
Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Admisión principal de aire		Escala del dibujo ESC: 1 : 2		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Lámina de 3,2 mm (0,125")	Anexo 4	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 4/11



Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros			
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Toma de aire secundario		Escala del dibujo ESC: 1 : 2			
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Varios	Anexo 5	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 5/11	



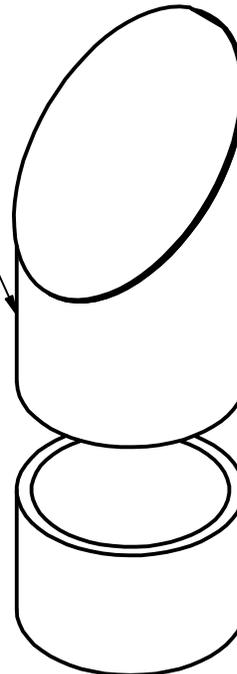
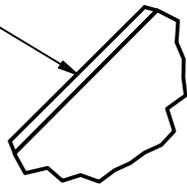
Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación	Cotas del dibujo Milímetros			
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Alimentador de biomasa	Escala del dibujo ESC: 1 : 4			
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Varios	Anexo 6	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 6/11



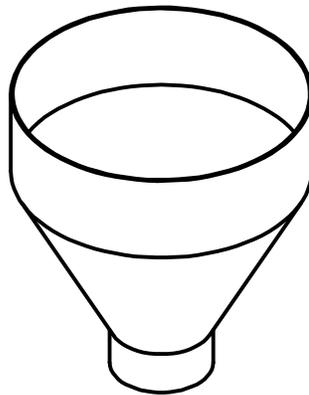
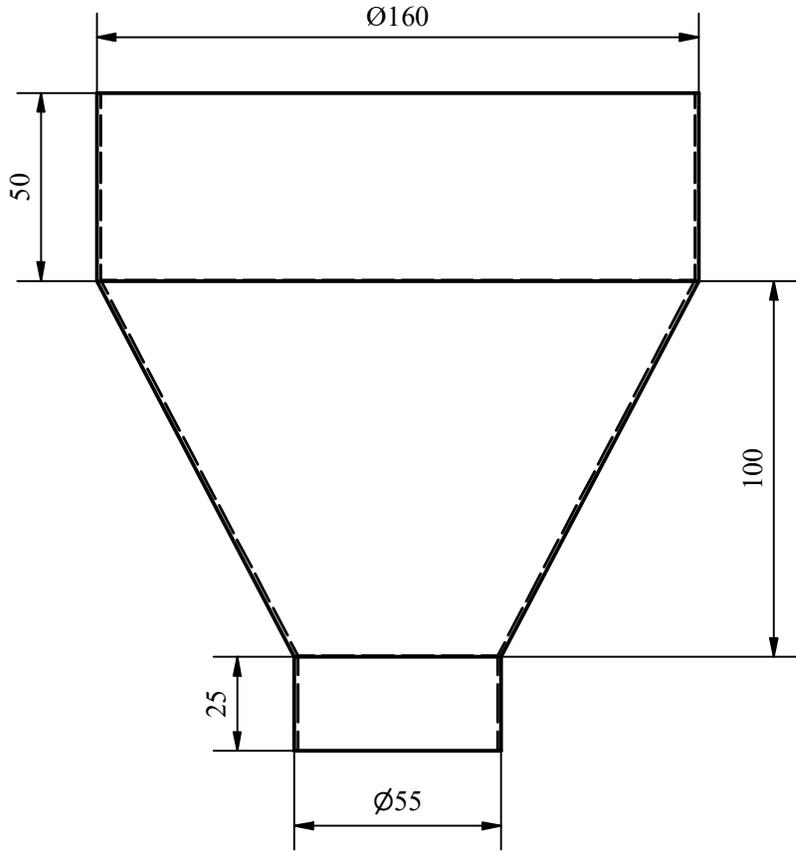
Tubo galvanizado 44 mm (1,75")

Detalle C (ESC 1 : 1)

