



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,**  
**ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA GASIFICADORA**  
**PIROLÍTICA DE BOSTA PARA LA ZONA RURAL DEL**  
**DEPARTAMENTO DE PUNO.**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**RONALD JUAN POMA FLORES**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



# RONALD JUAN POMA FLORES

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA GASIFICADORA PIROLÍTICA DE BOSTA PARA LA ZONA RURAL DEL DEPARTAM

 Universidad Nacional del Altiplano

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:416577786

227 Páginas

Fecha de entrega

16 dic 2024, 11:46 a.m. GMT-5

42,531 Palabras

Fecha de descarga

16 dic 2024, 12:20 p.m. GMT-5

225,056 Caracteres

Nombre de archivo

Borrador de Tesis-Cocina Gasificadora - Ronald Poma - rev12.docx

Tamaño de archivo

19.8 MB





## 9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alerta de integridad para revisión

- Texto oculto**  
8 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA  
ING MECANICO ELECTRICISTA  
CIP 78419

M.Sc. Felipe Condori Chambilla  
SUBDIRECTOR DE INVESTIGACIÓN  
EPIME





## DEDICATORIA

*A mis padres, Alberto y Susana, por ser mi guía y mi fortaleza, por inculcarme valores como la responsabilidad y el deseo de superación, y por brindarme su apoyo incondicional en cada paso de este camino. Este logro alcanzado es el reflejo de su amor y dedicación.*

**Ronald Juan Poma Flores**



## AGRADECIMIENTO

*A Dios, por guiar mi camino y permitirme alcanzar este logro.*

*A mis padres, por su amor, sacrificio y por ser la fuerza detrás de mis sueños. Gracias por confiar en mí, creer en mis capacidades y por cada palabra de aliento que iluminó mi trayecto en la carrera y en la vida.*

*A mis hermanos, por todo su apoyo incondicional.*

*A mi tía Elena, por estar siempre ahí para sacarme de apuros cuando más lo necesitaba.*

*A mi asesor de tesis, por su guía, paciencia y valiosas aportaciones durante este proceso.*

*A la universidad, por brindarme la formación académica y las herramientas necesarias para alcanzar este logro.*

**Ronald Juan Poma Flores**



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTO</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN.....</b>	<b>24</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>27</b>
<b>1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>27</b>
1.2.1. Problema general.....	27
1.2.2. Problemas específicos.....	28
<b>1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>28</b>
1.3.1. Hipótesis general.....	28
1.3.2. Hipótesis específicas.....	29
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>29</b>
<b>1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>30</b>
1.5.1. Objetivo general.....	30
1.5.2. Objetivos específicos.....	31



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

<b>2.1.</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>34</b>
2.2.1.	Biomasa.....	34
2.2.1.1.	Formación de biomasa.....	34
2.2.1.2.	Biomasa residual tipo agrícolas.....	35
2.2.2.	Bosta de vaca y alpaca .....	36
2.2.3.	Caracterización de la biomasa.....	36
2.2.3.1.	Análisis elemental y proximal de la biomasa.....	36
2.2.3.2.	Poder calorífico de la biomasa.....	38
2.2.3.3.	Formula molecular empírica de la biomasa	40
2.2.4.	Teoría de la gasificación .....	41
2.2.4.1.	Proceso de gasificación.....	41
2.2.5.	Tipos de gasificadores de biomasa.....	45
2.2.6.	Gasificador tipo top lit updraft (T-LUD).....	48
<b>2.3.</b>	<b>PREDICCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL GAS SÍNTESIS.....</b>	<b>51</b>
2.3.1.	Modelo de equilibrio termodinámico.....	51
2.3.1.1.	Reacción de gasificación global.....	53
2.3.1.2.	Equilibrio químico de gas ideales.....	54
2.3.1.3.	Balance energético del reactor.....	57
2.3.2.	Poder calorífico del gas de síntesis. ....	59
2.3.3.	Índice de gasificación específica.....	59
2.3.4.	Diseño del reactor TLUD.....	60
2.3.4.1.	Partes de la cocina de biomasa tipo TLUD.....	60



2.3.4.2.	Tasa de consumo de biomasa.....	60
2.3.4.3.	Flujo de aire primario.....	61
2.3.4.4.	Perdida de presión en el lecho de biomasa.....	63
2.3.5.	Eficiencia térmica de la cocina gasificadora pirolítica.....	63

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1.</b>	<b>TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>66</b>
3.1.1.	Tipo de investigación.....	66
3.1.2.	Ubicación geográfica del sitio de investigación	66
3.1.2.1.	Condiciones ambientales locales.....	66
3.1.3.	Diseño de la investigación .....	67
3.1.3.1.	Primera etapa.....	67
3.1.3.2.	Segunda etapa.....	68
<b>3.2.</b>	<b>EQUIPOS Y INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....</b>	<b>69</b>
3.2.1.	Fuente de alimentación .....	69
3.2.2.	Lector digital de temperatura .....	70
3.2.3.	Sensor de temperatura .....	71
3.2.4.	Pirómetro termómetro digital infrarrojo .....	72
3.2.5.	Medidor de monóxido de carbono .....	73
3.2.6.	Balanza digital .....	74
3.2.7.	Vernier analógico.....	75
3.2.8.	Tamices .....	76
<b>3.3.</b>	<b>MATERIALES DE BIOMASA UTILIZADA.....</b>	<b>76</b>
3.3.1.	Procedencia de la biomasa utilizada .....	76
3.3.2.	Preparación y tratamiento de la biomasa .....	77



3.3.3.	Caracterización física de la biomasa .....	79
3.3.3.1.	Densidad aparente.....	79
3.3.3.2.	Diámetro medio de la partícula de biomasa.....	80
3.3.3.3.	Esfericidad y porosidad.....	81
3.3.4.	Caracterización química de la biomasa.....	83
3.3.4.1.	Análisis proximal.....	83
3.3.4.2.	Análisis elemental.....	84
3.3.4.3.	Formula molecular empírica de las biomosas.....	85
3.3.4.4.	Poder calorífico superior de las biomosas.....	86
3.3.4.5.	Poder calorífico inferior de las biomosas.....	87
3.3.4.6.	Entalpia de formación de la biomasa.....	88
<b>3.4.</b>	<b>PRIMERA ETAPA: CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>90</b>
3.4.1.	Objetivos en la primera etapa.....	91
3.4.2.	Diseño del prototipo experimental.....	91
3.4.3.	Construcción del prototipo experimental.....	94
3.4.4.	Quemadores de gas de síntesis.....	94
3.4.5.	Pruebas del prototipo experimental.....	97
3.4.5.1.	Determinación del índice de gasificación específica.....	97
3.4.5.2.	Monitoreo de la tensión y corriente del ventilador.....	98
3.4.5.3.	Monitoreo de la temperatura del reactor.....	99
3.4.6.	Evaluación visual de la combustión mediante el color de la llama.....	99
<b>3.5.</b>	<b>SEGUNDA ETAPA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO FINAL.....</b>	<b>102</b>
3.5.1.	Parámetros de diseño del gasificador tipo TLUD.....	102



3.5.2.	Tasa de gasificación o tasa de consumo de biomasa .....	103
3.5.3.	Diámetro del reactor.....	104
3.5.4.	Altura del reactor .....	104
3.5.5.	Masa de aire estequiométrico.....	105
3.5.6.	Flujo volumétrico de aire .....	106
3.5.7.	Caída de presión en el lecho de biomasa .....	107
3.5.8.	Potencia del ventilador.....	109
3.5.9.	Diseño del quemador módelo final.....	110
3.5.10.	Elección de materiales para la construcción de la cocina. ....	110
<b>3.6.</b>	<b>PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA AL PROTOTIPO FINAL.....</b>	<b>112</b>
3.6.1.	Equipos e instrumentos .....	114
3.6.2.	Preparación: .....	114
3.6.3.	Mediciones y cálculos iniciales.....	115
3.6.4.	Procedimiento experimental, variables medidas.....	115
3.6.4.1.	Fase de arranque en frío.....	115
3.6.4.2.	Fase de cocción a fuego lento.....	116
3.6.5.	Variables calculadas.....	117
3.6.6.	Balace de Energía.....	118
3.6.6.1.	Energía transferida al agua.....	118
3.6.6.2.	Energía contenida en la biomasa.....	118
3.6.6.3.	Energía en el carbono residual.....	119
3.6.7.	Eficiencia térmica de la cocina gasificadora.....	119
3.6.8.	Cálculo de potencias energéticas .....	120
<b>3.7.</b>	<b>MEDICIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO AL PROTOTIPO</b>	
	<b>FINAL.....</b>	<b>121</b>



3.7.1. Instrumento utilizado .....	121
3.7.2. Procedimiento de medición.....	122
<b>3.8. PREDICCIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS.....</b>	<b>123</b>
3.8.1. Modelo de equilibrio termodinámico.....	124
3.8.2. Ecuación de reacción global de la gasificación .....	125
3.8.3. Balance de masa en la ecuación de gasificación.....	126
3.8.4. Ecuaciones de equilibrio químico .....	127
3.8.5. Balance energético del volumen de control .....	130
3.8.6. Método de resolución de sistema de ecuaciones.....	132
<b>3.9. PROPIEDADES ENERGÉTICAS DEL GAS DE SÍNTESIS.....</b>	<b>134</b>
3.9.1. Poder calorífico inferior del gas de síntesis .....	134
3.9.2. Masa molar del gas de síntesis.....	136
3.9.3. Densidad del gas .....	136
3.9.4. Capacidad calorífica del gas combustible .....	137
3.9.5. Entalpia específica molar del gas.....	138
<b>3.10. BALANCE DE MASA EN EL REACTOR.....</b>	<b>139</b>
3.10.1. Balance de masa en el volumen de control de la zona de gasificación..	139
3.10.2. Balance de masas en el reactor .....	141
<b>3.11. BALANCE DE ENERGÍA EN EL REACTOR.....</b>	<b>142</b>
3.11.1. Eficiencia energética del reactor .....	143
<b>3.12. BALANCE ENERGÉTICO EN EL QUEMADOR.....</b>	<b>144</b>
3.12.1. Eficiencia térmica del quemador.....	145
<b>3.13. BALANCE ENERGÉTICO DE LA COCINA.....</b>	<b>145</b>
3.13.1. Eficiencia térmica de la cocina gasificadora.....	147



### **3.14. PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA A LA COCINA**

**TRADICIONAL.....148**

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA BIOMASA.....150**

**4.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA.....151**

4.2.1. Formula empírica de las biomosas .....154

4.2.2. Poderes caloríficos .....154

4.2.3. Entalpia de formación de la biomasa .....156

4.2.4. Densidad energética por volumen de biomasa.....156

**4.3. PRIMERA ETAPA - RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL PROTOTIPO**

**EXPERIMENTAL.....157**

4.3.1. Utilizando bosta de alpaca como combustible .....158

4.3.1.1. Índice de gasificación específica .....158

4.3.1.2. Control de tensión y flujo de aire en el ventilador.....158

4.3.1.3. Perfil de temperatura en el reactor de biomasa.....160

4.3.2. Utilizando bosta de vaca como combustible.....161

4.3.2.1. Índice de gasificación específica .....161

4.3.2.2. Control de tensión y flujo de aire en el ventilador.....162

4.3.2.3. Perfil de temperatura en el reactor de biomasa.....164

4.3.3. Resumen de los parámetros obtenidos de primera etapa de las pruebas del modelo experimental.....164

4.3.4. Evaluación de los quemadores propuestos.....168

4.3.5. Evaluación del desgaste por altas temperaturas en un reactor TLUD

fabricado en acero ASTM A1008 .....172



<b>4.4.</b>	<b>SEGUNDA ETAPA: RESULTADOS DEL PROTOTIPO FINAL.....</b>	<b>175</b>
4.4.1.	Dimensionamiento del modelo final .....	175
4.4.2.	Prototipo final de la cocina gasificadora pirolítica .....	177
4.4.3.	Prueba de ebullición de agua .....	179
4.4.3.1.	Variables calculadas de la prueba de ebullición de agua.....	183
4.4.4.	Evaluación visual de la combustión del gas de síntesis del modelo final.....	184
4.4.5.	Monitoreo de los niveles de monóxido de carbono .....	185
4.4.6.	Composición del gas de síntesis .....	187
<b>4.5.</b>	<b>BALANCE DE MASA EN EL REACTOR.....</b>	<b>189</b>
<b>4.6.</b>	<b>BALANCE ENERGÉTICO EN EL REACTOR.....</b>	<b>191</b>
4.6.1.	Eficiencia del reactor .....	192
<b>4.7.</b>	<b>BALANCE ENERGÉTICO EN EL QUEMADOR.....</b>	<b>192</b>
4.7.1.	Eficiencia térmica del quemador.....	194
<b>4.8.</b>	<b>BALANCE ENERGÉTICO EN LA COCINA GASIFICADORA.....</b>	<b>194</b>
4.8.1.	Eficiencia térmica de la cocina de gasificadora .....	195
<b>4.9.</b>	<b>EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA COCINA TRADICIONAL .....</b>	<b>196</b>
4.9.1.	Resultados de la prueba de ebullición de agua de la cocina tradicional.....	196
<b>4.10.</b>	<b>ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA COCINA GASIFICADORA TLUD Y LA COCINA TRADICIONAL.....</b>	<b>199</b>
4.10.1.	Comparación de la eficiencia térmica .....	199
4.10.2.	Comparación del consumo de combustible .....	200



4.10.3. Comparación de tiempo de ebullición .....	201
4.10.4. Comparación de Emisión de CO.....	202
<b>4.11. VENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE LA COCINA</b>	
<b>GASIFICADORA.....</b>	<b>203</b>
4.11.1. Costo de fabricación y beneficio social.....	203
4.11.2. Beneficios ambientales .....	205
<b>4.12. DISCUSIONES.....</b>	<b>206</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>211</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>214</b>
<b>VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>215</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>222</b>

**ÁREA:** Energías Renovables

**TEMA:** Diseño y Construcción de Cocina Gasificadora Pirolítica de Bosta

**FECHA DE SUSTENTACIÓN: 20 DE DICIEMBRE DE 2024**



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Reacciones típicas de gasificación a 25°C en kJ/mol. ....	44
<b>Tabla 2</b> Propiedades del aire a una presión de 65.01kPa y temperaturas de 15°C .	109
<b>Tabla 3</b> Coeficientes del polinomio de capacidades caloríficas de las sustancias. .	129
<b>Tabla 4</b> Entalpia de formación y energía de Gibbs de formación de las sustancias gaseosas.....	130
<b>Tabla 5</b> Poderes Caloríficos Inferior de los Gases Combustibles. ....	135
<b>Tabla 6</b> Masa molar de los componentes de los gases .....	136
<b>Tabla 7</b> Características geométricas de la biomasa bosta de alpaca y bosta de vaca .....	150
<b>Tabla 8</b> Análisis proximal de la bosta de vaca y alpaca en base recibida (base ar)	151
<b>Tabla 9</b> Análisis elemental de las biomosas expresado en base seca (base db) .....	151
<b>Tabla 10</b> Análisis elemental de las biomosas expresado en base seca y libre de cenizas (base daf).....	152
<b>Tabla 11</b> Análisis elemental de la biomasa en base recibida (ar) .....	152
<b>Tabla 12</b> Formula química empírica de la molécula de biomosas .....	154
<b>Tabla 13</b> Poderes caloríficos superior y poder calorífico inferior de las biomosas ..	155
<b>Tabla 14</b> Entalpia de formación de la biomasa .....	156
<b>Tabla 15</b> Densidad energética por volumen de biomasa.....	157
<b>Tabla 16</b> Resultados de pruebas para la bosta de alpaca.....	158
<b>Tabla 17</b> Resultados de pruebas de la bosta de vaca.....	162
<b>Tabla 18</b> Comparación de parámetros importantes en la gasificación de bosta de alpaca y bosta de vaca.....	165
<b>Tabla 19</b> Parámetros como objetivos de la primera etapa .....	166



<b>Tabla 20</b>	Resultados de las variables calculada en el diseño para el modelo final del reactor .....	175
<b>Tabla 21</b>	Resultados de la prueba de ebullición de agua con la bosta de vaca .....	181
<b>Tabla 22</b>	Resultados de la prueba de ebullición de agua con la bosta de alpaca .....	182
<b>Tabla 23</b>	Variables calculadas para la predicción del gas de síntesis. ....	183
<b>Tabla 24</b>	Composición molar y fracción molar del gas de síntesis de las biomosas.	187
<b>Tabla 25</b>	Propiedades energéticas del gas de síntesis .....	188
<b>Tabla 26</b>	Tasa de consumo de reactivos.....	189
<b>Tabla 27</b>	Tasa de formación de productos .....	190
<b>Tabla 28</b>	Índice de carbonización e índice de gasificación de las biomosas.....	191
<b>Tabla 29</b>	Potencias energéticas de los reactivos .....	191
<b>Tabla 30</b>	Potencias energéticas de los productos .....	192
<b>Tabla 31</b>	Eficiencias térmicas del reactor para las biomosas de bosta de vaca y alpaca .....	192
<b>Tabla 32</b>	Potencia que intervienen en el quemador .....	193
<b>Tabla 33</b>	Eficiencia térmica del quemador.....	194
<b>Tabla 34</b>	Potencias energéticas entregada a la cocina de gas de síntesis .....	194
<b>Tabla 35</b>	Potencias energéticas de salidas de la cocina de gas de síntesis.....	195
<b>Tabla 36</b>	Eficiencias térmicas de la cocina de gas de síntesis.....	195
<b>Tabla 37</b>	Resultados de la prueba de ebullición de agua de la cocina tradicional ....	197
<b>Tabla 38</b>	Relación Energía Útil/Biomasa Consumida (kJ/kg) .....	201
<b>Tabla 39</b>	Comparación de tiempo de ebullición (min.).....	202
<b>Tabla 40</b>	Comparación de la concentración de CO (PPM).....	203
<b>Tabla 41</b>	Costo de fabricación de la cocina gasificadora.....	203



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Ciclo de la Biomasa .....	35
<b>Figura 2</b> Análisis final y proximal y diferentes bases de análisis.....	37
<b>Figura 3</b> Secuencia de reacción y rutas potenciales para la gasificación .....	42
<b>Figura 4</b> Esquemas de cuatro gasificadores principales .....	46
<b>Figura 5</b> Etapas de gasificación en un gasificador de corriente ascendente.....	49
<b>Figura 6</b> Etapas de gasificación de gasificador tipo Top Lit Updraft (T-LUD).....	50
<b>Figura 7</b> Esquema de una cocina gasificadora tipo Top Lit Updraft (T-LUD).....	52
<b>Figura 8</b> Partes de la cocina gasificadora pirolítica para diseñar .....	61
<b>Figura 9</b> Lecho fijo de sólidos por el que circula un fluido.....	64
<b>Figura 10</b> Esquema de diseño de la investigación.....	68
<b>Figura 11</b> Fuente de alimentación de tensión variable .....	70
<b>Figura 12</b> Pirómetro digital TC4-S.....	70
<b>Figura 13</b> Termocupla tipo K 1200 °C.....	71
<b>Figura 14</b> Termocupla tipo K 600 °C.....	72
<b>Figura 15</b> Pirómetro termómetro digital infrarrojo .....	73
<b>Figura 16</b> Medidor de Monóxido de Carbono.....	74
<b>Figura 17</b> Balanza digital gramera .....	75
<b>Figura 18</b> Vernier analógico.....	75
<b>Figura 19</b> Tamices para biomasa.....	76
<b>Figura 20</b> Selección de las biomosas utilizadas.....	78
<b>Figura 21</b> Determinación de la densidad aparente de la biomasa .....	80
<b>Figura 22</b> Determinación de Tamaño de partículas de bosta de alpaca y bosta de vaca .....	81



<b>Figura 23</b>	Clasificación de partículas según esfericidad y redondez.....	82
<b>Figura 24</b>	Relación entre esfericidad, porosidad y compactación del lecho empaquetado .....	82
<b>Figura 25</b>	Partes del modelo experimental de la cocina gasificadora.....	92
<b>Figura 26</b>	Ventilador utilizado para el prototipo experimental.....	93
<b>Figura 27</b>	Fotografías del proceso de construcción del modelo experimental .....	93
<b>Figura 28</b>	Diseño de Belonio (2005) para el gas de cascarilla de arroz. ....	94
<b>Figura 29</b>	Diseño Preliminar de Prototipos de Quemadores .....	96
<b>Figura 30</b>	Implementos para la prueba del modelo experimental .....	97
<b>Figura 31</b>	Combustión del gas producido por la gasificación de la cascarilla de arroz .....	100
<b>Figura 32</b>	Tipos de llama en un mechero Bunsen dependiendo del flujo de aire.....	101
<b>Figura 33</b>	Lecho de biomasa en el reactor.....	108
<b>Figura 34</b>	Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición de agua .....	113
<b>Figura 35</b>	Implementos para la prueba de ebullición de agua del modelo experimental .....	113
<b>Figura 36</b>	Esquema del modelo de equilibrio termodinámico.....	123
<b>Figura 37</b>	Flujo de proceso para resolver el sistema de ecuaciones.....	133
<b>Figura 38</b>	Volumen de control de la zona de gasificación .....	139
<b>Figura 39</b>	Volumen de control para el balance de masa y energía en el reactor .....	141
<b>Figura 40</b>	Volumen de control para el balance de energía en el quemador .....	144
<b>Figura 41</b>	Volumen de control para el balance de energía de la cocina gasificadora	147
<b>Figura 42</b>	Cocina tradicional o fogón.....	148
<b>Figura 43</b>	Comparación de análisis proximal de la bosta de vaca y alpaca en base recibida (ar).....	153



<b>Figura 44</b>	Comparación de análisis elemental de la bosta de vaca y alpaca en base recibida (ar).....	153
<b>Figura 45</b>	Variación de tensión suministrada al ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de alpaca .....	159
<b>Figura 46</b>	Variación de la corriente consumida por el ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de alpaca .....	160
<b>Figura 47</b>	Grafica de variación de temperatura en la parte central del reactor en el proceso de gasificación de la bosta de alpaca .....	161
<b>Figura 48</b>	Variación de tensión suministrada al ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de vaca .....	163
<b>Figura 49</b>	Variación de la corriente consumida por el ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de vaca .....	163
<b>Figura 50</b>	Grafica de variación de temperatura en la parte central del reactor en el proceso de gasificación de la bosta de vaca.....	164
<b>Figura 51</b>	Medición de Temperatura en la superficie externa del reactor .....	167
<b>Figura 52</b>	Fotografías de la Evaluación de Quemadores.....	169
<b>Figura 53</b>	Determinación de la altura del soporte de la olla.....	171
<b>Figura 54</b>	Modelo cero de un gasificador TLUD .....	172
<b>Figura 55</b>	Desgaste del reactor del modelo cero durante un año.....	174
<b>Figura 56</b>	Vista isométrica del prototipo final.....	179
<b>Figura 57</b>	Fotografías de la prueba de ebullición de agua.....	180
<b>Figura 58</b>	Aspecto de la llama en los quemadores del gas de síntesis .....	184
<b>Figura 59</b>	Color de la llama de la combustión del gas de síntesis de la bosta de alpaca .....	185



<b>Figura 60</b>	Niveles de monóxido de carbono en PPM, medidos a la cocina gasificadora durante las pruebas de ebullición del agua.....	186
<b>Figura 61</b>	Comparación de la composición del gas de síntesis de las biomásas bosta de vaca y alpaca .....	188
<b>Figura 62</b>	Cocina tradicional utilizando bosta de vaca como combustible .....	197
<b>Figura 63</b>	Cocina tradicional utilizando bosta de alpaca como combustible .....	198
<b>Figura 64</b>	Grafica de los niveles de concentración de CO con la cocina tradicional .	198
<b>Figura 65</b>	Comparación de las eficiencias térmicas .....	200
<b>Figura 66</b>	Biocarbón producto de la gasificación de la biomasa.....	205



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1</b> Informes de laboratorio del análisis proximal de las biomasas. ....	<b>222</b>
<b>ANEXO 2</b> Informes de laboratorio del análisis elemental de las biomasas. ....	<b>223</b>
<b>ANEXO 3</b> Ficha técnica de aislante térmico.....	<b>224</b>
<b>ANEXO 4</b> Planos del prototipo experimental. ....	<b>225</b>
<b>ANEXO 5</b> Planos del prototipo final.....	<b>225</b>
<b>ANEXO 6</b> Memoria de calculo con bosta de vaca.....	<b>225</b>
<b>ANEXO 7</b> Memoria de cálculo con bosta de alpaca.....	<b>225</b>
<b>ANEXO 8</b> Video de la combustión de gas de bosta de alpaca.....	<b>225</b>
<b>ANEXO 9</b> Video de monitoreo de CO a la combustión de gas de alpaca .....	<b>225</b>
<b>ANEXO 10</b> Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	<b>226</b>
<b>ANEXO 11</b> Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional .....	<b>227</b>



## ACRÓNIMOS

C:	Contenido de carbono elemental en base recibidas (%)
H:	Contenido de hidrogeno elemental en base recibidas (%)
O:	Contenido de oxígeno elemental en base recibidas (%)
N:	Contenido de nitrógeno elemental en base recibidas (%)
S:	Contenido de azufre elemental en base recibidas (%)
Ash:	Contenido de cenizas en base recibidas (%)
MC:	Contenido de humedad en base recibidas (%)
FC:	Contenido de carbono fijo en base recibida (%)
VM:	Contenido de material volátil en base recibida (%)
db:	Base seca
ar:	Base recibida
daf:	Base seca y libre de cenizas
bm:	Biomasa
HHV:	Poder Calorífico Superior (Higher Heating Value)
LHV:	Poder Calorífico Inferior (Lower Heating Value)
M:	Masa molar (g/mol)
H:	Entalpia específica (kJ/kg)
TLUD:	Top Lit Updraft (Corriente ascendente iluminada desde arriba)
IGE:	Índice de Gasificación Específica
PPM:	Partes Por Millón
R:	Constante de los Gases Ideales
WBT:	Prueba de Ebullición de Agua (Water Boiling Test)
ER:	Relación de Equivalencia (Equivalence Ratio)
T:	Temperatura
P:	Presión
G:	Energía de Gibbs



S:	Entropía
v:	Coefficiente estequiométrico
Cs:	Carbono elemental residual
Ash, Cs:	Biocarbón o carbón de biomasa



## RESUMEN

La presente investigación, de tipo teórico-experimental, tuvo como objetivo diseñar y construir una cocina gasificadora tipo TLUD utilizando las biomásas de bosta de vaca y alpaca como combustibles, promoviendo una alternativa energética sostenible para comunidades rurales. Se realizaron los análisis químicos y físicos confirmando la viabilidad de ambas biomásas, con poderes caloríficos superiores de 17,874 kJ/kg para la bosta de vaca y 15,299 kJ/kg para la de alpaca en base seca. Se construyó un prototipo experimental para determinar parámetros fundamentales para el diseño final. En el reactor, la bosta de vaca alcanzó un índice de gasificación específica de 116.37 kg/m<sup>2</sup>-h y una temperatura máxima de 543 °C, mientras que la de alpaca registró 91.05 kg/m<sup>2</sup>-h y 577 °C. En la etapa final, se diseñó un reactor de 137 mm de diámetro y 423 mm de altura en material de acero inoxidable, con recubrimiento de fibra cerámica de alta densidad para reducir pérdidas térmicas y un sistema de aire forzado con un ventilador de 12V, asegurando una estabilidad y eficiencia. Las pruebas de eficiencia térmica, basadas en el protocolo de ebullición de agua, mostraron valores del 28% para la bosta de vaca y del 42% para la de alpaca, con ahorros de combustible del 19.4% y 53.8%, respectivamente, frente a la cocina tradicional de tres piedras. Las emisiones de monóxido de carbono fueron seguras (9 ppm) con la bosta de alpaca, mientras que las de vaca excedieron los límites recomendados, resaltando la necesidad de optimizar el diseño. El balance energético indicó una eficiencia energética del reactor del 67% para la bosta de vaca y del 68% para la de alpaca, con potencias generadas de 3.749 kW y 3.021 kW, respectivamente.

**Palabras clave:** Cocina gasificadora TLUD, Bosta de vaca y alpaca, Gasificación de biomasa, Eficiencia térmica, Sostenibilidad energética.



## ABSTRACT

The present research, of a theoretical-experimental nature, aimed to design and build a TLUD-type gasification stove using cow and alpaca dung biomass as fuel, promoting a sustainable energy alternative for rural communities. Chemical and physical analyses were carried out confirming the viability of both biomasses, with higher calorific values of 17,874 kJ/kg for cow dung and 15,299 kJ/kg for alpaca dung on a dry basis. An experimental prototype was built to determine fundamental parameters for the final design. In the reactor, cow dung reached a specific gasification rate of 116.37 kg/m<sup>2</sup>-h and a maximum temperature of 543 °C, while alpaca dung registered 91.05 kg/m<sup>2</sup>-h and 577 °C. In the final stage, a 137 mm diameter and 423 mm high reactor was designed in stainless steel material, with high-density ceramic fiber coating to reduce thermal losses and a forced air system with a 12V fan, ensuring stability and efficiency. Thermal efficiency tests, based on the water boiling protocol, showed values of 28% for cow dung and 42% for alpaca dung, with fuel savings of 19.4% and 53.8%, respectively, compared to the traditional three-stone stove. Carbon monoxide emissions were safe (9 ppm) with alpaca dung, while cow dung exceeded the recommended limits, highlighting the need to optimize the design. The energy balance indicated a reactor energy efficiency of 67% for cow dung and 68% for alpaca dung, with generated powers of 3,749 kW and 3,021 kW, respectively.

**Keywords:** TLUD gasification stove, Cow and alpaca dung, Biomass gasification, Thermal efficiency, Energy sustainability.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

En las zonas rurales del departamento de Puno se ha usado la bosta de vaca y alpaca como una fuente de combustible desde tiempos antiguos, esto por ser zona ganadera. Pero las cocinas tradicionales que emplean la bosta de vaca o alpaca generan bastante humo y partículas en el aire, lo cual afecta la salud y hace que la combustión no sea muy eficiente.

El gas licuado de petróleo (GLP), aunque es popular por ser conveniente y limpio, ha ido subiendo de precio de forma sostenida por el aumento del petróleo a nivel mundial, lo que hace que cada vez sea menos accesible en comunidades rurales. Esta realidad ha motivado a que se busquen otras opciones de combustible, que sean más sostenibles y económicas, como es el caso de la biomasa disponible en la zona.

Las cocinas de gasificación tipo TLUD (Top-Lit UpDraft) es una alternativa de cocina donde se puede usar bosta, ya que permiten quemar la biomasa de manera controlada, produciendo gas de síntesis y biocarbón. Este proceso ayuda a reducir emisiones y mejora la eficiencia de la combustión. Esta investigación se centra en el diseño y la construcción de una cocina TLUD que usa bosta de vaca y de alpaca, evaluando aspectos como su eficiencia térmica, las emisiones y el rendimiento energético.

El trabajo se divide en varias partes: primero se caracteriza la biomasa, se hacen pruebas con un modelo inicial, y después se elabora un diseño final basado en los resultados obtenidos. La idea es ofrecer una solución energética útil para las comunidades rurales y establecer una base que permita futuras mejoras tecnológicas para usar la biomasa como fuente de energía limpia.



## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En las zonas rurales del departamento de Puno, particularmente en las zonas donde el combustible gas GLP tiene un acceso limitado, muchas familias optan por usar combustibles como la bosta de vaca y alpaca para la cocción de sus alimentos, estos combustibles son usados en cocinas tradicionales como fogones que emiten contaminantes como el humo con altos contenidos de materiales particulados, monóxido de carbono, alquitranes y hollín, en algunos casos los fogones son utilizados en espacios cerrados con poca ventilación, lo que expone a las personas a altos niveles de contaminación que pueden afectar la salud, especialmente en mujeres y niños que pasan más tiempo en la cocina (Accinelli et al., 2004).

Aunque en los últimos años se han implementado cocinas mejoradas, estas no son completamente adecuadas para el uso de la bosta, y su eficiencia en la combustión sigue siendo limitado, generando contaminantes como humo que contiene monóxido de carbono, alquitranes y materiales particulados principalmente, debido a una combustión incompleta (SENCICO, 2021). La falta de tecnología a los combustibles disponibles localmente y combinado con el elevado costo del GLP, requiere la necesidad de desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles, que sean accesibles para las familias rurales del Perú, y en particular del departamento de Puno.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

En las zonas rurales del departamento de Puno, no existe una tecnología adecuada que permita aprovechar de manera eficiente y sostenible la bosta seca de vaca y alpaca como fuente combustible para la cocción de alimentos en las familias de bajos recursos.



### 1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo diseñar una cocina gasificadora pirolítica que sea capaz de utilizar eficientemente la bosta como fuente de energía en las condiciones climáticas del departamento de Puno?
- ¿Qué métodos de construcción y materiales son más adecuados para garantizar la durabilidad y eficiencia de la cocina gasificadora en un entorno rural con recursos limitados?
- ¿Cuáles son las diferencias en el comportamiento de la bosta de vaca y alpaca en términos de eficiencia energética y emisiones, y cómo aprovechar estas características para optimizar la tecnología?
- ¿Cómo minimizar las emisiones de gases contaminantes en la combustión del gas de síntesis de la bosta dentro de la cocina?

## 1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.3.1. Hipótesis general

La implementación de una cocina gasificadora que utiliza bosta como combustible reducirá las emisiones de gases contaminantes en los hogares, mejorando la eficiencia de la combustión y disminuyendo el consumo de biomasa. Esto, a su vez, contribuirá a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, posicionando esta tecnología como una alternativa viable y sostenible a las cocinas convencionales de GLP para la población de bajos recursos en el departamento de Puno.



### 1.3.2. Hipótesis específicas

- El uso de la cocina gasificadora permitirá una mayor eficiencia en la combustión, lo que resultará en un menor consumo de combustible en comparación con las cocinas tradicionales.
- La adopción de la cocina gasificadora disminuirá las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.
- La cocina gasificadora de bosta reducirá la exposición a los gases contaminantes como CO y alquitranes mejorando las condiciones de salud en los hogares en las zonas rurales.
- La cocina gasificadora será más económica en términos de costos operativos para las familias de bajos recursos en comparación con el uso de GLP.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Según el último censo del INEI el 21.2% de los hogares del país cocinan con combustibles de biomasa de los cuales el 70.1% usan combustibles de biomasa para cocinar los alimentos en los hogares del ámbito rural. Y en el departamento de Puno el 41.7% de los hogares usan estos combustibles para cocinar diariamente sus alimentos. Esta biomasa comprende como leña, bostas y restos de vegetales quemadas en cocinas tradicionales.

Actualmente en el ámbito rural la población del altiplano de Puno, de pobre y extrema pobreza utiliza el estiércol de vacunos, ovinos, camélidos sudamericanos y restos de vegetales como principal fuente de combustible para cocinar los alimentos diariamente. Debido a la quema de estos combustibles sólidos en cocinas tradicionales como los fogones abiertos dentro de ambientes cerrados y con poca ventilación para



obtener energía calorífica, las personas están expuestos constantemente a los gases contaminantes dentro de su domicilio aumentando el riesgo de sufrir problemas de salud, principalmente los de tipo respiratorio los que tendrían mayor incidencia en las mujeres y niños pequeños al estar en contacto permanente con las cocinas durante la preparación de los alimentos (INEI, 2019).

Por otro lado, las cocinas mejoradas que fueron desarrolladas en los últimos años e instaladas por las diferentes organizaciones privadas y estatales, suelen funcionar únicamente con leña y además estas cocinas no cuentan con una buena cámara de combustión por lo que generan mucho humo especialmente en tiempos lluviosas y cuando existen la presencia de vientos huracanados. También no son muy adecuados para alimentarse con combustible tradicionalmente usados en el ámbito rural del altiplano peruano (estiércol de vacunos, ovinos, camélidos entre otros). Además, las cocinas tradicionales emiten mayor cantidad de gases contaminantes y partículas finas que pueden dañar la salud, aumentando los riesgos de enfermedades respiratorias, lo que contribuye a la alta tasa de mortalidad infantil del ámbito rural del Perú.

A esto se suma el crecimiento demográfico y junto a ello se suma el aumento del costo de vida, actualmente el gas GLP en nuestro país tiene un precio elevado y no es muy accesible para las familias pobre.

Razón por la cual en este proyecto de investigación de diseño y construcción de una cocina gasificadora brindará una solución para superar estos problemas.

## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo general**



Diseñar y construir una cocina que utilice el gas de síntesis generado a partir de la biomasa de bosta de vaca y alpaca como fuente de combustible.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades de la biomasa a través de análisis químicos y físicos, y evaluar su viabilidad como fuente de combustible.
- Desarrollar y evaluar un prototipo experimental, para determinar los parámetros como el índice de gasificación específica y la temperatura máxima en la zona de gasificación.
- Diseñar el prototipo final basándose en los resultados experimentales y en las propiedades energéticas de la biomasa.
- Evaluar la eficiencia térmica mediante pruebas de ebullición de agua y realizar una comparación con la cocina tradicional de tres piedras, destacando las diferencias en rendimiento y viabilidad energética.
- Monitorear las emisiones de monóxido de carbono de la cocina gasificadora.
- Realizar el balance energético de la cocina gasificadora, analizar el rendimiento global del sistema y la eficiencia del reactor.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

Scharler et al. (2021) realizó un estudio sobre una cocina gasificadora tipo TLUD con ventilación forzada, utilizando modelos experimentales y simulaciones CFD. Su investigación se centró en la reducción de emisiones de productos no quemados como monóxido de carbono, compuesto orgánicos volátiles y hollín. Los experimentos mostraron emisiones de CO  $<0.2$  g/MJ al utilizar pellets de madera y cascarilla de arroz, estos valores son entre 5 y 10 veces más bajos que los obtenidos en las mejores tecnologías de cocinas disponibles según pruebas estándar de ebullición de agua.

Espinoza Quispe (2021), desarrolló una tesis de una cocina gasificadora de leña que opera bajo el principio de pirólisis para reducir la emisión de los gases contaminantes producto de la combustión. Éste estudio se realizó empleando un diseño experimental factorial y una prueba T-student con los que se determinó el modelo de cocina gasificadora de tiro ascendente que comprende de una hornilla, cámara de mezcla aire-gases, cámara de combustión y canales de ingreso de aire primario y aire secundario. en esta investigación se logró solucionar el problema de las emisiones contaminantes, se logró reducir las emisiones contaminantes producto de la combustión en un 80% en el interior del hogar.

Osei et al. (2020) desarrollaron y evaluaron una estufa gasificadora de tiro invertido que utiliza cáscara de arroz como combustible de biomasa. En el estudio se encontró que la estufa alcanzaba una eficiencia térmica que variaba entre 30.5% y 38.1%, con emisiones de CO y material particulado más bajas que las estufas tradicionales.



Gonzales Arnao (2018) desarrollo un trabajo de investigación sobre una estufa que utiliza tecnología de micro gasificación por pirólisis, utilizó leña de eucalipto como fuente principal de combustible. Para determinar el desempeño de la estufa empleó el protocolo Water Boiling Test (WBT) modificado para estufas tipo T-LUD. De los resultados concluyó que la estufa construida consume menor cantidad de leña de eucalipto en promedio 0.777 kg, llega al punto de ebullición del agua en menor tiempo 13.30min y produce mayor cantidad de bio-carbón (0.210 kg) respecto a otros modelos estudiados. Lo que respecta a los indicadores presentados se destaca que presenta un mayor indicador de potencia en comparación a los demás modelos analizados (17.67 kW) y presenta indicadores de potencia y rendimiento de 17.67 kW y 0.870 °C/litro\*kW respectivamente. Se realizó una encuesta en cuanto a la aceptabilidad de los cuales el 90% de las familias encuestadas están dispuesto adoptar la estufa con esta tecnología.

Suasnabar Dávila (2014) presento un trabajo de tesis el cual consistió en el diseño de una caldera de calefacción, para uso doméstico en los hogares de las zonas alto andinas del Perú, utilizo bosta como fuente de combustible para alimentar la caldera de tipo pirotubular vertical, obteniendo un suministro energético promedio de 11.2 kW para calentar agua desde los 5°C hasta los 80°C, obtenido por la combustión de bosta a una razón de 4 kg/h en la cámara de combustión.

Alvarez Pablo (2009) desarrollo un estudio teórico y experimental sobre cocinas mejoradas que utilizan leña y bosta de vaca como combustible, construyo y evaluó cinco prototipos de cocinas mejoradas de adobe; estos prototipos se evaluaron mediante el Test Estándar de Ebullición de Agua WBT. El modelo final alcanzo una eficiencia térmica del 30% con una potencia promedio de 2.93 kW, y un ahorro de combustible del 42% frente a las cocinas tradicionales de tres piedras, además logro reducir las emisiones de monóxido de carbono a un promedio de 3.9 ppm.



Belonio (2005) desarrollo un manual de construcción y uso de estufas gasificadoras que utilizan cascarilla de arroz como combustible, el funcionamiento de la estufa está basado en los estudios y experiencias realizadas en Filipinas, este manual describe brevemente el gasificador tipo T-LUD que utiliza cascarilla de arroz como combustible, demostró ser una buena tecnología alternativa a las estufas de GLP convencionales.

## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

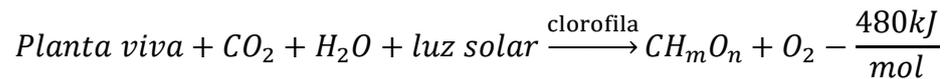
### **2.2.1. Biomasa**

Biomasa significa material orgánico no fósil que proviene de plantas, animales y microorganismos. Esta incluye residuos agrícolas, forestales, excrementos de animales, desechos orgánicos, residuos industriales y municipales biodegradables, entre otros. La biomasa es considerada una fuente de energía renovable, dado que su utilización en procesos como la combustión, gasificación o fermentación libera energía sin incrementar las concentraciones neta de dióxido de carbono en la atmósfera, siempre y cuando se gestione de manera sostenible (UNFCCC, 2005).

#### **2.2.1.1. Formación de biomasa**

Las plantas utilizan la energía lumínica proveniente del sol para realizar la fotosíntesis a partir de elementos sin valor energético como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) del suelo, transformándolos en hidratos de carbono polímeros orgánicos de cadena larga, principalmente azúcares como la celulosa, compuestos por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) materiales orgánicos con alto valor energético.

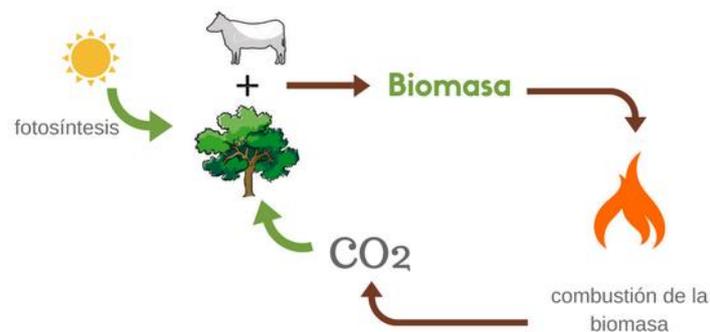
Basu (2013) describe que las plantas verdes bajo la influencia de la luz solar descomponen el agua para obtener electrones y protones, que luego utilizan para convertir el  $CO_2$  en glucosa ( $CH_mO_n$ ) liberando oxígeno como subproducto. El proceso se puede representar mediante la siguiente ecuación química.



Por otro lado, la quema de la biomasa como se aprecia en la Figura 1, se puede comprender como lo opuesto a la fotosíntesis en el sentido de que el oxígeno del aire y la porción orgánica de la biomasa reaccionan para convertir la energía química almacenada en la biomasa en energía térmica.

**Figura 1**

*Ciclo de la Biomasa*



Nota: tomado de <https://www.dexma.com/>

### 2.2.1.2. Biomasa residual tipo agrícolas

Las biomásas residuales también llamado biomásas secundarias por que derivan de la biomasa primaria. Este tipo de biomasa comprende los residuos producidos durante las actividades agrícolas y ganaderas,



como el estiércol y los residuos de cultivos. Es un tipo de biomasa en el que se centra el presente estudio. Estos materiales, que de otro modo se considerarían desechos, tiene un alto potencial energético del cual se pueden producir biogás, gasificación o alimentar directamente una cámara de combustión.

### **2.2.2. Bosta de vaca y alpaca**

Es un tipo de biomasa residual conocido como estiércol seco que es un excremento de ganado secado al medio ambiente, este tipo de biomasa es rica en materia orgánica desde el punto de vista energético contiene principalmente carbono, nitrógeno, hidrogeno, oxígeno, azufre y cenizas, esta biomasa tiene un alto potencial energético. Al ser un sub producto de la ganadería, su aprovechamiento contribuye a la generación de energías renovables en zonas rurales, estas biomasas abundan en las zonas rurales del departamento de Puno.

### **2.2.3. Caracterización de la biomasa**

La caracterización de la biomasa es el proceso de analizar y descripción de las propiedades físicas, químicas y energéticas del material orgánico (como leña, bosta o residuos agrícolas) que se usará como combustible.

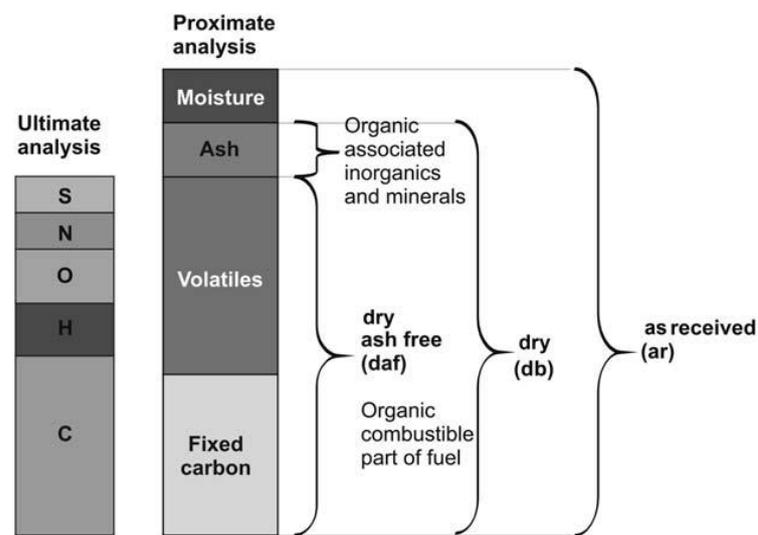
#### **2.2.3.1. Análisis elemental y proximal de la biomasa**

Es el proceso de análisis y evaluación de las propiedades físicas y químicas. Comprende la identificación de la composición de la biomasa en términos de sus elementos orgánicos (C, H, O, N y S) que lo componen conocido como *análisis elemental* y análisis termogravimétricos conocido como *análisis proximal*, permite determinar el contenido en porcentajes de

la humedad, materiales volátiles, cenizas y carbono fijo. En la Figura 2 se puede apreciar la representación esquemática de la composición de la biomasa, donde la columna *ultimate analysis* (en inglés) representa el análisis elemental y la columna *proximate analysis* (en inglés) representa el análisis proximal.

**Figura 2**

*Análisis final y proximal y diferentes bases de análisis*



Nota: tomado de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/proximate-analysis>

Es importante conocer las bases de referencia sobre la cual se están expresando la composición de la biomasa, es decir en referencia a que masa se está calculando los porcentajes de la composición de la biomasa. En la Figura 2 se puede apreciar a la izquierda (en llaves) las bases de referencias. Para la presente investigación se definen los siguientes bases de referencias y sus abreviaturas:

- Base recibida (“as received” en inglés): abreviada con “ar”, se refiere a la masa de la biomasa en su forma natural sin

alteraciones. Se puede expresar en forma matemática con las ecuaciones ( 1 ) y ( 2 ) (Basu, 2013).

**Análisis elemental en base ar:**

$$C + H + O + N + S + Ash + MC = 100\% \quad (1)$$

Donde C, H, O, N, S, Ash y MC son los porcentajes en masa de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, cenizas y contenido de humedad respectivamente en base ar.

**Análisis proximal en base ar:**

$$FC + VM + Ash + MC = 100\% \quad (2)$$

Donde MC, VM, Ash y FC son los porcentajes en masa de la humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo, respectivamente.

- Base seca (“dry base” en inglés): abreviada con “db” se refiere a la masa libre de humedad, es decir a la masa de biomasa en base recibida (ar) se le ha eliminado la humedad.
- Base seca y libre de cenizas (“dry and ash-free base” en inglés): abreviada con “daf”, se refiere a la masa de la biomasa considerando únicamente su contenido orgánico, excluyendo completamente la humedad y las cenizas presentes.

**2.2.3.2. Poder calorífico de la biomasa**

El poder calorífico, representa la cantidad de energía en forma de calor, que es liberado cuando una unidad de masa del combustible es quemada completamente. Se mide en dos formas:

### **Poder calorífico superior HHV** (Higher Heating Value en inglés):

Se define como la cantidad de calor liberado por unidad de biomasa cuando el combustible ingresa a la cámara de combustión a la temperatura del ambiente 25°C y luego de ser quemado los productos de combustión sale a la misma temperatura que ingresó el combustible (25°C), en este estado el agua que forma parte de los productos se encuentra en fase líquida. En el presente estudio se calcula a partir de la composición de la biomasa en base seca (*db*) mediante la correlación empírica de la ecuación ( 3 ) desarrollada por Channiwala y Parikh (2002) utilizado para predecir el poder calorífico superior de los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

$$HHV_{bm,db} = 3.49.1C + 1178.3H + 100.5S - 103.4O - 15.1N - 21.1Ash \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (3)$$

Donde *C*, *H*, *O*, *N*, *S* y *Ash* son porcentajes del contenido en masa del carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y cenizas según lo determinado por análisis elemental en base seca (*db*).

### **Poder calorífico inferior LHV** (Lower Heating Value en inglés):

se define similar al poder calorífico superior con la diferencia de que el vapor que forma parte de los productos de la combustión se libera en fase gaseosa (vapor), y se determina con la siguiente ecuación:

$$LHV_{bm,ar} = HHV_{bm,ar} - h_{fg} \left( \frac{9H}{100} + \frac{MC}{100} \right) \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (4)$$

Donde  $HHV_{bm,ar}$  es el poder calorífico superior calculado con la ecuación ( 3 ); *H* y *MC* son los porcentajes de hidrógeno y porcentaje de humedad, respectivamente en base “ar” y  $h_{fg}$  es la entalpía de

vaporización cuando la temperatura de referencia es de  $100^{\circ}\text{C}$  ( $h_{fg} = 2260\text{kJ/kg}$ ) (Basu, 2013).

### 2.2.3.3. Formula molecular empírica de la biomasa

Es una representación simplificada de la composición de biomasa, expresada mediante una formula empírica de la forma  $CH_rO_xN_yS_z$ , esta fórmula se obtiene a partir del análisis elemental de la biomasa en base seca y libre de cenizas (base *daf*), esta representación permite simplificar los cálculos de los procesos termoquímicos. Donde  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$  y  $S$  representan los átomos de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre respectivamente, y  $r$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . representan los moles de átomos respecto a un mol de átomos de carbono y se determina mediante las siguientes expresiones (Ibrahim et al., 2022; Silva et al., 2019).

$$r = \frac{H \times M_C}{C \times M_H}, \quad x = \frac{O \times M_C}{C \times M_O}, \quad y = \frac{N \times M_C}{C \times M_N}, \quad z = \frac{S \times M_C}{C \times M_S} \quad (5)$$

Donde:  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$  y  $S$  son porcentajes en masa de carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno contenidos en la biomasa según lo determinado por análisis elemental en base seca libre de cenizas (*daf*);  $M_C$ ,  $M_H$ ,  $M_O$ ,  $M_N$  y  $M_S$  son las masas molares de los átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre respectivamente.

La masa molar de la biomasa se determina con la siguiente relación:

$$M_{bm} = \frac{M_C}{C} \quad (6)$$

Donde  $M_{bm}$  es la masa molar de la molécula empírica de la biomasa (g/mol),  $M_C$  es la masa molar del carbono (g/mol) y  $C$  es el porcentaje de contenido en masa del carbono en la biomasa en base *daf*.

#### 2.2.4. Teoría de la gasificación

La gasificación de la biomasa es un proceso termoquímico que convierte la materia prima biomasa sólida en gases combustibles útiles llamado comúnmente *gas de síntesis* compuesto principalmente de monóxido de carbono (CO), hidrogeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La gasificación se lleva a cabo a temperaturas controladas en un ambiente deficiente de oxígeno o aire, evitando la combustión completa. este apartado se centra en las reacciones químicas que ocurren en la gasificación.

Para llevar a cabo la gasificación se requiere de un *medio gasificante* que reacciona con el carbono sólido de la biomasa para convertirlos en gases de bajo peso molecular, los principales agentes gasificantes u oxidantes son oxígeno, vapor de agua y aire.

El medio gasificante que se utiliza en la presente investigación es el aire, el aire este compuesto por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, también se puede expresar mediante la siguiente expresión (7) (Cengel & Boles, 2015):

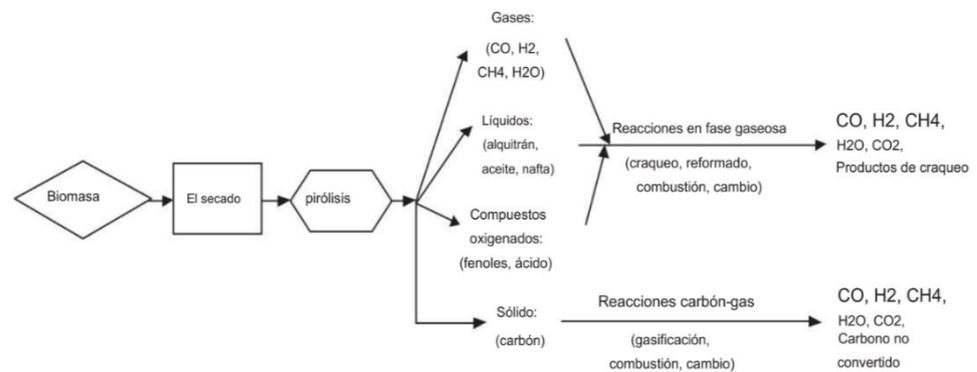


##### 2.2.4.1. Proceso de gasificación

Un proceso típico de gasificación generalmente sigue una serie de pasos, que se describen y se representan esquemáticamente en la Figura 3.