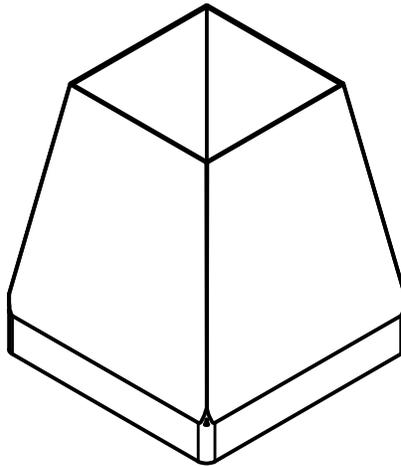
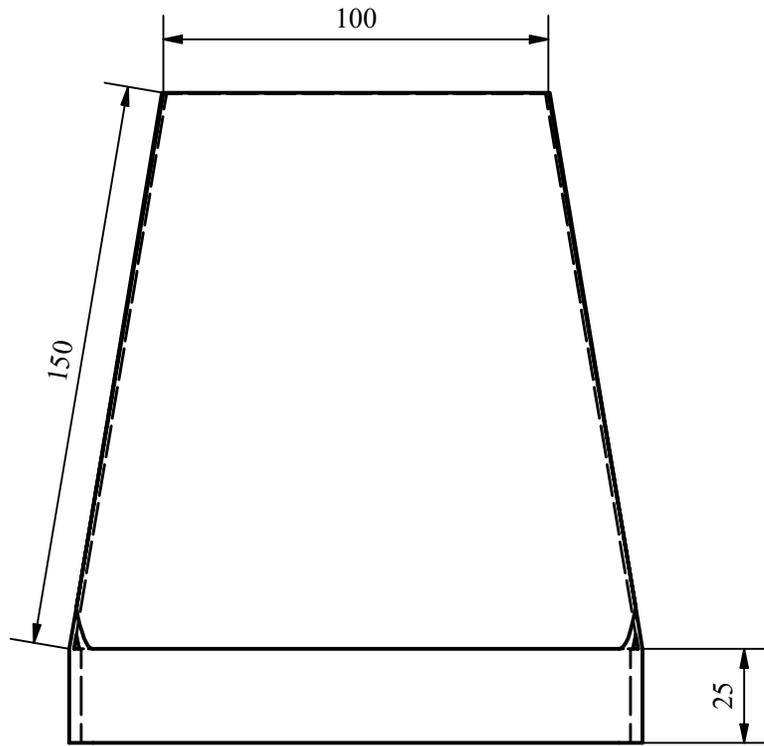
Lámina extruída



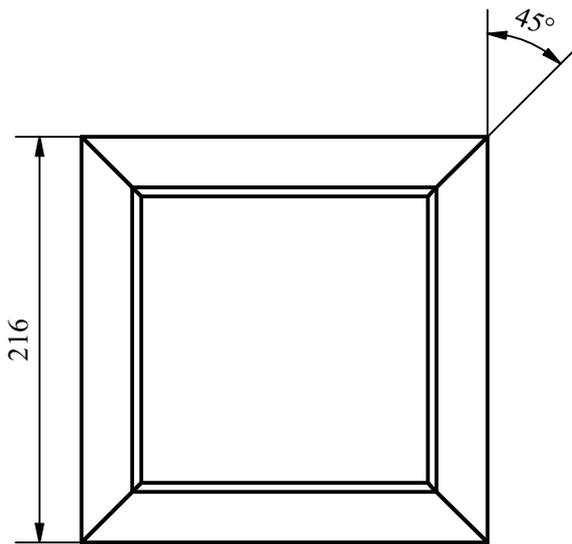
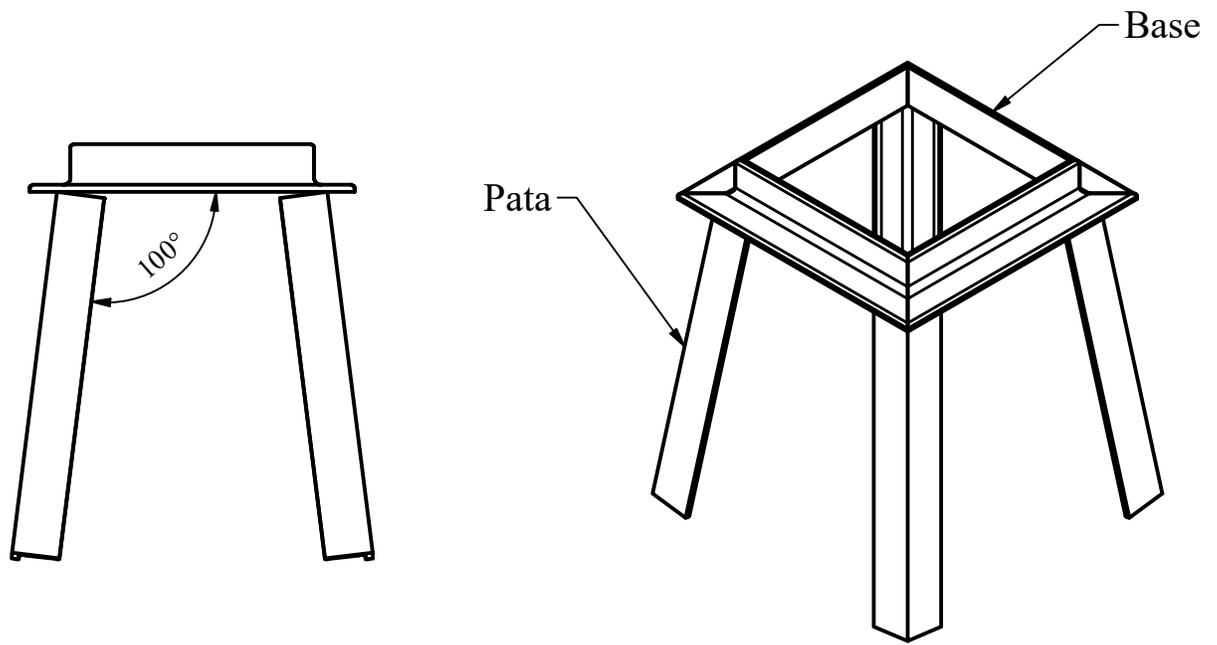
Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Tubo perforado		Escala del dibujo ESC: 1 : 2		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Varios	Anexo 7	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 7/11