**Figura 3**

*Secuencia de reacción y rutas potenciales para la gasificación*



Nota: Diagrama de proceso de gasificación de la biomasa y las reacciones subsiguientes. Tomado de Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction, por Basu, P., 2013, Academic Press. © 2013 Elsevier.

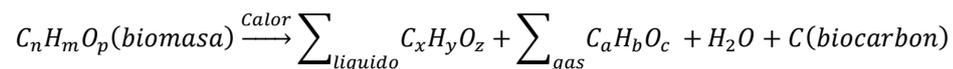
- **Secado**

El primer paso en el proceso de la gasificación es el secado de la humedad interna de la biomasa, generalmente la biomasa contiene humedad interna y superficial, la humedad superficial se elimina en el secado al medio ambiente, luego del secado al medio ambiente la biomasa aun contiene humedad interna de alrededor al 10-30% y esta humedad es secado en la cámara de gasificación por encima de 100°C, el proceso de secado ocurre aproximadamente entre 100°C y 200°C antes de pasar a la etapa de pirólisis. El contenido de humedad de la biomasa es una de las características principales que afectan la composición del gas combustible, a mayor contenido de humedad el poder calorífico del gas producto es menor, esto se debe a la energía perdida en la vaporización del agua, esta pérdida de energía es irreversible, por lo que se recomienda un contenido de humedad menor al 33% aunque no es posible alcanzar el 0% (Jayah et al., 2003).



- **Pirólisis**

Una vez seco, la biomasa entra en la etapa de pirólisis, es un proceso endotérmico donde la materia prima se descompone térmicamente en gases más pequeños condensables y no condensables en ausencia de oxígeno, en un rango de temperatura 300-650°C. Los productos del pirólisis se clasifican en tres tipos principales: Líquido (alquitranes, hidrocarburos más pesados y agua), Sólido (principalmente carbón vegetal) y Gas (compuesto principalmente de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>). El proceso de pirólisis puede estar representado por una reacción genérica como (Basu, 2013):



- **Combustión parcial**

La combustión parcial se refiere a la oxidación de una parte del carbono de la biomasa y algunos gases volátiles generados durante la pirólisis, el calor liberado por la combustión de estos son los que alimentan los procesos de secado, pirólisis y el proceso de la gasificación, manteniendo las condiciones necesarias para que estos continúen.

- **Gasificación**

Esta etapa ocurre generalmente a una temperatura entre 800-1000°C, el paso de la gasificación implica reacciones químicas entre el carbón de biomasa (producido en la etapa de pirólisis), vapor, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno en el reactor. El carbón vegetal de biomasa es poroso y reactivo, la porosidad del carbón de biomasa está en el rango del 40 al 50% según Basu (2013) y dependiendo del agente gasificante

ocurren las principalmente las reacciones del R1 al R5 de la Tabla 1. Las reacciones de gasificación son generalmente de naturaleza endotérmicas como las reacciones R1 y R2, pero algunas de ellas también pueden ser exotérmicas, como por ejemplo R3, R4 y R5 de la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Reacciones típicas de gasificación a 25°C en kJ/mol.*

Tipo de reacción	Reacción	Entalpia de reacción
<b>Reacciones del carbono</b>		
R1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	+172
R2 (agua, gas o vapor)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131
R3 (hidrogasificación)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74.8
R4	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	-111
<b>Reacciones de oxidación</b>		
R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
R6	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	-284
R7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O$	-803
R8	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	-242
<b>Reacción de cambio</b>		
R9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41.2
<b>Reacciones de metanación</b>		
R10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	-247
R11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206
R14	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-165
<b>Reacciones de reforma de vapor</b>		
R12	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	+206
R13	$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	-36

Nota: en la tabla se muestra las reacciones típicas que ocurren en la gasificación de la biomasa, también se muestra la entalpia de reacción a presión y temperaturas normales.

Tomado de Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction, por Basu, P., 2013, Academic Press. © 2013 Elsevier.

### 2.2.5. Tipos de gasificadores de biomasa

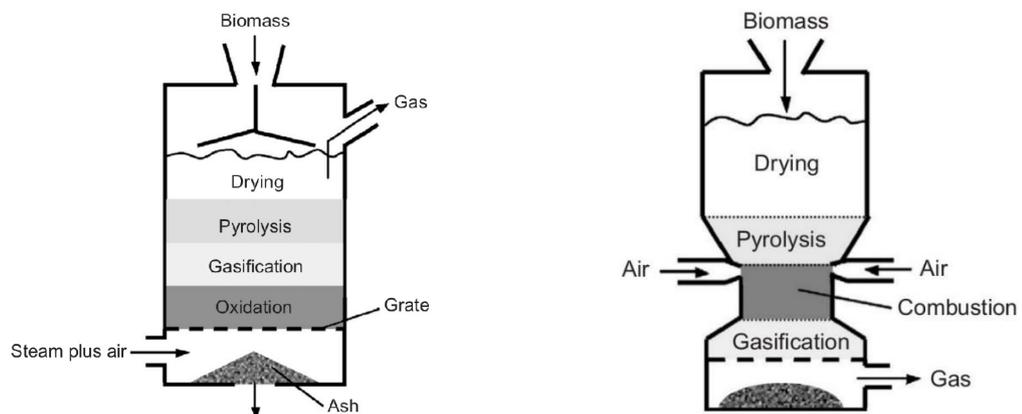
Existen varios tipos de gasificadores, los cuales se diferencian principalmente por la dirección de flujo de los gases y el tipo de combustible que utilizan, cada uno con sus características y aplicaciones específicas, en la Figura 4 se muestran los principales tipos de gasificadores utilizados en la conversión de biomasa.

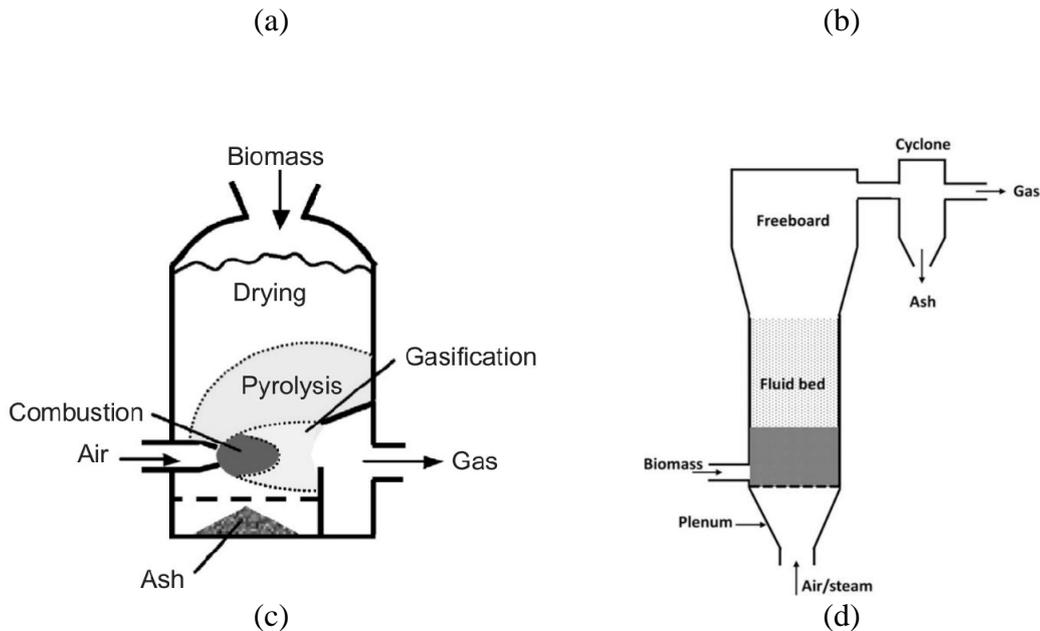
- **Gasificador de corriente ascendente:** En la Figura 4-(a) se puede apreciar un gasificador de corriente ascendente, este gasificador ha sido ampliamente utilizado para gasificar carbón. En este diseño, el combustible ingresa por la parte superior mientras que el medio gasificante aire u oxígeno ingresa desde la parte inferior. El combustible desciende por gravedad pasando a través de las zonas de secado, pirólisis, gasificación y combustión, mientras que el aire u oxígeno alimenta principalmente la zona de oxidación y los gases de combustión pasan por la zona de gasificación, pirólisis y zona de secado perdiendo calor, el gas producto es una mezcla de los gases provenientes de las zonas de oxidación, gasificación y pirólisis a una temperatura de alrededor de 300°C a 600°C, este tipo de gasificador produce mayor contenido de alquitrán en el gas de síntesis, pero son capaces de manejar combustibles con alto contenido de humedad (hasta 60%) y tamaños de partículas entre 5 y 100 mm. Su principal ventaja radica en su construcción simple y alta eficiencia térmica (Dahlquist, 2013).

- **Gasificador de corriente descendente:** En la Figura 4-(b) se muestra un gasificador de corriente descendente, es te gasificador está diseñado para gasificar combustibles con alto contenido de volátiles, como la madera y la biomasa. El combustible ingresa al gasificador desde la parte superior del reactor y desciende atravesando la zona de contricción conocida como garganta donde es inyectado el medio gasificante aire u oxígeno, justo por debajo de los inyectores el aire se encuentra con los gases productos de pirólisis y estos combustionan liberando calor, tanto los gases productos y los sólidos como el carbón y cenizas descienden hacia debajo de ahí su nombre de gasificador de corriente descendente. Esta configuración facilita el craqueo de alquitranes en una región de alta temperatura, produciendo gas de síntesis relativamente limpio. Funciona muy bien con combustibles secos con hasta 25% de humedad y bajo contenido de cenizas, con tamaños de partículas entre 10 a 300 mm. Debido a la baja producción de alquitrán tiene aplicaciones en alimentación a motores de combustión interna y la temperatura de funcionamiento en la zona de gasificación es de alrededor de 700°C (Dahlquist, 2013).

**Figura 4**

*Esquemas de cuatro gasificadores principales*





Nota. a: gasificador de corriente ascendente. b: gasificador de corriente descendente. c: gasificador de corriente cruzada. d: gasificador de lecho fluidizado. Fuente: (Mahmoudi, 2015)

- **Gasificador de corriente cruzada:** Este gasificador se puede apreciar en la Figura 4-(c), se caracteriza por su diseño simple y liviano generalmente se considera adecuado solo para combustibles con bajo contenido de alquitranes y cenizas, la biomasa ingresa por la parte superior mientras que el aire es inyectado lateralmente a través de una sola boquilla a alta velocidad, el gas producto se extrae por el lado opuesto al ingreso de aire, la alta velocidad de ingreso del aire a través del inyector de aire produce una zona de alta temperatura conocida como hogar alcanzan temperaturas superiores a  $1500^{\circ}\text{C}$  debido a la combustión parcial del carbono vegetal. En este tipo de gasificador la boquilla debe ser de material refractario o refrigerado por agua debido a la alta temperatura que se alcanza, además el combustible de biomasa debe ser de un bajo contenido en cenizas para evitar la escoria. Los gasificadores de corriente cruzada tienen el tiempo de respuesta rápido debido a la pequeña masa que combustiona y es común en unidades de biomasa a pequeña escala. (Reed & Das, 1988).

- **Gasificador de lecho fluidizado:** En la Figura 4-(d) se muestra un esquema de este gasificador, son más complejos en su construcción en comparación con otros tipos de gasificadores, como los de lecho fijo. funciona utilizando un flujo de gas como aire, vapor u oxigeno los cuales ingresan por la parte inferior del reactor atravesando el lecho de partículas sólidas, como arena solida de sílice este material solido cumple la función principal en actuar como un medio para transferir calor de manera eficiente a la biomasa o combustible. El flujo de este gas fluidizante debe ser lo suficientemente fuerte como para hacer que las partículas del lecho se comporten como un fluido, creando una mezcla homogénea con el combustible que ingresa al reactor. Los lechos fluidizados ofrecen ventajas sobre los lechos fijos como la alta tasa de transferencia de calor y masa lo que permite su aplicación en la generación de energía a gran escala (Basu, 2013).

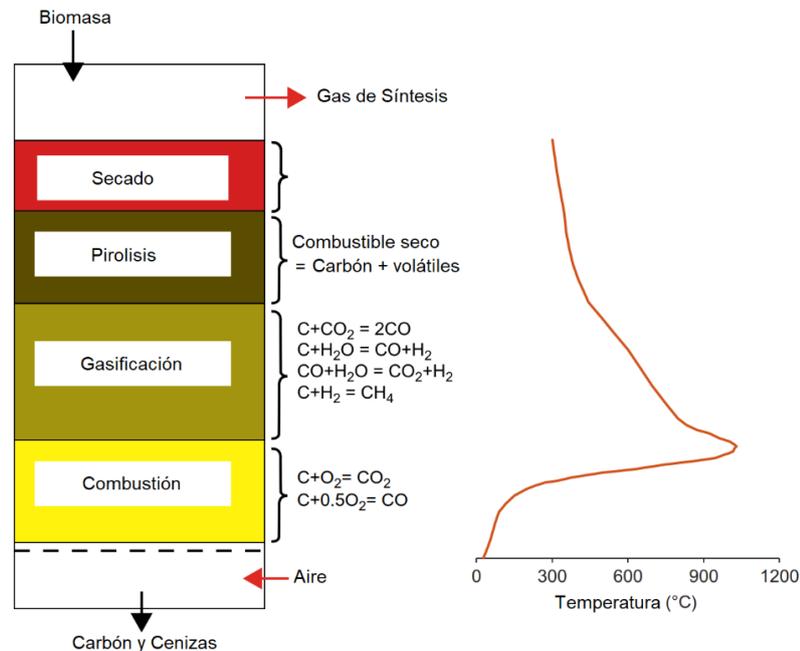
#### 2.2.6. Gasificador tipo top lit updraft (T-LUD)

Los gasificadores de tiro ascendente, tanto en su configuración clásica (ver Figura 5) como en el tipo Top Lit Updraft (TLUD) (ver Figura 6), son tecnologías ampliamente utilizados en la producción de gas de síntesis a baja escala, debido a su principio de funcionamiento y por la simplicidad de construcción son ideales para aplicaciones domesticas como una cocina que utiliza biomasa como fuente de combustible. Estos dispositivos aprovechan el movimiento del gas caliente a través del combustible para promover reacciones químicas que generan un gas utilizable para la energía. Aunque ambos tipos operan de tiro ascendente la principal diferencia está en la producción de alquitrán.

La configuración clásica del gasificador de corriente ascendente como la Figura 4-(a) produce mayor contenido de alquitrán en el gas de síntesis, esto se debe a que la zona de pirólisis se encuentra por encima de la zona de alta temperatura (zona de combustión ver Figura 5) por tanto, no es posible que el gas de síntesis pueda someterse a un proceso de craqueo térmico como menciona Basu (2013), ya que el gas producto fluye en dirección opuesta al movimiento de la biomasa.

### Figura 5

#### *Etapas de gasificación en un gasificador de corriente ascendente*



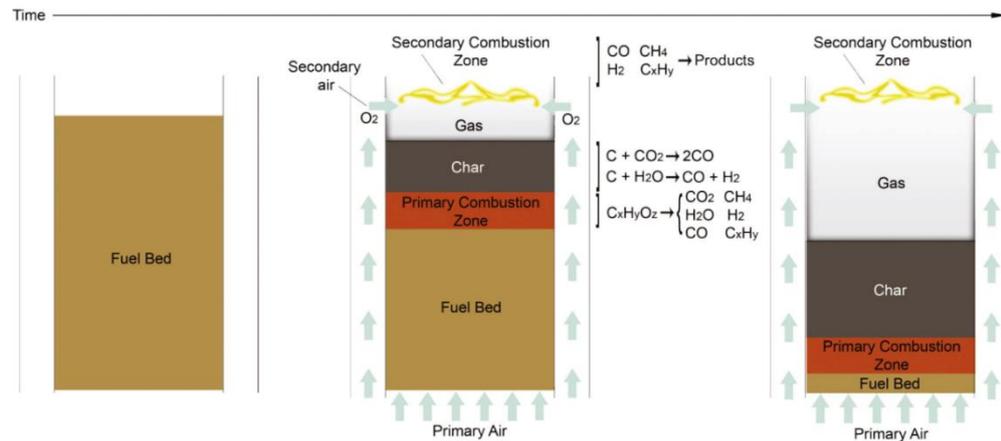
Nota. Fuente: (Basu, 2013).

Por otro lado, la configuración del gasificador de tiro ascendente del tipo TLUD (encendido desde arriba) tiene la ventaja de producir el gas combustible relativamente limpio con bajo contenido de alquitranes, lo cual es esencial para uso doméstico como para una cocina. Sin embargo, la recarga del combustible se realiza por lotes lo que interrumpe el proceso de gasificación continua, es decir se

llena el reactor de una sola vez y luego se enciende desde la parte superior y el consumo de combustible avanza hacia abajo dejando a su paso biocarbón (carbono elemental más cenizas) hasta consumir la biomasa (Belonio, 2005).

### Figura 6

#### *Etapas de gasificación de gasificador tipo Top Lit Updraft (T-LUD)*



*Nota.* En la figura se muestra las etapas del proceso de gasificación de un gasificador de corriente ascendente tipo Top Lit Updraft (T-LUD). Fuente: (Tryner et al., 2014).

El aire primario ingresa por la parte inferior del reactor atravesando el lecho de combustible, y luego del encendido de la biomasa desde la parte superior del reactor se establecen las zonas móviles de gasificación, combustión parcial, pirólisis y secado como se puede apreciar en la Figura 6, que se desplazan hacia abajo conforme la biomasa se va consumiendo dejando en la parte superior biocarbón. En la zona de combustión se genera el calor necesario para alimentar los procesos de pirólisis, gasificación y el cesado de la biomasa debido a la combustión parcial de los gases de pirólisis con el oxígeno presente en la corriente de aire primario, en la zona de combustión se consume todo el oxígeno por lo que a la zona de gasificación solo fluyen los gases producto de la combustión y los gases restantes de la zona de pirólisis ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y trazas de gases de la forma  $\text{C}_x\text{H}_y$ ), en la zona de gasificación ocurren las reacciones  $\text{C} + \text{CO}_2 =$



$2CO$  y  $C + H_2O = CO + H_2$  debido a la presencia del carbón de biomasa dejado por la pirólisis de la biomasa, estos productos resultantes de la gasificación se suman a la corriente de gas de síntesis (Tryner et al., 2014; Basu, 2013; Belonio, 2005).

## **2.3. PREDICCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL GAS SÍNTESIS**

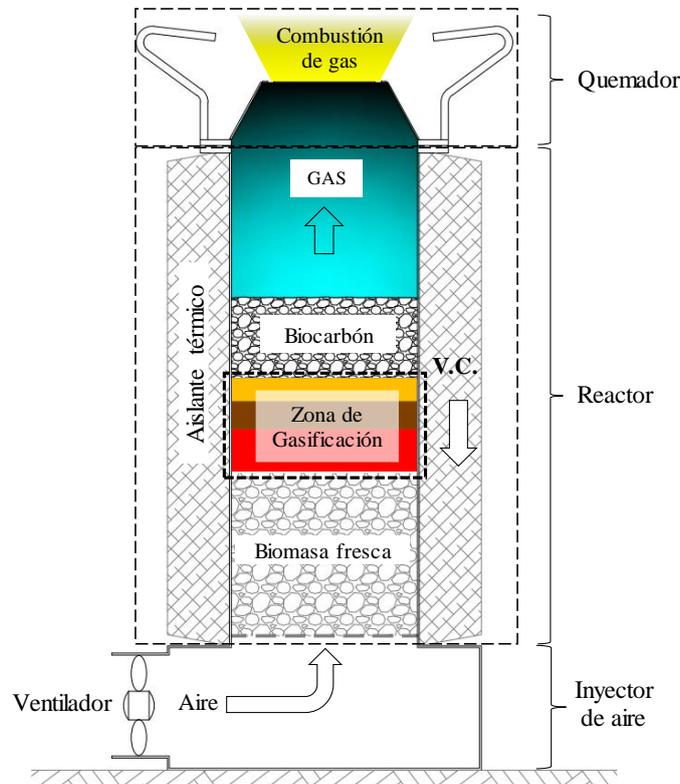
La predicción de la composición del gas combustible o gas de síntesis, es un aspecto crucial en el diseño y la optimización del proceso de gasificación, varios autores han determinado que la composición del gas de síntesis está compuesta principalmente por las especies de monóxido de carbono (CO), el hidrógeno ( $H_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ), nitrógeno ( $N_2$ ) y alquitranes, mientras que en los residuos sólidos se puede encontrar carbono no convertido (C) y cenizas (Scharler et al., 2021; Dutta et al., 2014; Pedroso et al., 2013; Chen et al., 2012; Jayah et al., 2003; Kaupp & Goss, 1981).

### **2.3.1. Modelo de equilibrio termodinámico**

La gasificación es un proceso complejo y sensible a diferentes factores como las características de la materia prima, su composición química, tamaño y contenido de humedad. Además de estos, otros factores que influyen al proceso de gasificación como la tasa de flujo del agente gasificante, la relación de equivalencia (ER), el tiempo de residencia de la biomasa, la temperatura y la presión dentro del gasificador han llevado al desarrollo de modelos matemáticos destinados a caracterizar y predecir la producción de gas de síntesis, como los modelos de equilibrio termodinámico, cinéticos, de dinámica de fluidos computacional (CFD) y redes neuronales artificiales.

**Figura 7**

*Esquema de una cocina gasificadora tipo Top Lit Updraft (T-LUD)*



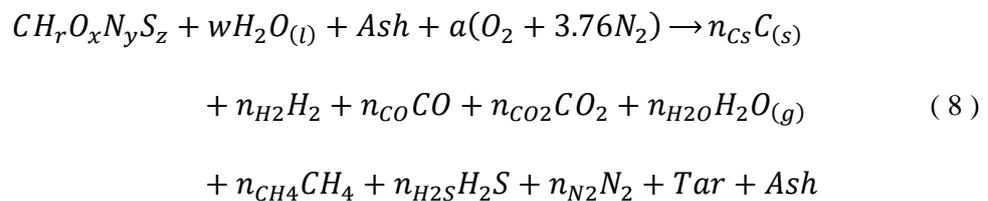
Nota: en la imagen se muestran las partes de la cocina gasificadora tipo TLUD.

El *modelo de equilibrio termodinámico* se basa en una reacción de gasificación global que ocurre dentro del reactor, el equilibrio químico de las reacciones independientes y el balance de energía del reactor considerando que del producto gaseosos de las especies del gas de síntesis se comportan como gases ideales. Este modelo es práctico y sencillo para predecir los productos de gas de síntesis, pero tiene ciertas limitaciones, no puede predecir la influencia de parámetros hidrodinámicos, es independiente del diseño de la geometría del gasificador, pero es conveniente para estudiar la influencia de los parámetros del combustible y del proceso. En este modelo se considera que la temperatura del reactor es uniforme y se encuentra en estado estacionario; el reactor del

gasificador se considera adiabático y el tiempo de residencia de los reactivos es lo suficientemente alto como para alcanzar el equilibrio químico, aunque este no pueda alcanzarse dentro del gasificador. A pesar de estas suposiciones, el modelo ofrece una predicción razonable del rendimiento máximo alcanzable de un producto deseado. Este enfoque ha sido utilizado por varios autores para predecir la composición del gas de síntesis, incluyendo a Ibrahim et al. (2022), De La Hoz et al. (2017), Dutta et al. (2014), y Jarunghammachote y Dutta (2007), entre otros.

### 2.3.1.1. Reacción de gasificación global

Con base a las suposiciones mencionadas anteriormente para el modelo de equilibrio termodinámico, la ecuación de reacción de gasificación global ( 8 ) constituye la base para determinar las distintas especies del gas de síntesis (Ibrahim et al., 2022; Silva et al., 2019). El lado izquierdo de la ecuación ( 8 ) representan los reactivos que ingresan a la cámara de gasificación como la biomasa y el medio gasificante aire y la parte derecha de la ecuación ( 8 ) representan los productos de la gasificación del gas de síntesis.



Donde:

- $CH_rO_xN_yS_z$ : es la fórmula empírica de la biomasa.
- $w$ : es la humedad en moles de  $H_2O$  contenida en la biomasa determinada a partir de la ecuación ( 9 ).



$$w = \frac{M_{bm.daf} \times MC}{M_{H_2O} \times (1 - MC - Ash)} \left( \frac{\text{mol de } H_2O}{\text{mol de biomasa daf}} \right) \quad (9)$$

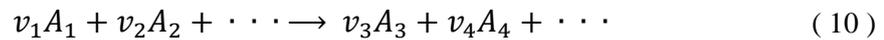
- a: es el numero de moles de oxígeno del aire por mol de biomasa.
- Los coeficientes  $n_{C_s}$ ,  $n_{H_2}$ ,  $n_{CO}$ ,  $n_{CO_2}$ ,  $n_{H_2O}$ ,  $n_{CH_4}$ ,  $n_{H_2S}$  y  $n_{N_2}$  representan los números de moles de carbón solido  $C_{(s)}$ , hidrogeno  $H_2$ , monóxido de carbono  $CO$ , dióxido de carbono  $CO_2$ , vapor de agua  $H_2O_{(g)}$ , metano  $CH_4$ , sulfuro de hidrogeno  $H_2S$ , y nitrógeno  $N_2$  respectivamente.
- Tar: representa los alquitranes.
- Ash: representa las cenizas (compuestos inertes).
- $M_{bm.daf}$ : es la masa molar de la biomasa en base seca libre de cenizas.
- $M_{H_2O}$ : es la masa molar del agua.
- MC: es el contenido de humedad de la biomasa por mol.

El gasificador de biomasa mostrado en la Figura 7, opera a la presión atmosférica por lo que la mezcla de gases productos de la gasificación de la biomasa tiene un comportamiento aproximado al gas ideal, como menciona Cengel & Boles (2015), a presiones muy bajas, los gases reales se aproximan al comportamiento del gas ideal, independientemente de su temperatura. Esta aproximación tiene la ventaja de utilizar las ecuaciones matemáticas de los gases ideales en los cálculos del proceso de gasificación de biomasa.

### 2.3.1.2. Equilibrio químico de gas ideales

En un sistema reactivo conforme las reacciones químicas van avanzando en el tiempo, se alcanza el estado de equilibrio químico cuando las concentraciones de los reactivos y productos ya no cambian con el

tiempo, en otras palabras, esto ocurre cuando la velocidad de la reacción directa es igual a la reacción inversa. En este estado, para una reacción general ecuación ( 8 ) la condición de equilibrio químico esta dado por la ecuación ( 11 ) (Levine, 2014).



$$\Delta G_T^0 = -RT \ln \left[ \prod_i \left( \frac{P_i}{P^0} \right)^{v_i} \right] \quad (11)$$

el termino entre corchetes se define  $K_P^0$ , como la constante de equilibrio quimico para una reacción química de gas ideal.

$$K_P^0 = \prod_i \left( \frac{P_i}{P^0} \right)^{v_i} \quad (12)$$

Donde:

- $\Delta G_T^0$ : es el cambio de energía de Gibbs estándar a una temperatura T de la ecuación de reacción ( 8 ).
- $R$ : es la constante universal de los gases ideales.
- $T$ : es la temperatura de reacción
- $P_i$ : representa la presión parcial de la especie  $i$  en la mezcla de gases cuando se alcanza el equilibrio químico.
- $P^0$ : es la presión estándar (1 bar).
- $v_i$ : coeficiente estequiométrico, por convención se considera positivo para productos y negativo para los reactivos.

La *energía de Gibbs G*, también conocida como la *energía libre de Gibbs*, se define como una función termodinámica que combina las propiedades de entalpia (H), entropía (S) y la temperatura (T). Para una

sustancia pura la energía de Gibbs en un estado determinado está definida por la ecuación ( 13 ).

$$G = H - T * S \quad (13)$$

El *cambio de energía de Gibbs* en el estado estándar y a una temperatura T ( $\Delta G_T^0$ ) para la reacción química típica ( 10 ) se puede calcular mediante la ecuación ( 14 ).

$$\Delta G_T^0 = \sum_i v_i \Delta G_{f,T,i}^0 \quad (14)$$

Donde:

- $\Delta G_{f,T,i}^0$ : representa la energía de Gibbs de formación de la sustancia *i* a temperatura T.
- $v_i$ : coeficiente estequiométrico (positivo para productos y negativo para los reactivos).

Otra forma de calcular el cambio de energía de Gibbs de una reacción química es mediante la ecuación ( 15 ), utilizando los *calores específicos a presión constante* ( $C_{P,i}$ ) de las sustancias gaseosas “*i*” (Smith, Van Ness, & Abbott, 2007).

$$\frac{\Delta G_T^0}{RT} = \frac{\Delta G_{T_0}^0 - \Delta H_{T_0}^0}{RT_0} + \frac{\Delta H_{T_0}^0}{RT} + \frac{1}{T} \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P}{R} dT - \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P}{R} \frac{dT}{T} \quad (15)$$

Donde:

- $\Delta G_{T_0}^0$ : cambio de energía de Gibbs en el estado estándar a una temperatura  $T_0 = 298.15K$ .



- $\Delta H_{T_0}^0$ : cambio de entalpia en el estado estándar a una temperatura  $T_0 = 298.15K$ .
- $T_0$ : es la temperatura de referencia ( $T_0 = 298.15K$ ).
- $T$ : es la temperatura del sistema en Kelvin.
- $R$ : es la constante universal de los gases ideales ( $8.314 \text{ J/mol-K}$ ).
- $\Delta C_P$ : representa el cambio en la capacidad calorífica de reacción, se definida por:

$$\Delta C_P = \sum_i v_i C_{P,i} \quad (16)$$

- $v_i$ : coeficiente estequiométrico, por convención se considera positivo para productos y negativo para los reactivos.
- $C_{P,i}$ : calores específicos a presión constante de las sustancias  $i$ .

La capacidad calorífica a presión constante para los gases ideales está en función de la temperatura ( $T$ ) expresada mediante la ecuación polinómica ( 17 ) los cuales pueden encontrarse tabulados en las tablas termodinámicas (Smith, Van Ness, & Abbott, 2007).

$$\frac{C_{P,i}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \quad (17)$$

Donde  $A, B, C$  y  $D$  son constantes características de la sustancia en particular, la relación  $\frac{C_{P,i}}{R}$  no tiene dimensión, las unidades de  $C_{P,i}$  depende de la elección de  $R$ .

### 2.3.1.3. Balance energético del reactor

El balance energía y masa es un aspecto fundamental en el diseño de un gasificador de biomasa. Este proceso implica cálculos relacionados

con el flujo de gas de síntesis, la tasa de alimentación de combustible y la tasa de alimentación del medio gasificante para obtener una potencia requerida. Los otros parámetros implicados son relación de equivalencia (ER), el poder calorífico del gas de síntesis.

La ecuación de *balance de energía del gasificador* considerando al gasificador como un sistema reactivo de flujo estacionario, está dado por la ecuación ( 18 ) (Moran & Shapiro, 2018):

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{n}_c} - \frac{\dot{W}}{\dot{n}_c} = \sum_{i=1}^n n_i (\Delta H_{f,i}^0 + \Delta H_i^0) - \sum_{j=1}^m n_j (\Delta H_{f,j}^0 + \Delta H_j^0) \quad (18)$$

Donde:

- $\dot{Q}$ : flujo de calor entregado al sistema.
- $\dot{W}$ : potencia realizada por el sistema.
- $\dot{n}_c$ : caudal de combustible que ingresa al sistema.
- $n_i$  y  $n_j$ : coeficiente estequiométrico de la ecuación de reacción que da los moles por mol de combustible de los productos y reactivos respectivamente.
- $\Delta H_{f,i}^0$  y  $\Delta H_{f,j}^0$ : entalpia de formación de las sustancias de los productos y reactivos respectivamente.
- $\Delta H_i^0$  y  $\Delta H_j^0$ : cambio de la entalpia de las sustancias de los productos y reactivos respectivamente, desde la temperatura de referencia  $T_0$  hasta la temperatura del sistema  $T$ .

### 2.3.2. Poder calorífico del gas de síntesis.

Un concepto importante a tener en cuenta es el cálculo del poder calorífico neto ( $LHV_{gas}$ ) del gas de síntesis, el cual mide la energía contenida en el gas producto de la gasificación, se sabe que el gas de síntesis es una mezcla de gases: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, y N<sub>2</sub>. El  $LHV_{gas}$  del gas de síntesis se calcula sumando las contribuciones energéticas de cada componente del gas. El poder calorífico inferior del gas de síntesis se calcula con mediante la expresión ( 19):

$$LHV_{gas} = \sum_i y_i LHV_i \quad (19)$$

Donde:

- $y_i$  es la fracción molar o volumétrica de la especie  $i$  en el gas de síntesis
- $LHV_i$  es el poder calorífico inferior de la sustancia  $i$  del gas de síntesis.

### 2.3.3. Índice de gasificación específica

Es un parámetro que se utiliza para cuantificar la velocidad de gasificación de la biomasa en un reactor de sección transversal cilíndrica. Este índice permite evaluar el proceso de gasificación en términos de la cantidad de biomasa consumida por unidad de tiempo y área de la sección transversal del reactor. Y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$IGE = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \left( \frac{kg}{m^2 * h} \right) \quad (20)$$

Donde:

- $\Delta m$  es la masa de biomasa convertida (en kg).
- $A$  es el área de la sección transversal del reactor (en m<sup>2</sup>).

- $t$  es el tiempo de gasificación (en horas).

#### 2.3.4. Diseño del reactor TLUD

Con el objetivo de simplificar tanto la fabricación como la operación, se ha diseñado una cocina gasificadora pirolítica de tipo TLUD, cuyo esquema se presenta en la Figura 8.

##### 2.3.4.1. Partes de la cocina de biomasa tipo TLUD

La cocina de biomasa tipo Tlud se compone principalmente de:

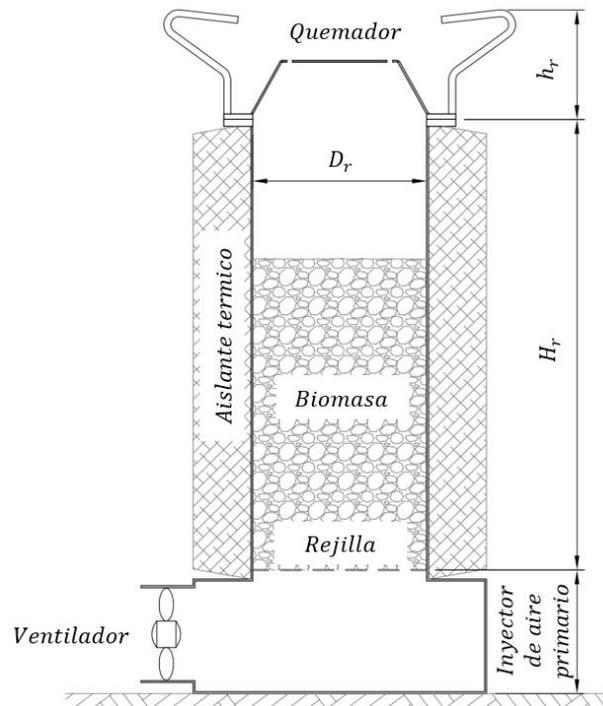
- *Reactor*, donde se lleva a cabo las reacciones de pirólisis, su forma geométrica del reactor es de tipo cilíndrico de diámetro  $D_r$  y de altura  $H_r$  con una base tipo rejilla donde se soporta de la biomasa.
- *Inyector de aire primario*, es la sección donde se inyecta aire primario impulsado por el ventilador.
- *Quemador*, es la zona donde los gases productos (gas de síntesis) se queman o combustionan con el aire secundario y además sirve de soporte para la olla.
- *Aislante térmico*, tiene la función de atenuar la transferencia de calor al medio ambiente.

##### 2.3.4.2. Tasa de consumo de biomasa

La tasa de consumo o tasa de gasificación de la biomasa es la relación de la masa de biomasa consumida en el reactor gasificador por unidad de tiempo (horas) y se calcula con la ecuación ( 21 ) (Basu, 2013):

**Figura 8**

*Partes de la cocina gasificadora pirolítica para diseñar*



Nota: en el esquema se aprecia las partes principales de un gasificador tipo TLUD

$$\dot{m}_{bm} = \frac{P_d}{\eta_r \cdot LHV_{bm,ar}} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (21)$$

Donde,  $P_d$  es la potencia de diseño en kW,  $\eta_r$  representa la eficiencia de gasificación del reactor y  $LHV_{bm,ar}$  es el poder calorífico inferior de la biomasa en kJ/kg en base ar.

### 2.3.4.3. Flujo de aire primario

Se refiere al caudal de aire primario en m<sup>3</sup>/h que ingresa por la parte inferior del reactor impulsado por el ventilador, el flujo de aire primario es muy importante para la gasificación de la biomasa y de esto depende la potencia del ventilador y se calcula mediante la expresión ( 22 ) (Belonio, 2005):



$$Q_{aire} = \frac{ER \cdot \dot{m}_{bm} \cdot m_{a,st}}{\rho_{aire}} \left( \frac{m^3}{hr} \right) \quad (22)$$

Donde:

- $ER$  es la relación de equivalencia y se puede calcular con la expresión ( 23 ).
- $\dot{m}_{bm}$  es la tasa de consumo de la biomasa en kg/h,
- $m_{a,st}$  es la masa de aire estequiométrico necesario para la combustión completa de la biomasa y se calcula con la ecuación.
- $\rho_{aire}$  es la densidad del aire en kg/m<sup>3</sup>.

Cálculo de la *relación de equivalencia*  $ER$ , definido como la relación entre masa de oxígeno real necesaria para la gasificación y la masa de oxígeno estequiométrico necesaria de la combustión completa de la biomasa, esta relación es un factor importante ya que para que ocurra la gasificación de la biomasa la relación de equivalencia debe ser menor a 1, caso contrario ocurriría la combustión de la biomasa, la gasificación ocurre en un medio deficiente de oxígeno por lo que la relación de equivalencia debe variar entre 0.2 al 0.3 (Basu, 2013). Y esto se puede determinar con a la ecuación ( 23 ).

$$ER = \frac{a}{a_{st}} \quad (23)$$

Donde  $a$  es la cantidad de moles de oxígeno necesaria para la gasificación por mol de biomasa seca y libre de cenizas (daf),  $a_{st}$  es la cantidad mínima de moles de oxígeno (aire estequiométrico) para la combustión completa de la biomasa seca y libre de cenizas (daf).

#### 2.3.4.4. Pérdida de presión en el lecho de biomasa

La caída de presión ( $\Delta P_{bm}$ ) en el lecho de biomasa en reactor de la cocina gasificadora, se debe a la fricción entre el fluido y el lecho de biomasa esto influye directamente en la potencia del ventilador. La pérdida de presión en el lecho de combustible se puede estimar mediante la ecuación de Ergun ecuación ( 24 ) (Salcedo Díaz, 2011).

$$\frac{\Delta P_{bm}}{H} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu \cdot u}{(\Phi \cdot d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_{aire} \cdot u^2}{\Phi \cdot d_p} \quad (24)$$

Donde:

- $\Delta P_{bm}$ : pérdida de presión manométrica, debida al rozamiento en el lecho de biomasa, (Pa).
- $H$ : altura del lecho de biomasa (m).
- $\varepsilon$ : porosidad del lecho o fracción volumétrica de huecos del lecho de biomasa.
- $\mu$ : viscosidad dinámica del fluido (kg/m.s)
- $u$ : velocidad superficial del fluido (aire), determinada a la sección transversal del lecho (m/s)
- $\Phi$ : factor de esfericidad de la partícula de biomasa
- $d_p$ : diámetro medio de la partícula de biomasa (m).
- $\rho$ : densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).

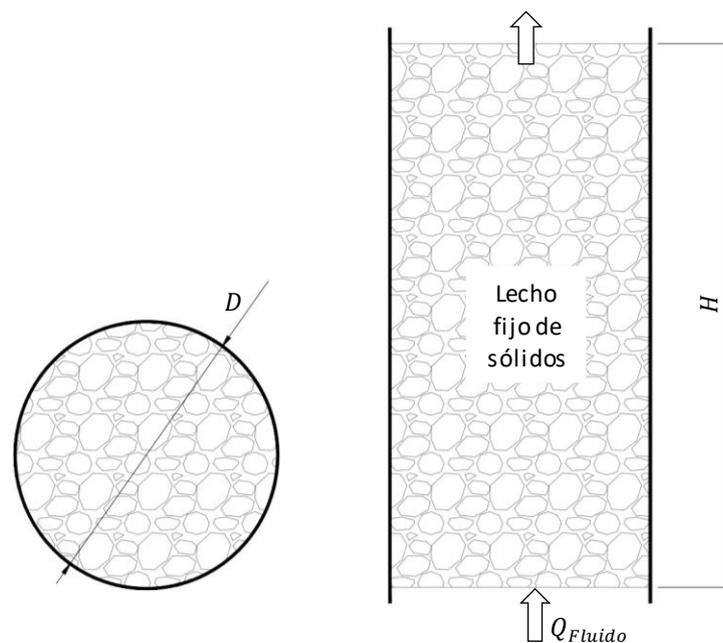
#### 2.3.5. Eficiencia térmica de la cocina gasificadora pirolítica.

La eficiencia térmica de una estufa a biomasa se puede determinar siguiendo el protocolo establecido de la prueba de ebullición de agua (WBT) en

su versión modificada protocolo de rendimiento y emisiones “EPTP” (DeFoort et al., 2010). El cual consiste en hacer hervir 5 litros de agua de manera controlada desde la temperatura ambiente hasta alcanzar el punto de ebullición y luego continuar con la ebullición por 45 minutos adicionales. La eficiencia térmica de una cocina gasificadora de biomasa se define en este protocolo como la relación entre la energía transferida al agua y la diferencia entre la energía contenida en la biomasa y la energía que queda en los residuos de carbono luego de finalizar la prueba. La eficiencia térmica se puede determinar utilizando la ecuación ( 25 ).

### Figura 9

*Lecho fijo de sólidos por el que circula un fluido*



Nota: en la figura se muestra la representación del lecho de biomasa atravesado por un flujo de fluido gaseoso (aire).

$$\eta_T = \frac{c_{p,H_2O}m_{H_2O,i}\Delta T_{H_2O} + h_{v,H_2O}m_{H_2O,evap}}{m_{bm}(1 - MC)LHV_{bm,db} - m_{bm}MC(c_{p,H_2O}\Delta T_{H_2O,bm} + h_{v,H_2O}) - LHV_C m_{Cr}} \quad (25)$$

Donde:



- $c_{p,H_2O}$ , es el calor específico del agua (J/g-K).
- $m_{H_2O,i}$ , es la masa de agua hervida en el recipiente (g).
- $\Delta T_{H_2O}$ , es el cambio de temperatura entre el inicio y final de la de la prueba (K).
- $h_{v,H_2O}$ , es la entalpia de vaporización del agua (J/g).
- $m_{H_2O,evap}$ , es la masa de agua evaporada en el recipiente durante la prueba (g).
- $m_{bm}$ , es la masa de biomasa consumido durante la prueba (g).
- $MC$ , es el porcentaje de humedad contenida en la biomasa.
- $LHV_{bm,db}$ , es el poder calorífico inferior de la biomasa en base seca (db) (J/g).
- $\Delta T_{H_2O,bm}$ , es el cambio de temperatura de la humedad contenida en la biomasa hasta evaporarse (K).
- $LHV_c$  es el poder calorífico inferior del carbono residual que queda al finalizar la prueba (J/g).
- $m_{cr}$ , es la masa de carbono residual que queda al finalizar la prueba (g).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo *teórico-experimental*. Eso se debe a que una primera etapa comprende la exploración experimental en un modelo basado en medidas de la literatura para determinar la *tasa de gasificación específica (TGE)* y determinar el perfil de la temperatura en la parte central del reactor, así como también, estudiar comportamiento de la potencia del ventilador. En la segunda etapa, se realizó el diseño final de la cocina gasificadora basado en cálculos teóricos utilizando los resultados obtenidos de la fase inicial experimental.

##### 3.1.2. Ubicación geográfica del sitio de investigación

El estudio se llevó a cabo en el distrito de Ilave en la provincia de El Collao, departamento de Puno ubicado a una altitud media de 3 862 m s. n. m. Las coordenadas geográficas de este sitio son 16°06'10"S y 69°36'22"O con una altitud de aproximadamente 3847 m s. n. m. Este lugar presenta condiciones frígido, seco y templado que influyen directamente en el comportamiento de las biomásas empleadas en la investigación.

##### 3.1.2.1. Condiciones ambientales locales

Las condiciones ambientales consideradas en este estudio, como la temperatura y la presión, son importantes para ajustar los diferentes

cálculos durante el proceso de diseño, así como en los procesos experimentales, ya que influyen directamente en las propiedades de los gases y las reacciones del sistema evaluado.

- Temperatura ambiental:  $T_{0,l} = 15^{\circ}\text{C}$  (determinado experimentalmente)
- Presión atmosférica:  $P_{0,l} = 65.01\text{kPa}$  (fuente SENAMHI)

### 3.1.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se desarrolló como se muestra en el esquema de la Figura 10. A continuación, se describe cada uno de las etapas:

#### 3.1.3.1. Primera etapa

*Revisión de la literatura:* se realizó una investigación exhaustiva de fuentes bibliográficas relacionadas a las cocinas gasificadora de biomasa tipo Tlud, para obtener dimensiones que sirvan como referencia para desarrollar el modelo inicial experimental.

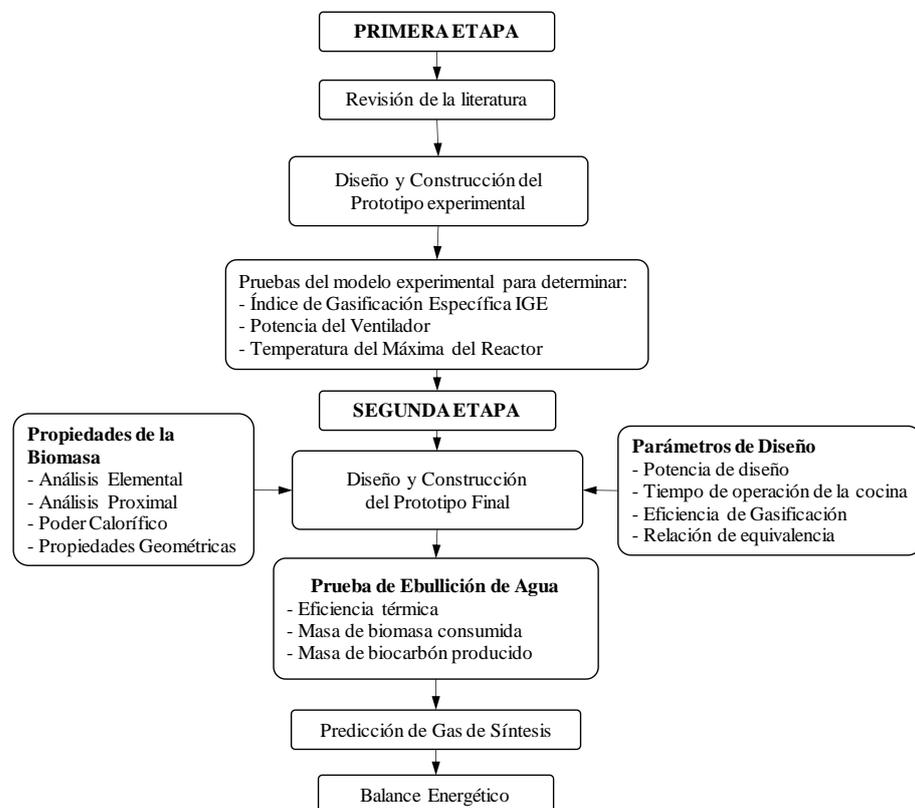
*Diseño y construcción del prototipo experimental:* con base a la información obtenida de la literatura, se construyó el modelo inicial experimental de la cocina gasificadora. El modelo experimental se pone en funcionamiento y se determina la tasa de gasificación específica, el comportamiento del ventilador y la variación de la temperatura en la parte central del reactor.

### 3.1.3.2. Segunda etapa

*Diseño y construcción del prototipo final:* esta etapa se refiere al diseño de la cocina gasificadora de acuerdo a los resultados obtenidos de la fase experimental y con los resultados del análisis físico y químico de las biomasas los cuales sirvieron para el dimensionamiento del reactor y los componentes necesarios de la cocina.

**Figura 10**

*Esquema de diseño de la investigación*



Nota: Este esquema ilustra la metodología utilizada para el desarrollo y evaluación de una cocina gasificadora, destacando las etapas importantes y los parámetros medidos durante el proceso de investigación.

*Prueba de ebullición de agua (PEA):* una vez diseñado el gasificador, se realiza la prueba de ebullición de agua para determinar la eficiencia térmica de la cocina, la masa de biomasa consumida y la masa



de biocarbón producido. Estas dos últimas variables fueron claves para predecir la composición del gas de síntesis.

*Predicción de la composición del gas de síntesis:* luego de la prueba de ebullición de agua y con los datos obtenidos de esta prueba se calcula la masa de carbono residual que queda al finalizar la prueba, este dato es crucial para predecir la composición del gas de síntesis con el modelo de equilibrio termodinámico.

*Balance energético:* con base a la predicción del gas de síntesis y la eficiencia térmica determinada en la prueba de ebullición del agua se realizó el balance másico y energético del sistema (gasificador y quemador).

## **3.2. EQUIPOS Y INSTRUMENTOS UTILIZADOS**

### **3.2.1. Fuente de alimentación**

Este equipo se utilizó para alimentar el ventilador del gasificador. El voltímetro y el amperímetro incorporado permitieron medir el voltaje y corriente suministrada, facilitando el cálculo de la potencia consumida por el ventilador.

Características:

- Marca: UNI-T
- Modelo: UTP-3315TFL-II
- Voltaje de salida DC: 0 – 30V
- Corriente de salida DC: 0 – 5A

**Figura 11**

*Fuente de alimentación de tensión variable*



Nota: la figura muestra la fuente de alimentación que se utilizó durante las pruebas experimentales.

### 3.2.2. Lector digital de temperatura

Instrumento que se utilizó para monitorear la temperatura en el reactor y en la prueba de ebullición de agua sus características se detallan a continuación:

**Figura 12**

*Pirómetro digital TC4-S.*



Nota: la figura muestra el pirómetro utilizado durante las pruebas experimentales. Para medir las señales de la termocupla tipo K.

- Modelo: Pirómetro TC4-S.
- Fuente de alimentación: 220V AC.

- Entradas admitidas: Termopares (K, E, J, B, S, R, N, T). Señales de corriente: 0–20mA, 4–20mA. Señales de voltaje: 0–5V, 0–10V.
- Precisión de medición:  $\pm 0.5\%$ .
- Rango de operación: Temperatura ambiente: -5 a 40°C. Humedad relativa: 35% a 85%.

### 3.2.3. Sensor de temperatura

Se utilizó dos termocuplas tipo K el primero para medir la temperatura en el reactor y el segundo en las pruebas de ebullición de agua.

*Termocupla tipo K 1200 °C:*

- Tipo de sensor: Termocupla tipo K (cromel/alumel).
- Rango de temperatura: 0 °C a 1200 °C.
- Tipo de conexión de sonda: roscado 1/2" NTP
- Carcasa de protección: aluminio
- Sonda: Vaina cilíndrica de acero inoxidable, diámetro 12mm y longitud de 75mm.

### Figura 13

*Termocupla tipo K 1200 °C*



Nota: la figura muestra la termocupla tipo K que se utilizó para monitorear la temperatura en el reactor.

*Termocupla tipo K 600 °C:*

- Tipo de sensor: Termocupla tipo K (cromel/alumel).
- Rango de temperatura: 0 °C a 600 °C.
- Tipo de conexión de sonda: liso, libre
- Sonda: Vaina cilíndrica de acero inoxidable, diámetro 5mm y longitud de 30mm.

**Figura 14**

*Termocupla tipo K 600 °C*



Nota: la figura muestra la termocupla tipo K que se utilizó para monitorear la temperatura del agua en las pruebas de ebullición del agua.

**3.2.4. Pirómetro termómetro digital infrarrojo**

Este instrumento se utilizó para medir temperaturas de las superficies externas de la cocina gasificadora.

- Marca: NJTY
- Modelo: T400
- Rango de temperatura: -50 ~ 400°C
- Repetibilidad:  $\pm 1\%$  o  $\pm 1\text{ C}$
- Tasa de disparo: 0,95 preestablecido

- Distancia al tamaño del punto: 12: 1
- Resolución de la pantalla: 0,1 C / F
- Tiempo de respuesta: 500ms
- Longitud de onda: 8-14  $\mu\text{m}$

### Figura 15

#### *Pirómetro termómetro digital infrarrojo*



Nota: en la imagen se puede apreciar el pirómetro de infrarrojo que se utilizó para medir temperaturas en las superficies.

### 3.2.5. Medidor de monóxido de carbono

El Medidor de Monóxido de Carbono detecta la presencia de monóxido de carbono (CO) y mide las concentraciones de CO desde 0 hasta 1000 ppm (partes por millón). Este medidor indica el porcentaje de concentración de monóxido de carbono en el aire.

Especificaciones:

- Marca: Smart Sensor
- Rango de medición de temperatura:  $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$  ( $-4^{\circ}\text{F} \sim 140^{\circ}\text{F}$ )

- Rango de medición de CO: 0-1000 ppm
- Resolución: 1 ppm
- Precisión:  $\pm 10\%$
- Tiempo de respuesta: < 60 segundos
- Fuente de alimentación: 3 pilas AA de 1.5V
- Apagado automático: Después de 15 minutos de inactividad
- Tipo de sensor: Sensor electroquímico específico para CO

### Figura 16

#### *Medidor de Monóxido de Carbono*



Nota: en la figura se muestra el medidor de monóxido de carbono que se utilizó para medir los niveles de concentración de monóxido de carbono durante las pruebas experimentales.

### 3.2.6. Balanza digital

Este instrumento se utilizó para medir las masas de las biomásas, agua entre otras tareas.