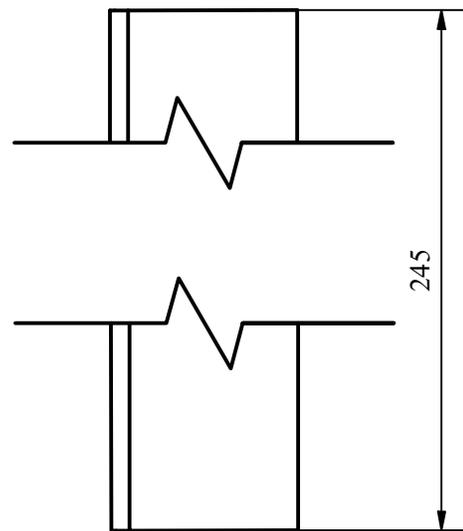
Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Tolva para biomasa		Escala del dibujo ESC: 1 : 2		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Lámina galvanizada lisa	Anexo 8	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 8/11



Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Cono quemador		Escala del dibujo ESC: 1 : 2		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Perfil de 15 cm x 15 cm (6" x 6")	Anexo 9	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 9/11

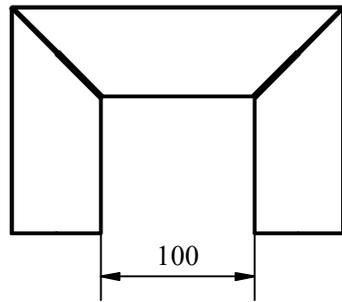
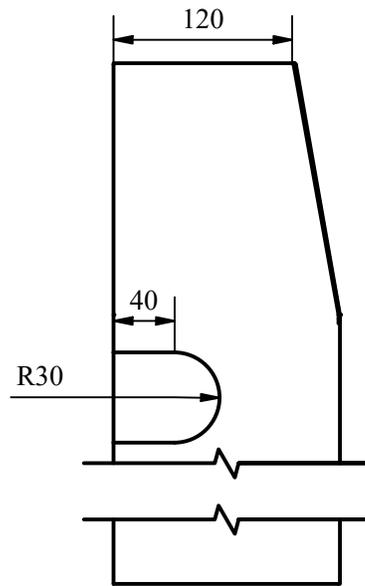
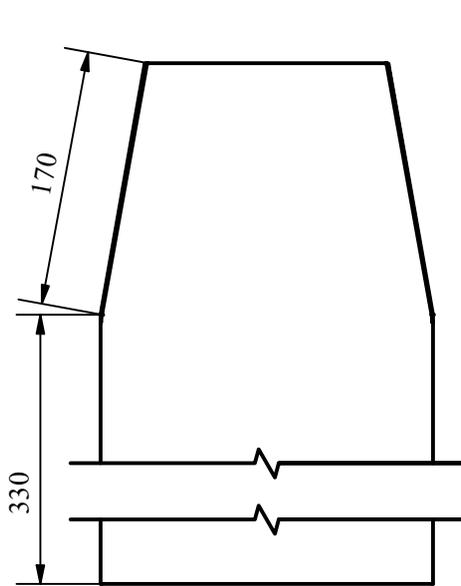


Base  
ESC: 1 : 4

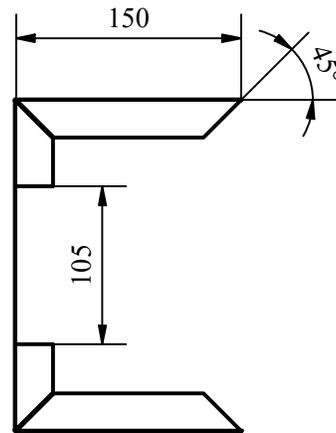
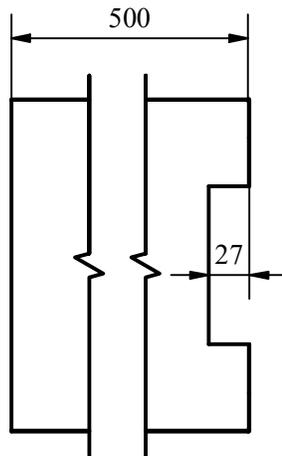


Pata  
ESC: 1 : 1

Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Base		Escala del dibujo ESC: 1 : 5		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Platina 37,5 mm x 37,5 mm	Anexo 10	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 10/11



Cobertor superior  
ESC: 1 : 5



Cobertor inferior  
ESC: 1 : 5

Departamento responsable Ing. Biosistemas	Dibujado por Dennis Elizondo M.	Tipo de documento Proyecto Final de Graduación		Cotas del dibujo Milímetros		
UCR FING EIB	Carné universitario B52494	Nombre de parte Cobertor		Escala del dibujo ESC: 1 : 5		
	Aprobado por Pedro Casanova T.	Material Lámina hierro negro 1,5 mm	Anexo 11	Fecha 9/21/2021	Idioma Esp	Lámina 11/11