Características:

- Marca: kalery
- Modelo: gramera
- Precisión: 1 g

- Capacidad: 30 kg

Figura 17

*Balanza digital gramera*



Nota: en la figura se puede apreciar la balanza gramera utilizada para determinar las medir las masas de las biomosas, agua y entre otros.

### 3.2.7. Vernier analógico

Se utilizo para medir el diámetro promedio de las partículas de biomasa.

Figura 18

*Vernier analógico*



Nota: en la figura se muestra el vernier para tomar las dimensiones de las partículas de biomosas.

### 3.2.8. Tamices

Con el fin de obtener el tamaño adecuado y una muestra representativa de la biomasa, se utilizaron dos tipos de tamices para separar la biomasa de los materiales finos y gruesos. En la Figura 19, se muestran los tamices construidos con una malla metálica de 6.5 x 6.5 mm de abertura (parte superior), y con una malla de 11.5 x 11.5 mm de abertura (parte inferior).

#### Figura 19

*Tamices para biomasa*



Nota: en la figura se puede apreciar los tamices utilizados para el proceso de tamizado de las biomosas.

### 3.3. MATERIALES DE BIOMASA UTILIZADA

La bosta de alpaca y de vaca es un recurso que abunda en las zonas rurales del departamento de Puno y ha sido tradicionalmente utilizada desde tiempos antiguos como fuente de combustible y en la agricultura, esta disponibilidad constante resalta su importancia en la vida cotidiana de estas comunidades.

#### 3.3.1. Procedencia de la biomasa utilizada

Las biomosas fueron recolectadas en los siguientes lugares:

- Bosta de alpaca: este material fue recolectado en el distrito de Santa Rosa en la provincia de El Collao, departamento de Puno. Ubicado a una altitud de 4500 m s. n. m.
- Bosta de vaca: este material se recolecto en el distrito de Ilave en la provincia de El Collao, departamento de Puno ubicado a una altitud media de 3 862 m s. n. m.

### **3.3.2. Preparación y tratamiento de la biomasa**

La preparación y tratamiento de la biomasa es un proceso fundamental en el proceso de gasificación de biomasa, ya que el material de biomasa como la bosta de vaca y alpaca en su forma natural tiene tamaños irregulares que no son adecuados para utilizar directamente en un reactor de gasificador. Un lecho de biomasa con una distribución uniforme de tamaño de partículas permite un flujo uniforme del aire, una transferencia de calor uniforme y una reactividad constante de las partículas.

Debido a esta importancia, fue necesario realizar un proceso de tamizado para asegurar la distribución uniforme de tamaño de partículas en el lecho, en el caso de la bosta de vaca debido a su volumen fue necesario triturar en partículas más pequeñas y uniformes. Para el proceso de tamizado se utilizó dos tipos de tamices: tamiz con aberturas de 6.5 x 6.5 mm y tamiz con aberturas de 11.5 x 11.5 mm (Figura 19), el primero se utilizó para eliminar partículas finas, mientras el segundo para eliminar partículas de mayor tamaño.

Las biomasa utilizadas en la investigación fue lo que corresponde a la fracción que queda retenida entre los tamices con aberturas de 6.5 x 6.5 mm y 11.5 x 11.5 mm. En la Figura 20 se puede observar el proceso de preparación de las

biomasas. Las sub figuras a y b muestran el proceso de tamizado de las biomasas, en la parte inferior de estas figuras muestra la eliminación de las partículas finas con el tamiz de aberturas 6.5 x 6.5 mm y mientras que en la parte superior se aprecia la eliminación de las partículas de mayor tamaño con el tamiz de abertura 11.5 x 11.5mm.

### Figura 20

*Selección de las biomasas utilizadas*



a)



b)



c)



d)

Nota: en las figuras se puede apreciar el proceso de selección de las biomasas utilizando tamices. Donde; a: tamizado de bosta de alpaca, b: tamizado de bosta de vaca, c: muestra de biomasa bosta de alpaca y d: muestra de biomasa bosta de vaca.

Las sub figuras c y d ilustran el material de biomasa final de este proceso para ser utilizado en las pruebas experimentales.

### 3.3.3. Caracterización física de la biomasa

La caracterización física de la biomasa es importante para el diseño y optimización del proceso de gasificación. Esta caracterización comprende determinar las propiedades como la densidad aparente, la porosidad y la esfericidad ya que influyen directamente en la caída de presión y la eficiencia del proceso de gasificación. A continuación, se describen los métodos y procedimientos utilizados para analizar estas propiedades.

#### 3.3.3.1. Densidad aparente

La densidad aparente ( $\rho_{bm.a}$ ) se define como la relación que existe entre la masa de un material y el volumen total que ocupa, incluyendo los espacios vacíos entre las partículas. Para las biomásas utilizadas en esta investigación, la densidad aparente indica la cantidad de masa por unidad de volumen compactado. Esta propiedad se determinó de manera experimental utilizando un recipiente de volumen conocido, el recipiente que se utilizó se muestra en la Figura 21 (a), el volumen del recipiente se determinó midiendo la masa de agua necesaria para llenarlo completamente. Después de determinar el volumen del recipiente (seco) se procedió a llenar con la biomasa el recipiente vertiendo desde una altura de 100 mm por encima del borde superior del recipiente, hasta llenar completamente (Figura 21 (b)). La densidad se calculó con la ecuación ( 26 ).

$$\rho_{bm.a} = \frac{m_{bm}}{V_{rec.}} \quad (26)$$

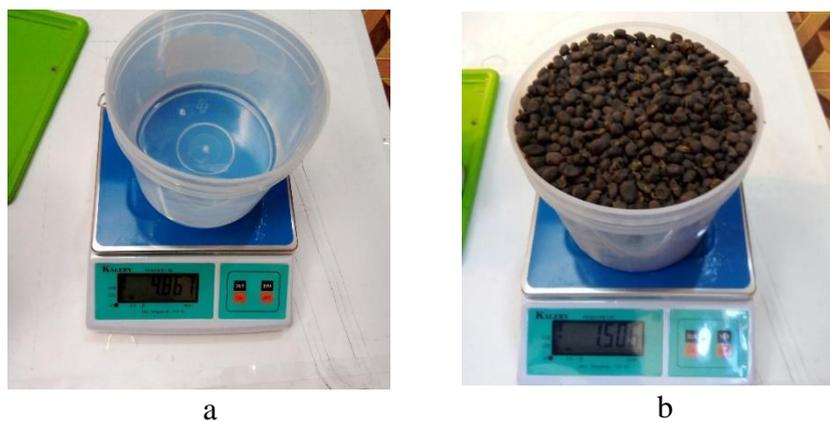
Donde,  $\rho_{bm.a}$  es la densidad aparente de la biomasa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $m_{bm}$  es la masa de biomasa que ocupa el recipiente (kg) y  $V_{rec.}$  es el volumen del recipiente vacío ( $\text{m}^3$ ).

### 3.3.3.2. Diámetro medio de la partícula de biomasa

El diámetro medio ( $d_p$ ) de la partícula de biomasa es una medida representativa que permite describir el tamaño promedio de las partículas, considerando su forma y distribución de tamaño. Para determinar el diámetro de la partícula de biomasa se tomó por cada tipo de biomasa una muestra representativa, a los cuales se tomaron tres mediciones independientes a sus diámetros por cada partícula con la ayuda de un vernier y luego se promediaron los diámetros obtenidos con el fin de aumentar la precisión.

**Figura 21**

*Determinación de la densidad aparente de la biomasa*



Nota: en las figuras se muestran el proceso de medición de la densidad aparente de las biomazas. Donde; a: Determinación del volumen del recipiente utilizando la masa del agua. b: Determinación de la densidad aparente.

## Figura 22

*Determinación de Tamaño de partículas de bosta de alpaca y bosta de vaca*



Nota: en la figura se puede apreciar el tamaño de las partículas de biomasa, en la imagen derecha se muestra las partículas de bosta de vaca y en la figura izquierda se aprecia el tamaño de las partículas de bosta de alpaca.

### 3.3.3.3. Esfericidad y porosidad

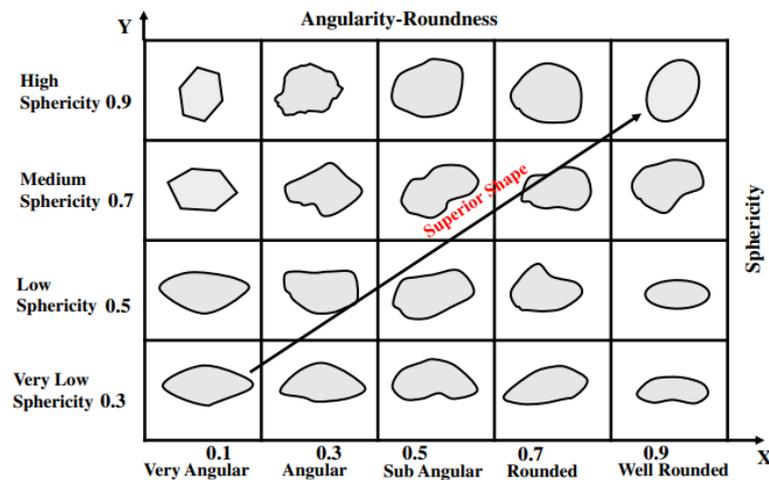
La esfericidad y la porosidad, junto a al diámetro de la partícula de biomasa, son aspectos importantes que permiten estimar la caída de presión en el lecho de biomasa, ya que a mayor nivel de esfericidad las pérdidas por fricción del fluido sobre el lecho son menores y mientras para un lecho de partículas con menor esfericidad la fricción aumenta. Por otro lado, a una porosidad superior, el fluido atraviesa el lecho con mayor facilidad, lo que reduce la resistencia al flujo y en consecuencia la caída de presión se reduce. Sin embargo, una porosidad menor implica un lecho más compacto por lo que la fricción aumenta y en consecuencia una la caída de presión a medida que el fluido atraviesa el lecho.

Para estimar las características geométricas de la biomasa como son: la esfericidad y la porosidad del lecho de biomasa, las muestras de

bosta de alpaca y vaca fueron tamizadas previamente como se puede apreciar en la Figura 20.

**Figura 23**

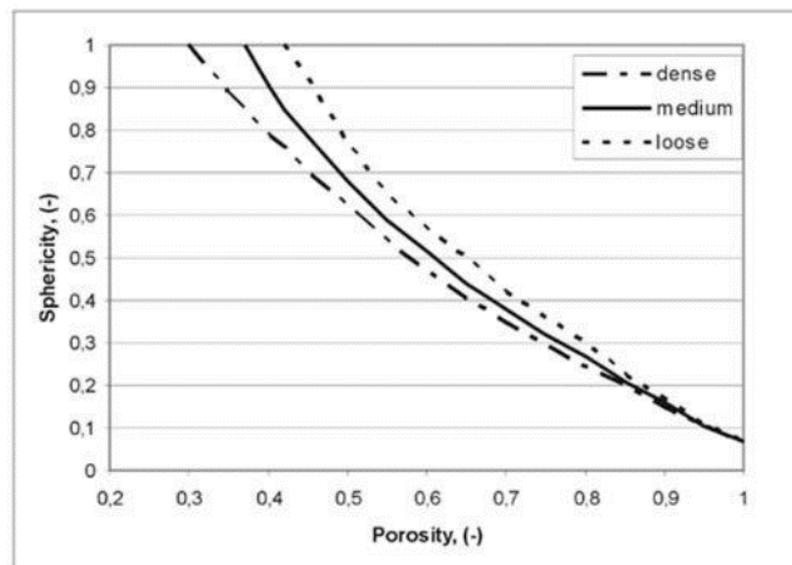
*Clasificación de partículas según esfericidad y redondez*



Nota: tomado de Shah et al. (2020)

**Figura 24**

*Relación entre esfericidad, porosidad y compactación del lecho empaquetado*



Nota: Tomado de Siwec (2007)



La esfericidad de las partículas se estimó en referencia a la Figura 23, que clasifica las partículas por esfericidad y redondez. Posteriormente, utilizando la Figura 24, donde se muestra la relación entre esfericidad, porosidad y la compactación del lecho de partículas, en base a estas figuras se estimó la porosidad del lecho de las muestras. Este enfoque permitió caracterizar de forma aproximada las propiedades geométricas de las partículas de biomasa combinando análisis visual y referencias gráficas.

### **3.3.4. Caracterización química de la biomasa**

Determinar la composición química de la biomasa fue fundamental para estimar diferentes propiedades químicas de la biomasa y los cuales fueron útiles para diseñar el gasificador. Las muestras representativas fueron enviadas a un laboratorio externo especializado de la Universidad Nacional Agraria La Molina (laboratorio de energías renovables) donde determinaron el análisis elemental y análisis proximal de la biomasa.

#### **3.3.4.1. Análisis proximal**

Según el reporte de laboratorio que se muestra en el anexo 1, la metodología aplicada para este análisis fue siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D7582 se titula "Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis" traducida al español " Métodos de prueba estándar para el análisis proximal de carbón y coque mediante análisis termogravimétrico macro". Esta norma permitió determinar los componentes como el contenido de la humedad, la materia volátil, las cenizas y el carbono fijo, que fueron muy importantes para desarrollar los diferentes análisis energéticos de la



biomasa en el proceso de la gasificación. Los resultados de este ensayo se presentan en la sección de Resultados, cabe mencionar que el análisis proximal de acuerdo al informe de laboratorio se realizó en base recibida (ar).

#### **3.3.4.2. Análisis elemental**

Según el informe de laboratorio mostrado en el anexo 2, la metodología aplicada fue siguiendo las directrices de la norma ASTM D5373 titulada “Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke” traducida al español “Métodos de prueba estándar para la determinación instrumental de carbono, hidrógeno y nitrógeno en muestras de laboratorio de carbón y coque”, esta norma permitió determinar el contenido en porcentaje de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en la muestra de biomasa. También cabe mencionar que los porcentajes que figura en el reporte de laboratorio fueron determinados en base seca (db).

Como se mencionó que los porcentajes de los contenidos de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en la muestra de biomasa en el reporte de laboratorio están expresados en base seca (db), estos deben expresarse en otras bases como en base seca libre de cenizas (daf) y también en base recibida (ar), esto para facilitar los diferentes cálculos involucrados en la presente investigación, como terminación de la formula molecular empírica, poderes caloríficos, entre otros. Para calcular estos se proporciona las siguientes formulas:



- Fórmula para los porcentajes del análisis elemental en base seca y libre de cenizas (daf):

$$E_{daf} = \frac{E_{db}}{C_{db} + H_{db} + O_{db} + N_{db} + S_{db}} \cdot 100\% \quad (27)$$

Donde:

- $E_{daf}$ : Porcentaje de elemento en base seca y libre de cenizas.
  - $E_{db}$ : Porcentaje de elemento en base seca.
  - $C_{db}$ ,  $H_{db}$ ,  $O_{db}$ ,  $N_{db}$  y  $S_{db}$ : Porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en base seca.
- Fórmula para los porcentajes del análisis elemental en base recibida (ar):

$$E = E_{daf} \cdot (1 - Ash - MC) \cdot 100\% \quad (28)$$

Donde:

- $E$ : Porcentaje de elemento en base recibida.
- $E_{daf}$ : Porcentaje de elemento en base seca y libre de cenizas.
- $Ash$ : Porcentaje de cenizas en base recibida.
- $MC$ : Porcentaje de humedad en base recibida.

Los resultados del análisis elemental se muestran en la sección de Resultados.

### 3.3.4.3. Fórmula molecular empírica de las biomásas

La fórmula molecular empírica ( $CH_rO_xN_yS_z$ ) se determina en base a los resultados del análisis elemental en base seca y libre de cenizas (base daf) Tabla 10 obtenidas a partir del análisis de laboratorio y

utilizando las relaciones dadas en la ecuación ( 5 ) (tratado en el capítulo II).

#### 3.3.4.4. Poder calorífico superior de las biomásas

El poder calorífico superior HHV se calcula mediante la ecuación empírica de Channiwala y Parikh previamente mostrado en la ecuación ( 3 ), a partir de los datos del análisis elemental expresado en base seca mostradas en la Tabla 9:

$$HHV_{bm,db} = 3.49.1C + 1178.3H + 100.5S - 103.4O - 15.1N - 21.1Ash \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

Además, el poder calorífico superior puede ser expresado en otras bases de biomasa como: en base tal como es recibido (base ar) y base seca libre de cenizas (base daf):

- Poder calorífico superior en “base recibida” (base ar) se determina con la ecuación ( 29 ):

$$HHV_{bm,ar} = HHV_{bm,db} (1 - MC) \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (29)$$

Donde:

- $HHV_{bm,ar}$ : poder calorífico superior de la biomasa en base “ar” en kJ/kg.
- $HHV_{bm,db}$ : poder calorífico superior en base seca “db” en kJ/kg.
- $MC$  es el contenido de humedad de la biomasa expresado en base “ar”.

- Poder calorífico superior en base “seca y libre de cenizas” (base *daf*) se calcula mediante la ecuación ( 30 ):

$$HHV_{bm,daf} = HHV_{bm,db} \left( \frac{1 - MC}{1 - MC - Ash} \right) \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (30)$$

Donde:

- $HHV_{bm,daf}$ : poder calorífico superior de la biomasa en base “*daf*” en kJ/kg.
- $HHV_{bm,db}$ : poder calorífico superior en base seca “*db*” en kJ/kg.
- $MC$ : contenido de humedad de la biomasa expresado en base “*ar*”.
- $Ash$ : contenido de cenizas en la biomasa expresado en base “*ar*”.

### 3.3.4.5. Poder calorífico inferior de las biomásas

El poder calorífico inferior en base “tal como es recibido” (base *ar*) se calcula mediante la ecuación ( 4 ):

$$LHV_{bm,ar} = HHV_{bm,ar} - h_{fg} \left( \frac{9H}{100} + \frac{MC}{100} \right) \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

Por otro lado, el poder calorífico inferior puede ser expresado en otras bases de biomasa como: en base seca (base *db*) y base seca libre de cenizas (base *daf*):

- Poder calorífico inferior en “base seca” (base *db*) se determina con la ecuación ( 31 ):

$$LHV_{bm,db} = HHV_{bm,db} - h_{fg} \left( \frac{9H_{db}}{100} \right) \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (31)$$

Donde:



- $LHV_{bm,db}$ : poder calorífico inferior de la biomasa en base “db” en kJ/kg.
- $HHV_{bm,ar}$ : poder calorífico superior de la biomasa en base “ar” en kJ/kg.
- $h_{fg}$ : entalpia de vaporización cuando la temperatura de referencia es de 100°C  $h_{fg} = 2260 \text{ kJ/kg}$ .
- $H_{db}$ : contenido de hidrogeno en la biomasa expresado en base seca “db”.
- Poder calorífico inferior en base “seca y libre de cenizas” (base daf) se calcula mediante la ecuación ( 32 ):

$$LHV_{bm,daf} = HHV_{bm,daf} - h_{fg} \left( \frac{9H_{daf}}{100} \right) \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (32)$$

Donde:

- $LHV_{bm,daf}$ : poder calorífico inferior en base seca libre de cenizas (base daf) en kJ/kg.
- $HHV_{bm,daf}$ : poder calorífico superior de la biomasa en base “daf” en kJ/kg.
- $h_{fg}$ : entalpia de vaporización cuando la temperatura de referencia es de 100°C  $h_{fg} = 2260 \text{ kJ/kg}$ .
- $H_{daf}$ : contenido de hidrogeno en la biomasa expresado en base seca y libre de cenizas “daf”.

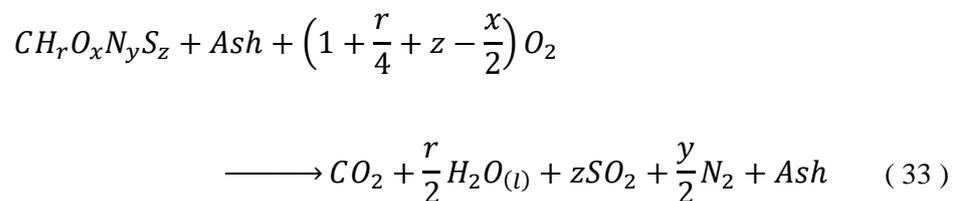
#### 3.3.4.6. Entalpia de formación de la biomasa

La entalpia de formación también conocido como calor de formación de reacción, es el calor liberado cuando se forma 1 mol de



sustancia pura en estado estándar (25°C y 1 bar) a partir de sus elementos básicos constitutivos en su estado estándar. Por ejemplo, el hidrógeno y el oxígeno son estables en su forma elemental en el estado estándar, por lo que su entalpía de formación es cero. Sin embargo, se libera una cantidad de calor de 241.5 kJ por mol de H<sub>2</sub>O cuando se combinan para formar vapor de agua.

Aunque la biomasa no es una sustancia pura y no tiene un valor estándar para la entalpía de formación, pero es posible calcular la entalpía de formación de la biomasa seca en base a la fórmula molecular empírica y el poder calorífico superior de la biomasa (*HHV*), simulando una reacción de combustión completa como se expresa en la ecuación balanceada ( 33 ) (Peduzzi et al., 2016). Se supone que 1 mol de biomasa seca más cenizas ( $CH_rO_xN_yS_z + Ash$  ) y el oxígeno ingresa a la cámara de combustión en el estado estándar (25°C y 1 bar) y los productos de la combustión salen de la cámara de combustión en el estado estándar lo que implica que el agua en este estado está en la fase líquida por lo que el calor liberado de esta reacción representa el poder calorífico superior.



Se sabe que la *entalpía de reacción* está definida mediante la ecuación ( 34 ):

$$\Delta H_T^0 = \sum_i v_i \Delta H_{f,i}^0 \quad (34)$$

donde  $v_i$  es el coeficiente estequiométrico de la sustancia  $i$  en la reacción y  $\Delta H_{f,i}^0$  es la entalpía de formación de sustancia  $i$  en el estado estándar (1 bar) a una temperatura  $T$  (Levine, 2014).

Como la temperatura de los reactivos y productos están a 25°C ( $T=298.15\text{K}$ ) por definición se sabe que el poder calorífico superior HHV es igual al valor absoluto de la entalpía de reacción, es decir:

$$HHV = |\Delta H_T^0| = -\Delta H_T^0$$

$$\Delta H_T^0 = -HHV$$

Reemplazando en  $\Delta H_T^0$  en la ecuación ( 34 ) y desarrollando la sumatoria en base a la reacción química de combustión ( 33 ) sabiendo que las entalpias de formación es cero para las sustancias elementales resulta la ecuación ( 35 ), donde  $\Delta H_{f,bm}^0$  es la entalpía de formación de la biomasa.

$$\Delta H_{f,bm}^0 = \Delta H_{f,CO_2}^0 + \frac{r}{2} \times \Delta H_{f,H_2O(l)}^0 + z \times \Delta H_{f,SO_2}^0 + HHV \quad (35)$$

### **3.4. PRIMERA ETAPA: CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL**

Debido a falta de información en la literatura sobre el índice de gasificación específica (*IGE*) de las biomásas de bosta de vaca y alpaca, impulsó la necesidad de realizar un modelo experimental que permitiera obtener este índice y evaluar el desempeño del gasificador bajo condiciones controladas.

En esta sección se describe el diseño y la construcción del prototipo experimental. Se ha seleccionado el gasificador tipo TLUD (Top-Lit Updraft) por sus ventajas en la simplicidad de operación y facilidad de construcción, lo que lo hace ideal para

implementaciones en zonas rurales a un bajo costo. Además, según la literatura, este tipo de gasificador es conocido por producir menores cantidades de alquitrán en comparación con otros modelos, lo cual contribuye a una operación más limpia y eficiente.

#### **3.4.1. Objetivos en la primera etapa**

El objetivo principal de esta primera etapa fue identificar y analizar los parámetros importantes para optimizar el diseño del gasificador. En esta etapa se determinaron los siguientes parámetros:

- Índice de gasificación específica (IGE).
- Potencia máxima consumida por el ventilador.
- Temperatura máxima alcanzada en el reactor.

#### **3.4.2. Diseño del prototipo experimental**

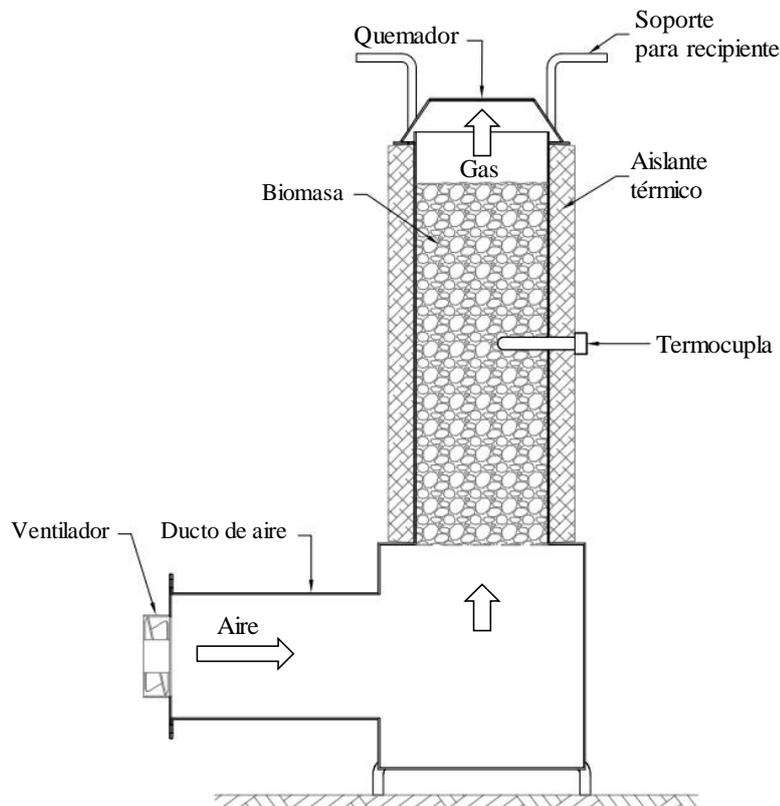
El diseño se basó en los modelos descritos en la literatura por Tryner et al. (2014), De La Hoz et al. (2017) y Belonio (2005), los cuales desarrollaron estudios sobre estufas gasificadora de biomasa de tipo TLUD. En estos estudios se detallan esquemas y planos de construcción. Belonio (2005) desarrollo un manual de para la construcción de estufas gasificadoras de cascarilla de arroz en el cual se detalla los planos de construcción, se tomó como punto de partida este diseño, los planos del prototipo experimental se muestra en el plano del ANEXO 4. En la Figura 25 se muestra la sección transversal de este modelo experimental y sus partes principales.

Como se puede apreciar en la Figura 25, el modelo experimental consta de un reactor cilíndrico de diámetro 127mm y altura de 400mm (volumen 5.093L) fabricado de acero ASTM A1008 Gr. CS tipo B de espesor de 1.5mm, se utilizó

un ventilador de CPU estándar con dimensiones 80x80x25mm de corriente continua de 12V y 0.19A como se aprecia en la Figura 26, esto para impulsar el aire primario necesaria para la gasificación. El reactor se ha recubierto con aislante térmico de fibra cerámica de alta temperatura de densidad 128kg/m<sup>3</sup> con 25mm de espesor. Para monitorear la temperatura en la parte central del reactor, se instaló una termocupla tipo K de alta temperatura con una conexión tipo rosca NTP (ver Figura 30).

### Figura 25

*Partes del modelo experimental de la cocina gasificadora*



*Nota.* En la figura se muestra las partes principales del modelo experimental de la cocina gasificadora de biomasa tipo TLUD, los planos se detallan en el ANEXO 4.

### Figura 26

*Ventilador utilizado para el prototipo experimental*



Nota: en la figura se aprecia el ventilador utilizado para el prototipo experimental de dimensiones 80x80x25mm de 12VDC marca BOXER modelo YM1208PTS1 de 7 Aspas

### Figura 27

*Fotografías del proceso de construcción del modelo experimental*



a



b



c



d

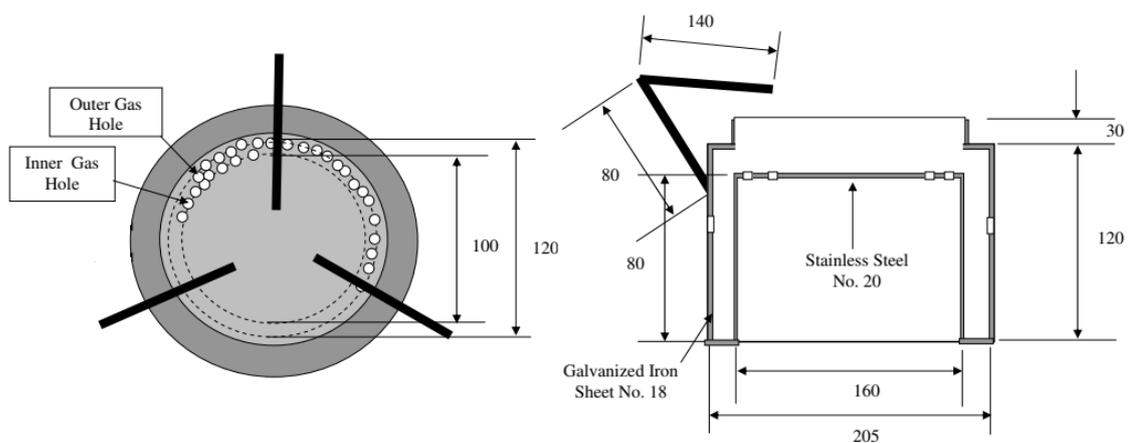
Nota: en las figuras se muestran el proceso de construcción del modelo experimental. Donde; a: construcción del inyector de aire y cilindro del reactor. b: ensamble de la estructura interna de la cocina. c: colocación de aislante térmico. d: cocina gasificadora.

### 3.4.3. Construcción del prototipo experimental

La construcción se realizó de acuerdo a los planos diseñados del modelo experimental (ver ANEXO 4). El proceso de construcción se muestra en la Figura 27: la figura “a” muestra la construcción de la base de la cocina y la plancha rolada en forma cilíndrica para el reactor, la figura “b” muestra el prototipo terminado en términos de soldeo, en la figura “c” se aprecia el recubrimiento de aislante térmico con fibra cerámica al reactor y en la figura “d” se presenta el prototipo terminado del modelo experimental.

### Figura 28

*Diseño de Belonio (2005) para el gas de cascarilla de arroz.*



Nota: la figura muestra los detalles del quemador diseñado por Belonio (2005), para quemar el gas de síntesis de la cascarilla de arroz.

### 3.4.4. Quemadores de gas de síntesis

Dado que el reactor del gasificador tipo TLUD opera a presiones atmosféricas, por el hecho de que está expuesto a la atmosfera por medio de los orificios del quemador, y, por ende, el gas se genera a presión atmosférica. Por esta característica se ha decidido utilizar el *quemador de difusión*, que se adapta

mejor a bajas presiones del gas de síntesis y que también destaca por su simplicidad de construcción, lo cual lo hace ideal para aplicaciones en zonas rurales o contextos de recursos limitados.

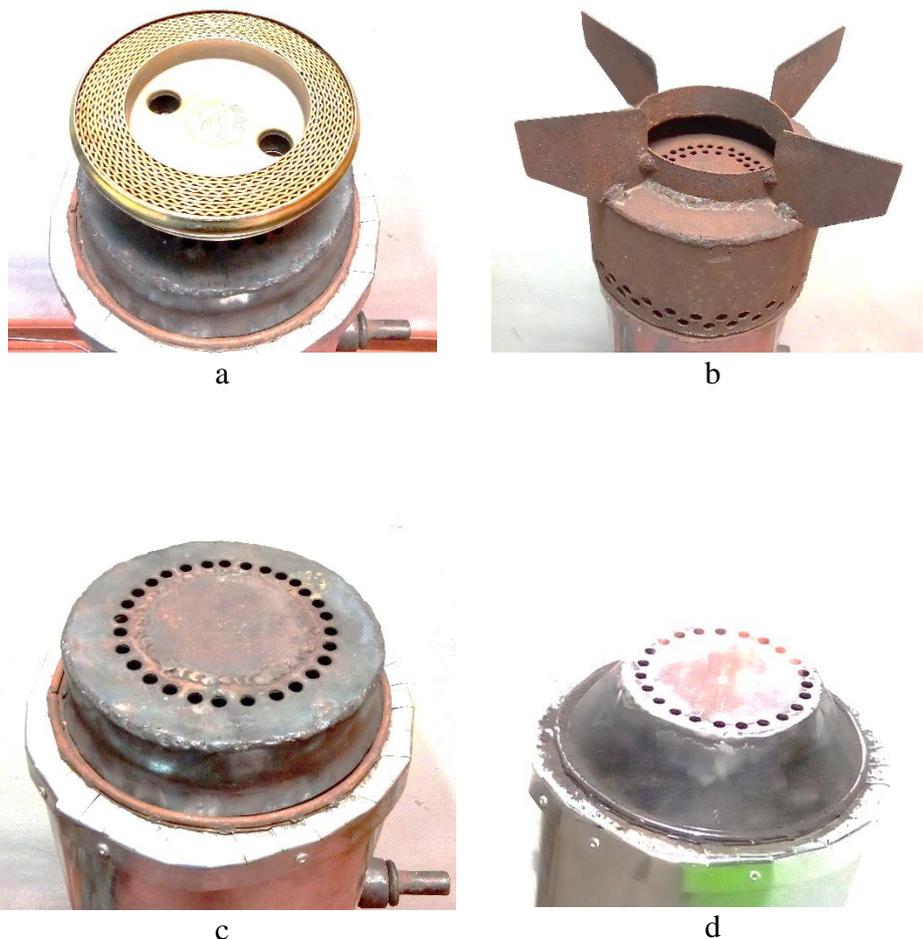
A lo largo de la investigación se fabricaron y evaluaron cuatro prototipos de quemadores de difusión los cuales se muestran en la Figura 29, cuyos planos se detallan en el ANEXO 4. A continuación se describe cada uno de estos:

- *Quemador “a”*: Se trata de un quemador comercial de una cocina convencional de GLP, que sirvió como punto de partida para la búsqueda de otros tipos de quemadores que se adaptan mejor para la combustión del gas de síntesis.
- *Quemador “b”*: Ilustra el segundo prototipo evaluado, se fabricó en base a las medidas establecidas por Belonio (2005) como se puede apreciar en la Figura 28. Como se puede ver consiste de un quemador con cobertura cilíndrica, el aire secundario ingresa por los agujeros laterales de la cobertura cilíndrica, mientras el gas combustible ingresa al quemador por los agujeros de la parte superior del reactor, la mezcla de aire combustible y la combustión, sucede justo por encima de los agujeros de ingreso del gas combustible al quemador.
- *Quemador “c”*: Este quemador se desarrolló a raíz de la evaluación del quemador “b” (los detalles se describen en la sección de resultados), es un quemador cilíndrico recto libre sin cobertura externa ya que permite que el aire se mezcle sin obstáculos con el gas, ya que permite que el aire se mezcle de forma libre y sin obstáculos con el gas, favoreciendo una combustión más eficiente.

- *Quemador “d”*: Es un quemador en forma cónica, similar al quemador “c”. Según Lagarza Cortes et al. (2009), los mezcladores con geometrías cónicas presentan ventajas importantes sobre los cilíndricos en términos de arrastre de aire y homogeneidad de la mezcla. Las secciones convergentes aumentan la cantidad de aire entrante debido a la mayor área de contacto entre los vórtices y la atmósfera, lo que mejora las características de la premezcla y la eficiencia de la combustión.

### Figura 29

#### *Diseño Preliminar de Prototipos de Quemadores*



Nota: las figuras muestran los prototipos de quemadores para la evaluación de su desempeño bajo la inspección visual directa del color de la llama. Donde, a: quemador comercial de GLP. b: quemador basado en las medidas de Belonio, 2005. c: quemador recto libre. d: quemador cónico.

### 3.4.5. Pruebas del prototipo experimental

Para determinar los parámetros como el índice de gasificación específica, la potencia consumida por el ventilador y el perfil de temperatura dentro del reactor se implementó un laboratorio a pequeña escala como se puede apreciar en la Figura 30.

**Figura 30**

*Implementos para la prueba del modelo experimental*



Nota: en la figura se muestra los implementos para evaluar el desempeño del prototipo experimental. Donde: (1) es el lector de temperatura (Pirómetro TC4-S) conectado a la termocupla tipo K (5) mediante un cable de extensión tipo K, (2) es la fuente de alimentación del ventilador, (3) recipiente u olla para hervir agua, (4) quemador de gas de síntesis y (6) es el reactor experimental.

#### 3.4.5.1. Determinación del índice de gasificación específica

Se realizaron tres pruebas por cada tipo de biomasa, previamente se pesó en una balanza la cantidad de biomasa necesaria para llenar completamente el reactor, luego se procedió con el encendido de la



biomasa utilizando 30ml de alcohol etílico para iniciar el fuego, esto con el fin de proporcionar calor necesario para iniciar el proceso de la gasificación.

En cada prueba, se registraron los siguientes parámetros:

- *Masa de la biomasa consumida*: Corresponde la masa que ocupa el volumen total del reactor en cada prueba.
- *Tiempo de arranque*: Es el tiempo necesario desde el encendido de la biomasa con la ayuda de alcohol hasta el inicio del proceso de gasificación.
- *Tiempo total de funcionamiento del reactor*: Representa el tiempo desde que se enciende hasta que se consuma la masa total de la biomasa.
- *Tiempo efectivo de consumo de biomasa*: Corresponde al intervalo de tiempo en el que la biomasa es consumida activamente durante el proceso de gasificación.
- *Índice de Gasificación Específica (IGE)*: este parámetro se calculó mediante la ecuación ( 36 ):

$$IGE = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \left( \frac{kg}{m^2 \cdot h} \right) \quad (36)$$

Los resultados de estas variables se pueden muestran en la sección los resultados (capítulo IV “resultados y discusión”)

#### **3.4.5.2. Monitoreo de la tensión y corriente del ventilador**

Para medir la potencia consumida por el ventilador se utilizó una fuente de tensión regulable de marca UNI-T y modelo UTP-3315TFL-II

el cual tiene incorporado voltímetro y amperímetro donde se verificó el voltaje de salida y la corriente consumida, como se puede ver la llamada (2) en la Figura 30. A lo largo del tiempo de funcionamiento se registró la tensión y corriente de salida cada 30 segundos y las gráficas de estos procesos se pueden apreciar en la Figura 45, Figura 46, Figura 48 y Figura 49 que corresponden a las biomasa utilizadas, los cuales se muestran en la sección de resultados.

### **3.4.5.3. Monitoreo de la temperatura del reactor**

Se instaló un sensor de temperatura (termocupla tipo K) en la parte central del reactor como se puede ver en la Figura 30 (llamada (5)), este con el fin de monitorear la temperatura de la biomasa durante la gasificación y determinar su perfil de temperatura. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 47 y Figura 50 en la sección de resultados.

### **3.4.6. Evaluación visual de la combustión mediante el color de la llama**

Como se mencionó previamente, el gas de síntesis está compuesto mayormente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), y otros hidrocarburos ligeros. La combustión de estos gases debe ser completa para evitar la emisión de contaminantes y maximizar la eficiencia energética. Según Belonio (2005) una combustión completa y eficiente el color de la llama de este gas debe ser de color azul como se puede apreciar en la Figura 31, en esta figura se puede visualizar la combustión del gas combustible producto de la gasificación de la biomasa de cascarilla de arroz.

Para seleccionar el quemador adecuado de los prototipos mostrados en la Figura 29, se han tomado en cuenta una serie de parámetros cualitativos en base

al espectro visible del *color de la llama y humo presente* durante la combustión. Según Alfonso Serrano (2009), el color de la llama está directamente relacionado con factores como la temperatura, la relación aire-combustible y el tipo de combustible utilizado. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 32 una llama azul indica una combustión completa y eficiente, mientras que tonalidades amarillas o rojizas suelen ser señales de combustión incompleta debido a una mezcla inadecuada de aire y combustible, estos parámetros se describen a continuación:

### Figura 31

*Combustión del gas producido por la gasificación de la cascarilla de arroz*

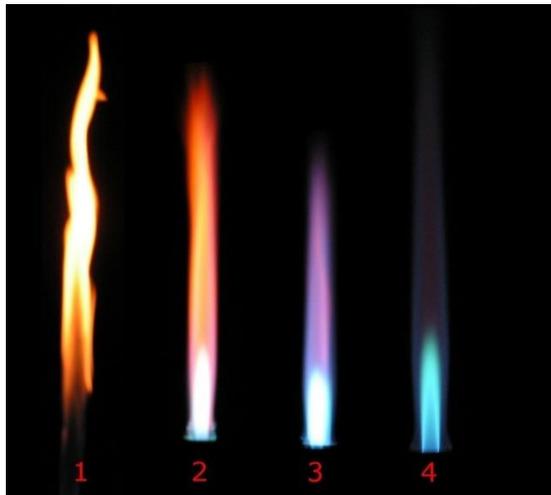


Nota: en la imagen se aprecia la combustión del gas de síntesis de la cascarilla de arroz en el quemador diseñado por Belonio mostrado en la Figura 28, el color de la llama es azulada con zonas anaranjadas lo que indica una combustión eficiente. Fuente: Tomado de Belonio (2005)

- **Llama azul:** este color indica que existe una mezcla adecuada entre el aire y el gas de síntesis. Por lo que indica que el hidrógeno y el monóxido de carbono se están quemando por completo, generando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), sin la producción de hollín.

### Figura 32

*Tipos de llama en un mechero Bunsen dependiendo del flujo de aire.*



Nota: 1. Válvula de aire cerrada. 2. Válvula medio cerrada. 3. Válvula semi-abierta. 4. Válvula abierta al máximo. Tomado de <https://guildofscientifictroubadours.com/2022/09/26/science-art-bunsen-burner-flame-types-by-arthur-jan-fijalkowski-warx/>

- **Llama amarilla/naranja:** este color indica cuando la combustión es incompleta, producto de un exceso de gas combustible o no existe una buena mezcla entre el aire y el gas. Además, esto indica que puede existir la formación de carbono elemental (hollín), que es característico la coloración amarillenta debido a la incandescencia de las partículas de carbono.
- **Llama roja:** es un indicativo de una combustión a baja temperatura o una mezcla muy deficiente en oxígeno, lo cual también es señal de ineficiencia.
- **Humo en la llama:** el humo presente es un indicativo directo de una combustión muy deficiente de oxígeno.

En base a estos parámetros cualitativos, se realizó la evaluación de los quemadores con el modelo experimental, los resultados se detallan en el capítulo IV “resultados y discusiones”

### 3.5. SEGUNDA ETAPA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO FINAL

Con los datos determinados en la primera etapa que incluyen el índice de gasificación específica (IGE), la potencia consumida por el ventilador y el perfil de temperatura, se procedió con el diseño y construcción del modelo final. En esta sección se detalla el proceso que se siguió en el diseño y construcción del modelo final de la cocina gasificadora pirolítica.

#### 3.5.1. Parámetros de diseño del gasificador tipo TLUD

El tamaño del reactor de una cocina gasificadora está directamente relacionado con la demanda de potencia en forma de calor, el tiempo de operación y la eficiencia del sistema. Estos parámetros son claves para poder estimar las dimensiones del gasificador.

- *Potencia de diseño ( $P_d$ )*: es la energía que producirá la cocina gasificadora, este valor influye en la cantidad de biomasa que será necesario utilizar y el diámetro que deberá tener el reactor. La potencia de las cocinas gasificadora TLUD comerciales según De La Hoz et al. (2017) varían entre 2 a 3.5 kW, por tanto, la potencia de diseño se toma:

$$P_d = 3.5kW$$

- *Tiempo de operación ( $t_f$ )*: es el tiempo que queremos que funcione la cocina sin necesidad de recargar la biomasa, esto influye directamente a la altura que deberá tener el reactor. Belonio (2005) consideró un tiempo de operación de 1 hora en su diseño. Por otro lado, con base en la experiencia obtenida durante las pruebas del modelo experimental, se observó que 5 litros de agua alcanzan el punto de ebullición en un promedio de 17 a 20

minutos. Por ello, establecer un tiempo de operación de 70 minutos se considera adecuado y prudente para el diseño del modelo final, permitiendo cubrir las necesidades típicas de uso sin necesidad de recargar la biomasa.

$$t_f = 70 \text{ minutos}$$

- *Eficiencia de gasificación del reactor ( $\eta_r$ )*: la eficiencia del reactor se refiere a la relación entre la energía útil generada por el reactor y la energía potencial entregada por la biomasa. Este valor fue tomado como referencia para el dimensionamiento según recomendaciones de Basu (2013).

$$\eta_r = 70\%$$

- *Relación de equivalencia ER*: la relación de equivalencia es la relación que existe entre la masa de aire real y el aire estequiométrico. Basu (2013) menciona que para una gasificación eficiente de la biomasa la relación de equivalencia debe estar entre 0.2 a 0.3. para efectos de diseño de la cocina gasificadora TLUD, se asume una ER de 1 en la etapa de arranque, donde se necesita máxima cantidad de calor para iniciar el proceso de pirólisis y la combustión parcial. Y para la etapa de operación un ER de 0.2.

### 3.5.2. Tasa de gasificación o tasa de consumo de biomasa

La tasa de consumo o tasa de gasificación de la biomasa es un parámetro clave en el dimensionamiento del reactor TLUD, ya que de este parámetro depende el diámetro, altura del reactor y se calcula con la ecuación ( 21 ):

$$\dot{m}_{bm} = \frac{P_d}{\eta_r \cdot LHV_{bm,ar}} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad ( 21 )$$

Donde:



- $\dot{m}_{bm}$ : tasa de consumo de biomasa (kg/h).
- $P_d$ : potencia de diseño en kW.
- $\eta_r$  representa la eficiencia de gasificación del reactor
- $LHV_{bm,ar}$ : poder calorífico inferior de la biomasa en kJ/kg en base ar.

### 3.5.3. Diámetro del reactor

Se refiere al tamaño del reactor en términos del diámetro de la sección transversal del cilindro donde se quema la biomasa, el diámetro está relacionado directamente con la tasa de consumo de la biomasa  $\dot{m}_{bm}$  e inversamente con la tasa de gasificación específica  $TGE$  este dato es característica del tipo de biomasa. El diámetro del reactor  $D_r$  se determina mediante la ecuación ( 37 ).

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \dot{m}_{bm}}{\pi \cdot TGE}} \quad (m) \quad (37)$$

Donde:

- $D_r$ : diámetro del reactor (m).
- $\dot{m}_{bm}$ : tasa de consumo de la biomasa (kg/h).
- $TGE$ : tasa de gasificación específica de la biomasa (kg/m<sup>2</sup>-h).

### 3.5.4. Altura del reactor

La altura del reactor se refiere a la distancia desde el extremo superior e inferior del reactor. Esto determina el tiempo de operación de la cocina y se calcula con la ecuación (38).

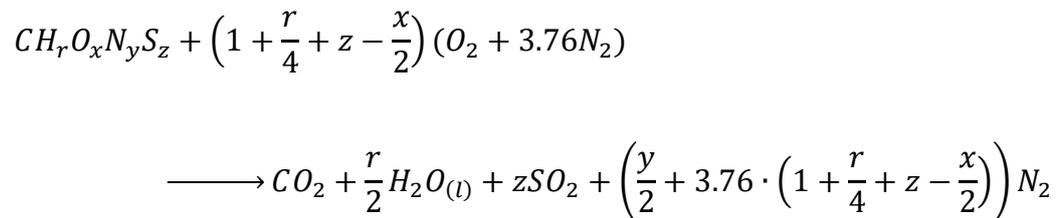
$$H_r = \frac{TGE \cdot t_f}{\rho_{bm,a}} \quad (m) \quad (38)$$

Donde:

- $H_r$ : altura del reactor (m).
- $TGE$ : tasa de gasificación específica de la biomasa ( $\text{kg/m}^2\text{-h}$ ).
- $t_f$ : tiempo de operación del reactor (h).
- $\rho_{bm,a}$ : densidad aparente de la biomasa ( $\text{kg/m}^3$ ).

### 3.5.5. Masa de aire estequiométrico

La cantidad de aire estequiométrico se determina a partir de la combustión completa de 1 mol de biomasa (en base seca y libre de cenizas), la ecuación general de la combustión completa de la biomasa está dado por la ecuación ( 33 ).



Donde:  $CH_rO_xN_yS_z$  es la fórmula molecular empírica de la biomasa en base seca y libre de cenizas (ver capítulo II).

En número de moles de aire estequiométrico  $a_{st}$  se puede calcular a partir de la reacción de combustión completa de la biomasa (ecuación ( 33 )):

$$a_{st} = 4.76 \left(1 + \frac{r}{4} + z - \frac{x}{2}\right) \left(\frac{\text{mol}}{\text{mol de biomasa (daf)}}\right) \quad (39)$$

Por lo tanto, la masa de aire estequiométrico  $m_{a,st}$ , es la cantidad mínima de aire en kg necesaria para la combustión completa de 1 kg de biomasa y se calcula con la ecuación ( 40 ).

$$m_{a,st} = \frac{a_{st} \cdot M_{aire} \cdot (1 - Ash - MC)}{M_{bm,daf}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg de biomasa}}\right) \quad (40)$$

Donde:



- $m_{a,st}$ : masa de aire estequiométrico (kg/kg de biomasa)
- $a_{st}$ : cantidad de aire estequiométrico en moles de aire por mol de biomasa en base *daf* (mol/mol de biomasa *daf*).
- $M_{aire}$ : masa molar del aire (kg/kmol).
- $M_{bm,daf}$ : masa molar de la biomasa seca y libre de cenizas (*daf*) (kg/kmol)
- *Ash* y *MC* son los contenidos en porcentaje de cenizas y humedad de la biomasa respectivamente.

### 3.5.6. Flujo volumétrico de aire

El flujo volumétrico de aire se calcula con la ecuación ( 22 ) (tratado en el capítulo II), para esto se requiere determinar la densidad del aire a las condiciones ambientales locales. Considerando que el aire se comporta como gas ideal a las condiciones ambientales locales, la densidad se calcula con la ecuación:

$$\rho_{aire} = \frac{P_{0,l} \cdot M_{aire}}{R \cdot T_{0,l}} \quad (41)$$

Donde:

- $T_{0,l}$ : temperatura ambiental local (15°C).
- $P_{0,l}$ : presión atmosférica local (65.01kPa).
- $M_{aire}$ : masa molar del aire (28.97 kg/mol).
- $R$ : constante universal de los gases ideales (8.314 kJ/kmol-K)

Por lo tanto, el flujo volumétrico del aire se puede calcular con la ecuación ( 22 ):

$$Q_{aire} = \frac{ER \cdot \dot{m}_{bm} \cdot m_{a,st}}{\rho_{aire}} \left( \frac{m^3}{hr} \right) \quad (22)$$

Donde:

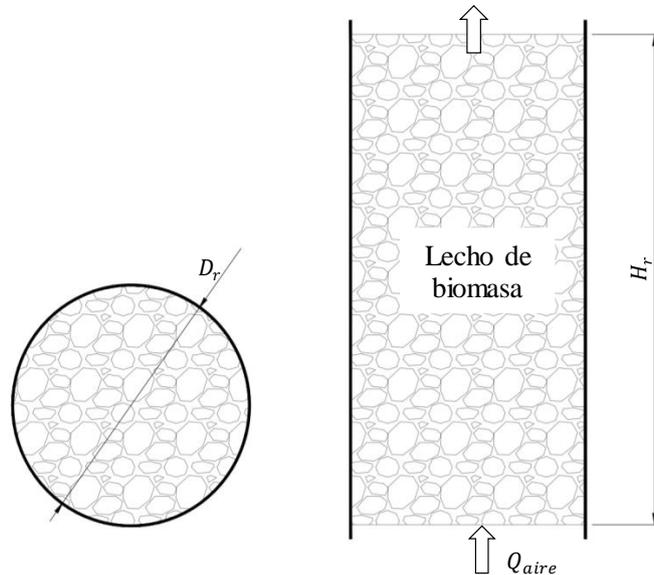
- $Q_{aire}$ : flujo volumétrico del aire ( $m^3/hr$ )
- $ER$  es la relación de equivalencia, para que ocurra la gasificación de la biomasa se considerara 1 para la fase de arranque y 0.2 para la fase de operación.
- $\dot{m}_{bm}$  es la tasa de consumo de la biomasa (kg/h).
- $m_{a,st}$  es la masa de aire estequiométrico necesario para la combustión completa de la biomasa y se calcula con la ecuación ( 40 ).
- $\rho_{aire}$  es la densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).

### 3.5.7. Caída de presión en el lecho de biomasa

Para efectos de diseño y de acuerdo de los resultados de la prueba experimental se observó que para en la fase de arranque se requiere mayor demanda de flujo de aire que en la etapa de operación normal (ver Figura 45 y Figura 48 en la sección de resultados), lo que implica que el cálculo del flujo de aire se debe determinar en la fase de arranque que es la etapa crítica para la potencia del ventilador. Por otro lado, en la etapa de arranque se requiere mayor cantidad de calor para elevar la temperatura del sistema y dar inicio al proceso de gasificación por lo que es necesario llevar a la combustión de la biomasa. En estas circunstancias se asume que la relación de equivalencia (ER) es 1, es el valor máximo del proceso de gasificación de biomasa.

**Figura 33**

*Lecho de biomasa en el reactor*



Nota: en la imagen se aprecia el lecho de biomasa en el reactor de forma cilíndrica por el cual circula el flujo de aire.

La caída de presión en el lecho de combustible (Figura 33) se estima con la ecuación de Ergun (ecuación ( 24 )):

$$\frac{\Delta P_{bm}}{H} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu \cdot u}{(\Phi \cdot d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_{aire} \cdot u^2}{\varepsilon^3 \Phi \cdot d_p}$$

Donde:

- $\Delta P_{bm}$ : pérdida de presión manométrica, debida al rozamiento en el lecho de biomasa, (Pa).
- $H$ : altura del lecho de biomasa (m).
- $\varepsilon$ : porosidad del lecho o fracción volumétrica de huecos del lecho de biomasa.
- $\mu$ : viscosidad dinámica del fluido (kg/m-s)

- $u$ : velocidad superficial del fluido (aire), determinada a la sección transversal del lecho (m/s)
- $\Phi$ : factor de esfericidad de la partícula de biomasa
- $d_p$ : diámetro medio de la partícula de biomasa (m).
- $\rho$ : densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).

**Tabla 2**

*Propiedades del aire a una presión de 65.01kPa y temperaturas de 15°C*

Propiedad	
Viscosidad dinámica (kg/m·s)	1.802 · 10 <sup>-5</sup>
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	0.786

*Nota.* tomado de Cengel & Boles (2015)

La velocidad superficial del aire en el lecho de biomasa se calcula con la ecuación ( 42 ):

$$u = \frac{Q_{aire}}{\pi \cdot \frac{D_r^2}{4}} \quad (42)$$

Donde:

- $u$ : velocidad superficial del fluido (aire), determinada a la sección transversal del lecho (m/s)
- $Q_{aire}$ : flujo volumétrico del aire (m<sup>3</sup>/s)
- $D_r$ : diámetro del reactor (m).

### 3.5.8. Potencia del ventilador

La potencia requerida por un ventilador para impulsar aire a través del sistema puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$P_v = \frac{Q_{aire} \Delta P_{bm}}{\eta_v} \quad (43)$$

Donde:

- $P_v$ : Potencia demandada por el ventilador (W)
- $Q_{aire}$ : Caudal volumétrico de aire necesario ( $m^3/s$ )
- $\Delta P_{bm}$ : Pérdida de presión en el lecho empaquetado o sistema de flujo (Pa)
- $\eta_v$ : Eficiencia del ventilador, que representa la proporción de la energía eléctrica convertida en energía de movimiento de aire ( $\eta = 0.6$ ).

### 3.5.9. Diseño del quemador módelo final

De acuerdo a los resultados como se puede apreciar en la sección de resultados, obtenidos de la evaluación experimental de los quemadores se ha decidido escoger el modelo “c” quemador de difusión tipo cónico, debido a que mostro una combustión más limpia. El plano final de este quemador se puede ver en el anexo 5.

### 3.5.10. Elección de materiales para la construcción de la cocina.

La elección de los materiales para una cocina gasificadora tipo TLUD se basa en los siguientes criterios:

- **Resistencia a altas temperaturas:** Como se observó en la primera etapa experimental, el reactor alcanzo temperaturas de alrededor de  $600^\circ C$  en la zona de gasificación (ver Figura 47), esto implica que el material del reactor debe ser capaz de soportar esos niveles de temperatura. Por lo tanto, se recomienda un material con alta resistencia térmica, como el acero inoxidable, acero al carbono o de material refractario.



- **Resistencia a la corrosión:** de acuerdo al análisis proximal las biomásas tienen contenido de humedad inherente y sumado a este el vapor formado producto de la gasificación y combustión y las altas temperaturas de operación de la cocina gasificadora esto implica utilizar materiales resistentes a la corrosión. Por lo tanto, es recomendable usar materiales como el acero inoxidable o materiales refractarios.
- **Conductividad térmica:** la conductividad térmica influye directamente en la temperatura de gasificación, a mayor temperatura la gasificación tiende a ser más eficiente, lo que implica que el reactor debe ser lo más próximo a un sistema adiabático. Por lo que debe tener una cobertura de aislamiento térmico con un material resistente a altas temperaturas como la fibra cerámica cuya temperatura de operación normal es de 1200°C.
- **Disponibilidad y costo:** La elección del material también debe considerar la disponibilidad en el mercado local y el costo.
- **Compatibilidad con la biomasa utilizada:** el factor importante a considerar en este punto es el contenido de azufre inherente de la biomasa como se puede ver en la tabla 11. El azufre contenido en la biomasa se transforma en sulfuro  $H_2S$  como producto de la gasificación (ver ecuación ( 8 )) pero en una cantidad mínima que puede ser tolerado por el acero inoxidable (Cedinox, s.f.). Por lo tanto, es recomendable usar acero inoxidable para construir el reactor.
- **Facilidad de fabricación y soldadura:** la cocina gasificadora TLUD se ha elegido por la simplicidad de fabricación, lo que implica bajo costo de construcción y por los criterios ya descritos es recomendable construir la cocina completamente de acero inoxidable de grado 304L o solo el reactor



de material acero inoxidable y el resto de acero al carbono para reducir más el costo del material.

### 3.6. PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA AL PROTOTIPO FINAL

La prueba de ebullición de agua (WBT “Water Boiling Test”) es un método estandarizado para evaluar la eficiencia térmica ( $\eta_T$ ) de las estufas o cocinas que utilizan biomasa como fuente de combustible, la eficiencia térmica se evalúa en función a cantidad de energía que es transferido al agua durante la operación de la estufa. Este método consta de tres fases: *fase arranque en frío*, es cuando la estufa o cocina es encendido en frío es decir cuando la estufa se encuentra a temperatura ambiente hasta que el agua (en la olla) se calienta hasta alcanzar el punto de ebullición.

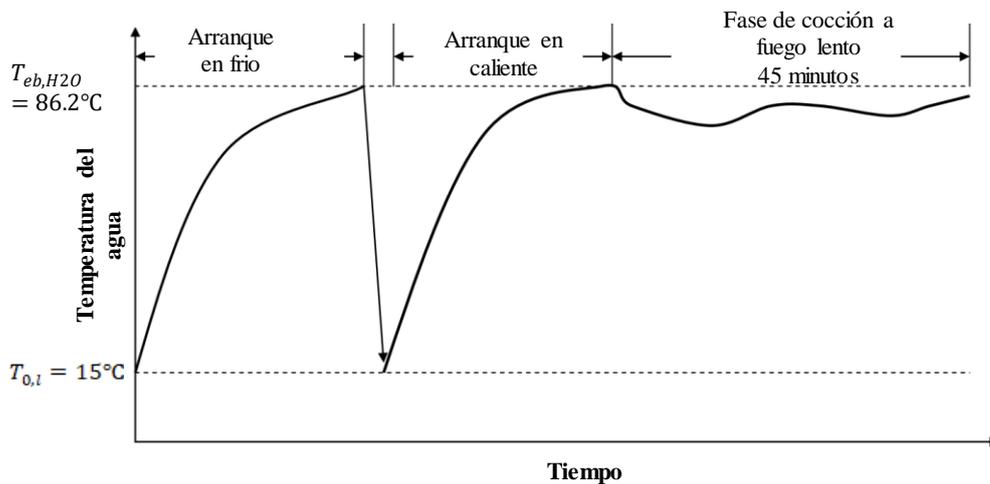
*Fase arranque en caliente*, con la estufa aún caliente se repite el proceso de la primera fase, inmediatamente después de la fase arranque en frío. Finalmente, la *Fase de cocción a fuego lento*, esta fase es la prolongación en tiempo de la fase de arranque en caliente es decir se inicia desde que el agua empezó a hervir en la segunda fase, extendiéndose por un periodo de 45 minutos (“The Water Boiling Test: Version 4.2.3,” 2014).

En este estudio, se utilizará la prueba de ebullición de agua para determinar la eficiencia térmica de la cocina gasificadora pirolítica TLUD, la cual opera por lotes de biomasa. Para este tipo de cocinas de biomasa que operan por lotes, se aplicará una versión modificada de la prueba de ebullición de agua, basada en el Protocolo de Pruebas de Rendimiento y Emisiones (EPTP) (DeFoort et al., 2010). Según como establece en el Anexo 2, en el cual se omite la *fase de arranque en caliente* debido a la naturaleza de operación por lotes. Se utilizó únicamente las fases de arranque en frío y cocción a fuego lento, manteniendo el agua en ebullición (86.2°C) hasta que se consuma todo el

combustible. De esta manera, se podrá calcular una *eficiencia térmica promedio* basada en todo el ciclo, que reflejará una visión más realista del rendimiento de la cocina.

### Figura 34

*Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición de agua*



Nota: en la figura se muestra la variación de temperatura del agua durante las fases de la prueba de ebullición de agua: donde;  $T_{eb,H2O}$  temperatura de ebullición local y  $T_{0,i}$  temperatura del ambiente.  
Fuente: adaptado de “The Water Boiling Test: Version 4.2.3,” 2014

### Figura 35

*Implementos para la prueba de ebullición de agua del modelo experimental*



Nota. 1: Medidor de monóxido de carbono. 2: Lector de temperatura. 3: Termocupla tipo k. 4: Recipiente de agua. 5: Cocina modelo final.

El método de la Prueba de Ebullición de Agua requiere realizar al menos tres pruebas para asegurar la consistencia y confiabilidad de los resultados. Esto permite promediar los datos y reducir la variabilidad de factores externos.

### **3.6.1. Equipos e instrumentos**

En la Figura 35, se muestra un laboratorio a pequeña escala implementado para realizar las pruebas de ebullición de agua, donde se puede observar los diferentes equipos e instrumentos utilizados, los cuales se describen a continuación:

- Cocina gasificadora de biomasa
- Sonda de termopar: Termocupla tipo K
- Balanza de precisión: Para medir la masa de biomasa antes y después de la prueba, con precisión de  $\pm 1$  g.
- Olla de acero o aluminio con tapa: Capacidad de 4 a 6 litros, utilizada para contener el agua durante la prueba de eficiencia térmica.
- Termómetro: Para medir la temperatura inicial y final del agua, con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .
- Cronómetro: Para registrar los tiempos de operación.

### **3.6.2. Preparación:**

- Biomasa: Registre el tipo de combustible, las dimensiones promedio, el contenido de humedad, el poder calorífico inferior y el contenido de humedad.
- Gasificador: asegurar que la estufa esté limpia sin residuos de biomasa y libre de humedad.



- Agua: El volumen de agua de prueba puede variar entre 4 y 6 litros aproximadamente. La temperatura inicial del agua utilizada debe estar entre 4°C y 30°C.
- Soporte para termopar: Durante la prueba, el termopar se colocará de manera que la punta esté aproximadamente a 5 cm del fondo de la olla.
- Recipiente u olla: la olla debe ser de capacidad de 6 litros, y registrar su peso.

### 3.6.3. Mediciones y cálculos iniciales

- Masa de la cocina gasificadora vacía ( $m_{cocina}$ )
- Masa de la cocina gasificadora lleno de combustible ( $m_{cocina,biomasa}$ )
- Cálculo de masa de combustible antes de la prueba ( $m_{bm}$ ):

$$m_{bm} = m_{cocina,biomasa} - m_{cocina}$$

- Masa del recipiente vacía (olla):  $m_r$
- Masa del recipiente vacía con agua:  $m_{r+H_2O}$
- Cálculo de la masa del agua antes de la prueba ( $m_{H_2O,i}$ ):

$$m_{H_2O,i} = m_{r+H_2O} - m_r$$

- Temperatura inicial del agua ( $T_i$ ).
- Temperatura ambiental ( $T_{0,l}$ )

### 3.6.4. Procedimiento experimental, variables medidas

#### 3.6.4.1. Fase de arranque en frío

- Encender el gasificador con la ayuda de un combustible iniciador de fuego (alcohol 30ml) y esperar que se consuma este y se estabilice el fuego.



- Coloca el recipiente con agua en la cocina y dar inicio al cronometraje.
- Registre el tiempo total ( $t_1$ ), que toma el agua en alcanzar el punto de ebullición ( $T_{eb,H_2O}$ ), registrando el tiempo desde el inicio hasta el punto de ebullición.
- Retira el recipiente del fuego y mide la masa del recipiente con agua después de hervir ( $m_{r+H_2O,1}$ ) en la balanza y vuelve a colocar el recipiente sobre la cocina y dar paso a la Fase de Cocción a Fuego Lento.
- Calcule la masa del agua después de hervir ( $m_{H_2O,1}$ ) por diferencia ( $m_{H_2O,1} = m_{r+H_2O,1} - m_r$ ).
- Determine la masa del agua evaporada al finalizar la fase de arranque en frío ( $m_{H_2O,evap,1}$ ) por diferencia ( $m_{H_2O,evap,1} = m_{H_2O,1} - m_{H_2O,i}$ ).

#### 3.6.4.2. Fase de cocción a fuego lento

- Después de volver a colocar el recipiente sobre la cocina (en la Fase de Arranque en Frío), dejar que el agua permanezca en ebullición durante un tiempo determinado hasta que se consuma todo el combustible en el gasificador.
- Detener el cronometro y registrar el tiempo total del ensayo ( $t_T$ ), esto cuanto se haya consumido todo el combustible.
- Pesar el recipiente con agua al finalizar la prueba ( $m_{r+H_2Of}$ ).
- Pesar la cocina gasificadora al finalizar el ensayo, esto incluye las masas de las cenizas y el carbón residual: ( $m_{cocina,cenizas,carbon}$ ).



- Determinar la masa de cenizas y carbón residual al finalizar la prueba ( $m_{Ash+Cr}$ ) determinado por diferencia ( $m_{Ash+Cr} = m_{cocina,cenizas,carbon} - m_{cocina}$ ).
- Calcular la masa de agua al finalizar la prueba ( $m_{H2O,f}$ ) por diferencia ( $m_{H2O,f} = m_{r+H2Of} - m_r$ ).

### 3.6.5. Variables calculadas

- Masa total de evaporación de agua durante la prueba ( $m_{H2O,evap}$ ), se calcula por diferencia entre la masa final y masa inicial del agua:  
( $m_{H2O,evap} = m_{H2O,i} - m_{H2O,f}$ ).
- Cambio de temperatura del agua hasta el punto de ebullición  $\Delta T_{H2O}$ :

$$\Delta T_{H2O} = T_{eb,H2O} - T_i$$

- Cambio de temperatura de la humedad de la biomasa ( $\Delta T_{H2O,bm}$ ):

$$\Delta T_{H2O,bm} = T_{eb,H2O} - T_{0,l}$$

- Masa de carbón residual ( $m_{Cr}$ ): esta variable se calcula de la masa final de la biomasa que queda al finalizar la prueba, es decir de la masa de cenizas y carbón que queda al terminar la gasificación.

$$m_{Cs} = m_{Ash+Cs} - m_{bm} \cdot Ash$$

Donde,  $m_{Ash+Cr}$  masa de cenizas y carbono residual al finalizar la prueba y  $Ash$  es el porcentaje de cenizas contenido en la biomasa.

### 3.6.6. Balance de Energía

#### 3.6.6.1. Energía transferida al agua

Representa la cantidad total de calor que es aportado al agua por la cocina gasificadora. Esta energía incluye tanto el calor necesario para elevar la temperatura del agua hasta su punto de ebullición como el calor adicional requerido para vaporizar una fracción de esa agua. Se determina con la ecuación:

$$E_{H_2O} = c_{p,H_2O}m_{H_2O,i}\Delta T_{H_2O} + h_{v,H_2O}m_{H_2O,evap} \quad (44)$$

Donde:

- $E_{H_2O}$ : Energía transferida al agua (J).
- $c_{p,H_2O}$ , es el calor específico del agua (4.186 J/g-K).
- $m_{H_2O,i}$ , es la masa de agua hervida en el recipiente (g).
- $\Delta T_{H_2O}$ , es el cambio de temperatura entre el inicio y final de la de la prueba (K).
- $h_{v,H_2O}$ , es la entalpia de vaporización del agua (2260 J/g).
- $m_{H_2O,evap}$ , es la masa de agua evaporada en el recipiente durante la prueba (g).

#### 3.6.6.2. Energía contenida en la biomasa

La energía total disponible en el combustible de biomasa durante la prueba se puede calcular mediante la ecuación:

$$E_{bm} = m_{bm}(1 - MC)LHV_{bm,db} - m_{bm}MC(c_{p,H_2O}\Delta T_{H_2O,bm} + h_{v,H_2O}) \quad (45)$$

Donde:



- $E_{bm}$ : energía contenida en la biomasa (J)
- $m_{bm}$ : masa de biomasa consumido durante la prueba (g).
- $MC$ : porcentaje de humedad contenida en la biomasa.
- $LHV_{bm,db}$ : poder calorífico inferior de la biomasa en base seca (db) (J/g).
- $\Delta T_{H_2O,bm}$ : cambio de temperatura de la humedad contenida en la biomasa hasta evaporarse (K).

### 3.6.6.3. Energía en el carbono residual

Es la energía contenida en el carbono elemental restante al final la prueba, se calcula utilizando la ecuación:

$$E_{Cs} = LHV_C m_{Cs} \quad (46)$$

Donde:

- $E_{Cs}$ : Energía contenida en el carbono elemental residual (J).
- $LHV_C$ : poder calorífico inferior del carbono residual que queda al finalizar la prueba (J/g).
- $m_{Cs}$ : masa de carbono residual que queda al finalizar la prueba (g).

### 3.6.7. Eficiencia térmica de la cocina gasificadora

La eficiencia térmica de la cocina gasificadora pirolítica según el protocolo de la prueba de ebullición de agua, es una relación entre la energía útil transferida al agua y la energía total suministrada por la biomasa, descontando la energía que queda en el carbono residual no consumido, matemáticamente, se expresa como:



$$\eta_T = \frac{E_{H_2O}}{E_{bm} - E_{CS}} \times 100\% \quad (47)$$

Donde:

- $\eta_T$ : Eficiencia térmica de la cocina gasificadora
- $E_{H_2O}$ : Energía transferida al agua (J).
- $E_{bm}$ : Energía contenida en el combustible (J).
- $E_{CS}$ : Energía en el carbono elemental residual (J).

### 3.6.8. Cálculo de potencias energéticas

- **Tasa de consumo de biomasa:**

$$\dot{m}_{bm} = \frac{m_{bm}}{t_T} \quad (48)$$

Donde:

- $\dot{m}_{bm}$ : tasa de consumo de biomasa promedio (kg/h).
- $m_{bm}$ : masa promedio de biomasa consumida en la prueba de ebullición (kg).
- $t_T$ : tiempo total promedio de la prueba de ebullición (min).

- **Potencia entregada por la biomasa:**

$$\dot{E}_{bm} = \frac{E_{bm}}{t_T} \quad (49)$$

Donde:

- $\dot{E}_{bm}$ : potencia entregada por la biomasa (W).
- $E_{bm}$ : Energía contenida en el combustible (J).
- $t_T$ : tiempo total promedio de la prueba de ebullición (s).

- **Potencia de energía retenida en el carbono residual:**



$$\dot{E}_{Cs} = \frac{E_{Cs}}{t_T} \quad (50)$$

Donde:

- $\dot{E}_{Cs}$ : potencia de energía retenida en el carbono residual (W).
- $E_{Cs}$ : Energía contenida en el carbono residual (J).
- $t_T$ : tiempo total promedio de la prueba de ebullición (s).
- **Potencia entregada al agua:**

$$\dot{E}_{agua} = \frac{E_{agua}}{t_T} \quad (51)$$

Donde:

- $\dot{E}_{agua}$ : potencia entregada al agua (W).
- $E_{H_2O}$ : Energía transferida al agua (J).
- $t_T$ : tiempo total promedio de la prueba de ebullición (s).

Los resultados de esta sección se presentan en la sección de resultados.

### 3.7. MEDICIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO AL PROTOTIPO FINAL

La medición de los niveles de emisiones de monóxido de carbono en un ambiente donde ocurre la combustión de biomasa, se realizó con el objetivo de garantizar la seguridad de las personas que se encuentran en el área de cocción durante el proceso de combustión del gas producido por la cocina gasificadora.

#### 3.7.1. Instrumento utilizado

Para realizar las mediciones de CO, se utilizó un medidor de monóxido de carbono (modelo Smart Sensor AS8700A), con las siguientes especificaciones:



- Rango de Medición: 0 a 1000 ppm
- Precisión:  $\pm 10\%$
- Tipo de Sensor: Sensor electroquímico
- Alarma: Sonora, que se activa cuando los niveles de CO superan un umbral de seguridad.

### **3.7.2. Procedimiento de medición**

#### **1. Preparación del área de prueba:**

- La cocina gasificadora de biomasa se instaló en un ambiente con dimensiones internas de 2.10m de largo, 5.00m de ancho y con una altura de 2.30m (cocina típica del campo), el cual estuvo ventilado durante toda la prueba a través de una puerta abierta de área 1.50mx0.6m y una abertura abierta en la ventana de área 0.20mx0.25m.
- El medidor de CO fue colocado a una altura de aproximadamente 0.8 metro del piso y a 0.6 metro distancia vertical desde el quemador al medidor, en un punto donde se puede asegurar la representatividad de las concentraciones de CO en el entorno.

#### **2. Desarrollo de las mediciones:**

- Antes del encendido de la cocina, se activó el medidor de monóxido de carbono para comenzar a registrar las concentraciones de CO.
- Se registraron los datos de CO en intervalos de tiempo cada 1 minutos para evaluar la evolución de las concentraciones a lo largo de la combustión.
- El tiempo de duración de la prueba fue hasta que se termine la biomasa cargada en el reactor.

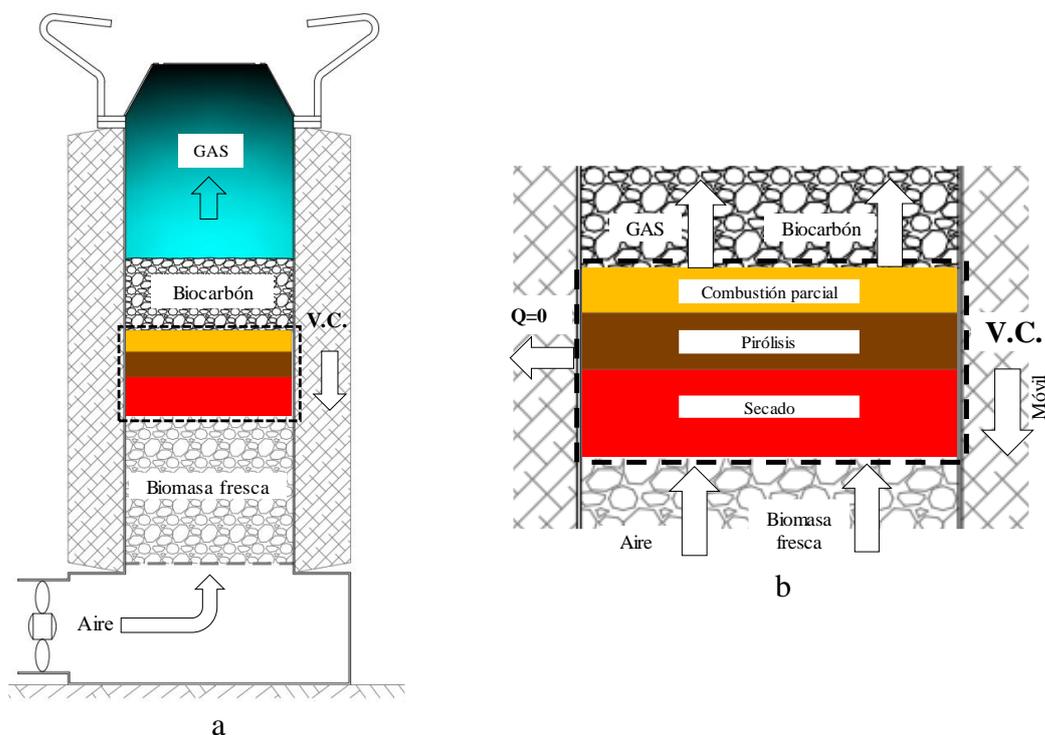
Los resultados de las mediciones de CO se presentan en la sección de resultados, donde se detallan las concentraciones de CO obtenidas en cada etapa de la prueba de ebullición de agua.

### 3.8. PREDICCIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS

En esta sección, se detallan los conceptos y ecuaciones tratados en el Capítulo II para estimar la composición del gas de síntesis generado en el gasificador bajo el “modelo de equilibrio termodinámico”. La predicción de sus componentes principales ( $H_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) son muy importantes para evaluar la eficiencia de gasificación y rendimiento energético del sistema.

**Figura 36**

*Esquema del modelo de equilibrio termodinámico*



Nota: a: gasificador y b: representación del volumen de control móvil para el modelo de equilibrio termodinámico.



### 3.8.1. Modelo de equilibrio termodinámico

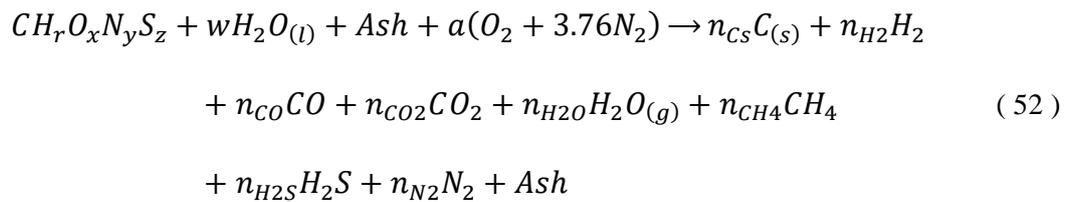
Como se trató en el capítulo II, este modelo puede representarse por un volumen de control que desciende en el gasificador desde la parte superior al inferior en el reactor, como se puede apreciar en la Figura 36 esto permitirá la estimación del gas de síntesis.

En esta investigación el modelo de equilibrio termodinámico se basa en los siguientes supuestos:

- El volumen de control se considera sistema adiabático y no hay pérdida de calor.
- La temperatura y presión son uniformes en el sistema y se encuentra en estado estacionario.
- Todos y cada uno de los gases del sistema establecido se consideran ideales.
- Las cenizas no participan en la reacción química y el contenido de alquitrán es insignificante para el gasificador
- El aire y la materia prima de biomasa ingresan al gasificador a una temperatura de 25 °C.
- Los únicos gases que se producen son  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$  y  $H_2O$
- Las velocidades de reacción de gasificación son lo suficientemente rápidas y el tiempo de residencia es suficientemente largo para alcanzar el estado de equilibrio.
- Todo el nitrógeno contenido en la biomasa se convierte en gas  $N_2$ .
- El gas  $N_2$  se considera inerte y no sufre ninguna reacción química

### 3.8.2. Ecuación de reacción global de la gasificación

Partiendo del supuesto de que la composición química de la biomasa es  $CH_rO_xN_yS_z$  con su humedad representada por  $w$  más las cenizas (*Ash*) que se gasifica con  $a$  moles de oxígeno ( $a \cdot 4.76 \text{ moles de aire}$ ). La reacción general de gasificación puede expresarse mediante la ecuación ( 52 ).



Donde:

- $CH_rO_xN_yS_z$ : es la fórmula empírica de la biomasa
- $w$ : es la humedad en número de moles de  $H_2O$  contenida en la biomasa determinada con la ecuación ( 53 ).

$$w = \frac{M_{bm.daf} \times MC}{M_{H_2O} \times (1 - MC - Ash)} \left( \frac{\text{mol de } H_2O}{\text{mol de } CH_rO_xN_yS_z} \right) \quad ( 53 )$$

- $a$ : es el numero de moles de oxígeno del aire por un mol de biomasa.
- Los coeficientes  $n_{C_s}, n_{H_2}, n_{CO}, n_{CO_2}, n_{H_2O}, n_{CH_4}, n_{H_2S}$  y  $n_{N_2}$  representan los números de moles de carbón solido  $C_{(s)}$ , hidrogeno  $H_2$ , monóxido de carbono  $CO$ , dióxido de carbono  $CO_2$ , vapor de agua  $H_2O_{(g)}$ , metano  $CH_4$ , sulfuro de hidrogeno  $H_2S$ , y nitrógeno  $N_2$  respectivamente.
- *Ash*: representa las cenizas (compuestos inertes).
- $M_{bm.daf}$ : es la masa molar de la biomasa en base seca libre de cenizas.
- $M_{H_2O}$ : es la masa molar del agua.
- $MC$ : es el contenido de humedad de la biomasa por mol de biomasa.

En la ecuación de reacción ( 52 ), todas las especies de los reactivos (lado izquierdo) son conocidas y se definen a 25°C. y los productos (lado derecho) " $n_i$ " son los números de moles de la especie  $i$  son desconocidas a excepción del número de moles de carbono sólido ( $n_{CS}$ ) que es un dato que se tomara de la prueba de ebullición de agua.

**Cálculo de  $n_{CS}$**  : este valor se calcula a partir de la masa de carbono residual obtenido en la prueba de ebullición de agua, mediante la siguiente ecuación:

$$n_{CS} = \frac{m_{CS} \cdot M_{bm.daf}}{m_{bm} \cdot M_C \cdot (1 - Ash - MC)} \left( \frac{\text{moles de carbono}}{\text{mol de } CH_rO_xN_yS_z} \right) \quad (54)$$

Donde:

- $m_{CS}$ : masa de carbono residual obtenido en la prueba de ebullición de agua (g).
- $m_{bm}$ : masa de biomasa utilizado en la prueba de ebullición de agua (g).
- $M_{bm.daf}$ : es la masa molar de la biomasa en base seca libre de cenizas (g/mol).
- $M_C$ : masa molar del carbono (g/mol)
- $Ash$  y  $MC$ : contenido de cenizas y humedad en la biomasa.

### 3.8.3. Balance de masa en la ecuación de gasificación

El balance de masa en la ecuación de gasificación, basado en el principio de conservación de la masa, establece que la masa total de los reactantes (biomasa y agente gasificante) es igual a la masa total de los productos generados. Este balance permite calcular la composición del gas de síntesis, asegurando que cada

elemento (C, H, O, etc.) esté adecuadamente contabilizado en los productos finales.

- Balance de carbono:

$$n_{CS} + n_{CO} + n_{CO2} + n_{CH4} = 1 \quad (55)$$

- Balance de hidrogeno:

$$2 \cdot n_{H2} + 2 \cdot n_{H2O} + 4 \cdot n_{CH4} + 2 \cdot n_{H2S} = r + 2 \cdot w \quad (56)$$

- Balance de oxígeno:

$$n_{CO} + 2 \cdot n_{CO2} + n_{H2O} = x + w + 2 \cdot a \quad (57)$$

- Balance de nitrógeno:

$$2 \cdot n_{N2} = y + 2 \cdot 3.76 \cdot a \quad (58)$$

- Balance de azufre:

$$n_{H2S} = z \quad (59)$$

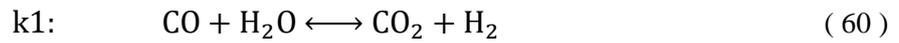
Del sistema de ecuaciones ( 55 ) - ( 59 ) se tiene 5 ecuaciones y se tiene 7 especies químicas como incógnita ( $n_{H2}, n_{CO}, n_{CO2}, n_{H2O}, n_{CH4}, n_{H2S}$  y  $n_{N2}$ ) y además la cantidad de aire  $a$  requerido para mantener el proceso de la pirólisis, por lo que se tiene un total de 8 incógnitas, por lo que para resolver se necesita 3 ecuaciones adicionales y estos se puede plantear del equilibrio químico que ocurre en el sistema y el balance de energía en el sistema adiabático.

#### 3.8.4. Ecuaciones de equilibrio químico

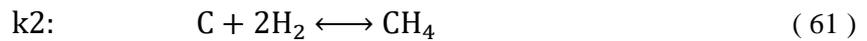
Diversos estudios, incluyendo los de Jarunghammachote y Dutta (2007), Gagliano et al. (2016), Aydin et al. (2017) y Ibrahim y Gunjo (2024), han identificado y formulado las reacciones independientes clave que ocurren en las zonas de pirólisis y gasificación dentro del gasificador. Estas reacciones representan los procesos de transformación y conversión de la biomasa en

componentes gaseosos y sólidos y se resumen en las siguientes ecuaciones, que describen tanto la descomposición inicial del material como las reacciones de oxidación y reducción necesarias para la producción de gas de síntesis:

- Reacción de cambio agua - gas:



- Formación de metano:



La condición de equilibrio químico para esas reacciones se puede escribir en términos de la composición molar del sistema en base a la ecuación de gasificación (52)

$$\frac{\Delta G_{T,k1}^0}{RT} = -\ln \left[ \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{H}_2}}{n_{\text{CO}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \quad (62)$$

$$\frac{\Delta G_{T,k2}^0}{RT} = -\ln \left[ \frac{n_{\text{CH}_4} \cdot (n_{\text{H}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CH}_4} + n_{\text{H}_2\text{S}} + n_{\text{N}_2}) \cdot \frac{P^0}{P}}{n_{\text{H}_2}^2} \right] \quad (63)$$

Donde:  $\Delta G_{T,k1}^0$  y  $\Delta G_{T,k2}^0$ , son los cambios de energía de Gibbs estándar de las reacciones independientes (60) y (61) a una temperatura “T” del sistema respectivamente.

Los términos de la derecha de las ecuaciones (62) y (63) se calculan en base a la ecuación (64) y (65) (ver capítulo 2):

$$\frac{\Delta G_{T,k1}^0}{RT} = \frac{\Delta G_{T_0,k1}^0 - \Delta H_{T_0,k1}^0}{RT_0} + \frac{\Delta H_{T_0,k1}^0}{RT} + \frac{1}{T} \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_{P,k1}}{R} dT - \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_{P,k1}}{R} \frac{dT}{T} \quad (64)$$

$$\frac{\Delta G_{T,k2}^0}{RT} = \frac{\Delta G_{T_0,k2}^0 - \Delta H_{T_0,k2}^0}{RT_0} + \frac{\Delta H_{T_0,k2}^0}{RT} + \frac{1}{T} \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_{P,k2}}{R} dT - \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_{P,k2}}{R} \frac{dT}{T} \quad (65)$$

Donde:



- $\Delta G_{T_0,k1}^0$  y  $\Delta G_{T_0,k2}^0$ , son los cambios de energía de Gibbs en el estado estándar a una temperatura  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  de las reacciones independientes ( 60 ) y ( 61 ) respectivamente. Estos términos se calculan con la ecuación ( 14 ) ( $\Delta G_{T_0}^0 = \sum_i v_i \Delta G_{f,T,i}^0$ ).
- $\Delta H_{T_0,k1}^0$  y  $\Delta H_{T_0,k2}^0$ , son los cambios de entalpía en el estado estándar a una temperatura  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  de las reacciones ( 60 ) y ( 61 ) respectivamente. Estos términos se calculan con la ecuación ( 34 ) ( $\Delta H_{T_0}^0 = \sum_i v_i \Delta H_{f,i}^0$ ).
- $\Delta C_{P,k1}$  y  $\Delta C_{P,k2}$ , representa el cambio en la capacidad calorífica de las reacciones ( 60 ) y ( 61 ) respectivamente y se calculan con la ecuación ( 16 ) ( $\Delta C_P = \sum_i v_i C_{P,i}$ ).

La capacidad calorífica de la especie química dividida entre la constante universal de los gases ideales ( $C_{P,i}/R$ ), se calculará utilizando una expresión polinómica en función de la temperatura (ecuación ( 17 )):

$$\frac{C_{P,i}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \quad (17)$$

Donde A, B, C y D son coeficientes específicos para cada gas ideal.

**Tabla 3**

*Coefficientes del polinomio de capacidades caloríficas de las sustancias.*

Especie Química	$T_{\max}$ (K)	$C_{p298}/R$	A	$10^3 B$	$10^6 C$	$10^{-5} D$
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	2000	3.535	3.639	0.506	-	-0.227
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	3000	3.468	3.249	0.422	-	0.083
Monóxido de carbono (CO)	2500	3.507	3.376	0.557	-	-0.031
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	2000	4.467	5.457	1.045	-	-1.157
Agua (H <sub>2</sub> O)	2000	4.038	3.470	1.450	-	0.121
Metano (CH <sub>4</sub> )	1500	4.217	1.702	9.081	-2.164	-

Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	2300	4.114	3.931	1.490	-	-0.232
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	2000	3.502	3.280	0.593	-	0.040
C (grafito)	2000	1.026	1.771	0.771		-0.867

Nota. Fuente: Smith, Van Ness, & Abbott (2007)

**Tabla 4**

*Entalpia de formación y energía de Gibbs de formación de las sustancias gaseosas.*

Espece Química	Entalpia de formación ( $\Delta H_{f,i}^0$ ) J/mol	Energía de Gibbs de formación ( $\Delta G_{f,i}^0$ ) J/mol
Monóxido de carbono (CO)	-110525	-137169
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	-393509	-394359
Agua líquida (H <sub>2</sub> O <sub>l</sub> )	-285830	-237129
Agua vapor (H <sub>2</sub> O <sub>g</sub> )	-241818	-228572
Metano (CH <sub>4</sub> )	-74520	-50460
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	-20630	-33560
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	-296830	-300194

Nota. Fuente: Smith, Van Ness, & Abbott (2007)

### 3.8.5. Balance energético del volumen de control

El balance energético sobre el volumen de control como se representa en el esquema "b" de la Figura 36, se formula en base a la ecuación de gasificación ( 52 ), considerando que no hay transferencia de calor en el reactor ni trabajo realizado hacia los alrededores. En estas condiciones, la entalpia de los reactivos es igual a la entalpia de los productos y la ecuación de balance de energía queda expresado como:

$$\underbrace{\sum_{i=1}^n n_i (\Delta H_{f,i}^0 + \Delta H_i^0)}_{\text{Entalpia de los reactivos}} = \underbrace{\sum_{j=1}^m n_j (\Delta H_{f,j}^0 + \Delta H_j^0)}_{\text{Entalpia de los productos}} \quad (66)$$

- Entalpia de los reactivos:

$$\Delta H_R^0 = \sum_{i=1}^n n_i (\Delta H_{f,i}^0 + \Delta H_i^0)$$

Reemplazando las propiedades de los reactivos resulta lo siguiente:

$$\Delta H_R^0 = \Delta H_{fbm}^0 + w \cdot \Delta H_{fH_2O}^0 + a \cdot R \int_{T_0}^T \frac{C_{pO_2}}{R} dT + a \cdot 3.76 \cdot R \int_{T_0}^T \frac{C_{pN_2}}{R} dT \quad (67)$$

- Entalpia de los productos:

$$\Delta H_P^0 = \sum_{j=1}^m n_j (\Delta H_{f,j}^0 + \Delta H_j^0)$$

Reemplazando las propiedades de los productos, resulta lo siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta H_P^0 = & n_{Cs} \cdot \left( \Delta H_{fCs}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCs}}{R} dT \right) + n_{H_2} \cdot \left( \Delta H_{fH_2}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pH_2}}{R} dT \right) \\ & + n_{CO} \cdot \left( \Delta H_{fCO}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCO}}{R} dT \right) + n_{CO_2} \cdot \left( \Delta H_{fH_2}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCO_2}}{R} dT \right) \\ & + n_{H_2O} \cdot \left( \Delta H_{fH_2O}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pH_2O}}{R} dT \right) + n_{CH_4} \cdot \left( \Delta H_{fCH_4}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCH_4}}{R} dT \right) \\ & + n_{H_2S} \cdot \left( \Delta H_{fH_2S}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pH_2S}}{R} dT \right) + n_{N_2} \cdot \left( \Delta H_{fN_2}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pN_2}}{R} dT \right) \quad (68) \end{aligned}$$

Reemplazando las ecuaciones (67) y (68) en la ecuación (66), resulta la ecuación (69):

$$\begin{aligned} \Delta H_{fbm}^0 + w \cdot \Delta H_{fH_2O}^0 + a \cdot R \int_{T_0}^T \frac{C_{pO_2}}{R} dT + a \cdot 3.76 \cdot R \int_{T_0}^T \frac{C_{pN_2}}{R} dT = \\ n_{Cs} \cdot \left( \Delta H_{fCs}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCs}}{R} dT \right) + n_{H_2} \cdot \left( \Delta H_{fH_2}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pH_2}}{R} dT \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+n_{CO} \cdot \left( \Delta H_{fCO}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCO}}{R} dT \right) + n_{CO_2} \cdot \left( \Delta H_{fH_2}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCO_2}}{R} dT \right) \\ &+n_{H_2O} \cdot \left( \Delta H_{fH_2O}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pH_2O}}{R} dT \right) + n_{CH_4} \cdot \left( \Delta H_{fCH_4}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pCH_4}}{R} dT \right) \\ &+n_{H_2S} \cdot \left( \Delta H_{fH_2S}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pH_2S}}{R} dT \right) + n_{H_2} \cdot \left( \Delta H_{fN_2}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{C_{pN_2}}{R} dT \right) \quad (69) \end{aligned}$$

### 3.8.6. Método de resolución de sistema de ecuaciones

Una vez que se ha planteado el sistema de ecuaciones: ( 55 ), ( 56 ), ( 57 ), ( 58 ), ( 59 ), ( 62 ), ( 63 ) y ( 69 ) se procede a resolver para obtener los valores de las 8 incógnitas:  $n_{H_2}$ ,  $n_{CO}$ ,  $n_{CO_2}$ ,  $n_{H_2O}$ ,  $n_{CH_4}$ ,  $n_{H_2S}$ ,  $n_{N_2}$  y  $a$ . Para resolver el sistema de ecuaciones se ha utilizado el software *Mathcad* y utilizando el comando *find*. *Mathcad* es una herramienta permite realizar cálculos simbólicos y numéricos de manera iterativa, facilitando la solución de sistemas de ecuaciones complejos. La Figura 37, muestra el proceso que se siguió para resolver el sistema de ecuaciones.

#### Descripción del proceso:

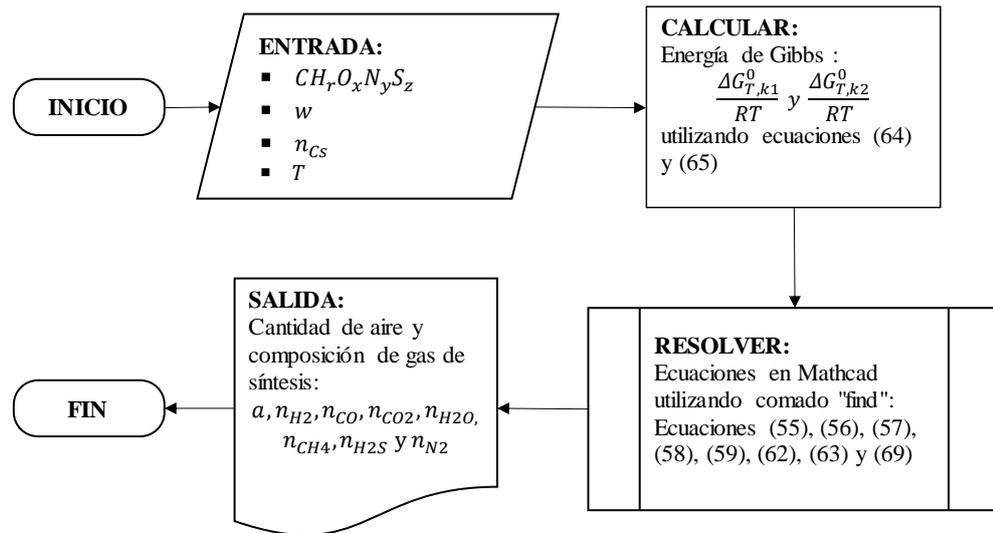
##### 1. Entrada:

- Molécula empírica de la biomasa:  $CH_rO_xN_yS_z$ , calculado en base a las ecuaciones (5)
- Humedad de la biomasa:  $w$ , calculado con la ecuación ( 53 ).
- Cantidad de carbono residual en moles:  $n_{CS}$ , dato experimental calculado a partir de la prueba de ebullición de agua con la ecuación ( 54 ).

- Temperatura del reactor (del volumen de control):  $T$ , dato determinado experimentalmente de la zona de gasificación en el reactor con el modelo experimental de la cocina gasificadora.

**Figura 37**

*Flujo de proceso para resolver el sistema de ecuaciones*



Nota: en el esquema se muestra el flujo de proceso que se siguió para resolver los sistemas de ecuaciones para la predicción del gas de síntesis.

## 2. Cálculo de energía de Gibbs:

- Utilizando las ecuaciones ( 64 ) y ( 65 ) calcular la energía de Gibbs  $\left(\frac{\Delta G_T^0}{RT}\right)$  desarrollando las integrales y reemplazar la temperatura  $T$ .

## 3. Resolver el sistema de ecuaciones:

- Utilizando el software *MathCad* con el comando *find* resolver el sistema de ecuaciones ( 55 ), ( 56 ), ( 57 ), ( 58 ), ( 59 ), ( 62 ), ( 63 ) y ( 69 ).

## 4. Datos de salida:

- Después de la resolución de las ecuaciones se obtiene: la composición del gas de síntesis en “mol/mol de biomasa” ( $n_{H_2}, n_{CO}, n_{CO_2}, n_{H_2O}, n_{CH_4}, n_{H_2S}, n_{N_2}$ ) y la cantidad de aire en “mol/mol de biomasa” ( $a$ ).

El método de resolución del sistema de ecuaciones, se ha implementado en el software Mathcad el cual se muestra en el anexo 6 y 7.

### 3.9. PROPIEDADES ENERGÉTICAS DEL GAS DE SÍNTESIS

Determinar cuánta energía contiene el gas de síntesis al salir del reactor es fundamental para calcular el rendimiento del reactor. Este gas posee principalmente dos tipos de energía: la energía química y la energía sensible. La energía química está directamente relacionada con su poder calorífico, ya que proviene de los enlaces entre las moléculas del gas y puede liberarse en una combustión. Por otro lado, la energía sensible está relacionada con la temperatura del gas y representa la energía térmica que el gas puede transferir sin reaccionar químicamente.

#### 3.9.1. Poder calorífico inferior del gas de síntesis

El poder calorífico inferior en condiciones normales ( $LHV_{N,gas}$ ) se calcula con la ecuación ( 71 ), pero antes se debe calcular el poder calorífico a condiciones normales con la ecuación ( 70 ) ya que los datos disponibles en las tablas termodinámicas son los poderes caloríficos de los gases a condiciones normales.

$$LHV_{N,gas} = \sum_i y_i LHV_i \quad (\text{MJ}/\text{Nm}^3) \quad (70)$$

Donde:

- $LHV_{N,gas}$  es el poder calorífico inferior de la mezcla de gases en condiciones normales de temperatura y presión.
- $y_i$  es la fracción molar del componente  $i$  en la mezcla.
- $LHV_i$  es el poder calorífico de la especie  $i$ , es un valor conocido en la literatura se puede tomar de la Tabla 5.

**Tabla 5***Poderes Caloríficos Inferior de los Gases Combustibles.*

Gases	Poder Calorífico Inferior
	$LHV_i(\text{MJ}/\text{Nm}^3)^*$
$H_2$	10.78
$CO$	12.63
$CO_2$	0
$H_2O$	0
$CH_4$	35.88
$H_2S$	23.14
$N_2$	0

Nota: \* valores a condiciones normales de temperatura a 0°C y presión 1 atm. Fuente: Basu (2013).

El poder calorífico  $LHV_{N,gas}$  se debe ajustar a las condiciones de temperatura y presión de salida del gas del reactor, usando las relaciones de gases ideales se tiene la ecuación:

$$LHV_{gas} = LHV_{N,gas} \cdot \frac{P_{0,l} \cdot T_N}{P_N \cdot T_{gas}} \quad (\text{MJ}/\text{m}^3) \quad (71)$$

Donde:

- $LHV_{gas}$ : poder calorífico inferior del gas de síntesis en las condiciones de presión ( $P_{0,l}$ ) y temperatura ( $T_{gas}$ ).
- $P_N$  y  $T_N$ : condiciones normales de presión (1atm) y temperatura (298.15K) respetivamente.
- $P_{0,l}$ : presión atmosférica local (0.642atm)
- $T_{gas}$ : temperatura del gas de síntesis a la salida del reactor, el valor asumido es la que se determinado experimentalmente en el modelo experimental.

### 3.9.2. Masa molar del gas de síntesis

El gas de síntesis es una mezcla de gases compuesta por  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$  y  $N_2$ . La masa molar promedio del gas de síntesis se calcula utilizando la ecuación:

$$M_{gas} = \sum_i y_i M_i \quad (g/mol) \quad (72)$$

Donde:

- $M_{gas}$ : Masa molar del gas de síntesis (g/mol).
- $y_i$ : Fracción molar de la especie  $i$  en la mezcla de gases.
- $M_i$ : Masa molar del componente  $i$  en la mezcla de gases (g/mol).

**Tabla 6**

*Masa molar de los componentes de los gases*

Gases	Masa Molar $M_i$ (g/mol)
$H_2$	2.016
$CO$	28.011
$CO_2$	44.010
$H_2O$	18.015
$CH_4$	16.043
$H_2S$	34.065
$N_2$	28.130

Nota: tomado de Cengel & Boles (2015)

### 3.9.3. Densidad del gas

La densidad del gas de síntesis se calcula considerando el comportamiento de un gas ideal, donde su densidad depende de la masa molar promedio del gas, la presión local y la temperatura medida a la salida del reactor. Aplicando la ecuación de estado de los gases ideales se obtiene la ecuación:

$$\rho_{gas} = \frac{P_{0,l} \cdot M_{gas}}{R \cdot T_{gas}} \quad (73)$$

Donde:

- $\rho_{gas}$ : densidad del gas de síntesis (kg/m<sup>3</sup>)
- $P_{0,l}$ : presión atmosférica local (65010 Pa)
- $M_{gas}$ : Masa molar del gas de síntesis (g/mol).
- $R$ : constante universal de los gases ideales (8.314 J/mol-K)
- $T_{gas}$ : temperatura del gas de síntesis (K).

#### 3.9.4. Capacidad calorífica del gas combustible

Consideran que el gas de síntesis es una mezcla de gases ideales, la capacidad calorífica a presión constante ( $C_{p,gas}$ ) se calcula utilizando la suma ponderada de las capacidades caloríficas de cada componente, multiplicadas por sus respectivas fracciones molares. La ecuación general para una mezcla de gases es:

$$C_{p,gas} = \sum_i y_i \cdot C_{p,i} \quad (74)$$

Donde:

- $C_{p,gas}$ : Capacidad calorífica a presión constante de la mezcla.
- $y_i$ : Fracción molar del gas  $i$  en la mezcla.
- $C_{p,i}$ : Capacidad calorífica a presión constante del gas  $i$  que depende de la temperatura.

Dividiendo ambos miembros la ecuación (74) entre la constante universal de los gases ideales ( $R$ ) resulta la ecuación (75):



$$\frac{C_{p,gas}(T)}{R} = \sum_i y_i \cdot \frac{C_{p,i}}{R} \quad (75)$$

Donde:

- $\frac{C_{p,gas}(T)}{R}$ : es la capacidad calorífica a presión constante para el gas de síntesis en función de la temperatura dividido entre R.
- $y_i$ : Fracción molar del gas  $i$  en la mezcla.
- $\frac{C_{p,i}}{R}$ : es la expresión polinómica de la capacidad calorífica del gas  $i$  en la mezcla de gas de síntesis (ver ecuación (17)).
- $R$ : constante universal de los gases ideales (8.314 J/mol-K)

### 3.9.5. Entalpia específica molar del gas

Es la energía sensible del gas de síntesis se calcula mediante la ecuación:

$$\Delta H_{gas} = R \cdot \int_{T_{0,l}}^{T_{gas}} \frac{C_{p,gas}(T)}{R} dT \quad (76)$$

Donde:

- $\Delta H_{gas}$ : entalpia específica molar del gas de síntesis (J/mol)
- $\frac{C_{p,gas}(T)}{R}$ : capacidad calorífica a presión constante para el gas de síntesis dividido entre la constante universal de gases ideales, expresión adimensional, calculado con la ecuación (75).
- $T_{gas}$ : temperatura del gas de síntesis, en el reactor (K).
- $T_{0,l}$ : Temperatura ambiental ( $T_{0,l} = 288.15K$ ).
- $R$ : constante universal de los gases ideales (8.314 J/mol-K).

### 3.10. BALANCE DE MASA EN EL REACTOR

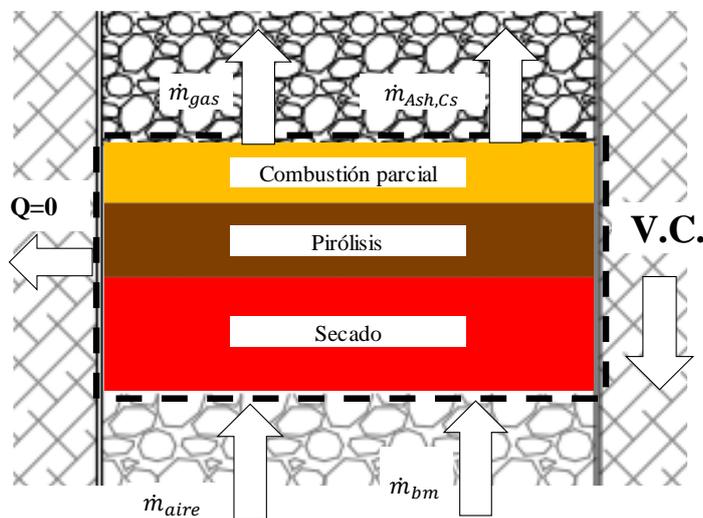
En esta sección se desarrolla las ecuaciones que se utilizó para el balance de masas en el reactor, el balance de masas en un sistema está dado por el principio de conservación de masa, también se puede realizar el balance de masa en términos de flujo masico.

#### 3.10.1. Balance de masa en el volumen de control de la zona de gasificación

Para calcular en balance de masas en el reactor, primero se realizó el balance de masa en el volumen de control definido en la Figura 36-b considerando los flujos máxicos de entrada y salida en el volumen de control, en la Figura 38 se muestra el volumen de control, donde se puede observar los flujos de masas, del principio de conservación de masas debe cumplirse la ecuación ( 77 ).

**Figura 38**

*Volumen de control de la zona de gasificación*



Nota: en la figura se aprecia el volumen de control de la zona de gasificación, este volumen de control se desplaza hacia abajo conforme va consumiéndose la biomasa.

$$\dot{m}_{bm} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{Ash,Cs} \quad (77)$$

Donde:

- $\dot{m}_{bm}$ : flujo masico de biomasa (kg/h)
- $\dot{m}_{aire}$ : flujo masico de aire (kg/h)
- $\dot{m}_{gas}$ : flujo masico de gas de síntesis (kg/h)
- $\dot{m}_{bioc}$ : flujo masico de la mezcla solididad cenizas y carbono (biocarbón) (kg/h).

La ecuación ( 77 ) se puede descomponer considerando las especies químicas que participan en la ecuación de reacción global de gasificación ( 52 ), resultando:

$$\dot{m}_{CHONS} + \dot{m}_{MC} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{aire} =$$
$$\dot{m}_{Cs} + \dot{m}_{Ash} + \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{H_2S} + \dot{m}_{N_2} \quad (78)$$

Donde:

- $\dot{m}_{CHONS}$ : flujo masico de la biomasa base “daf” ( $CH_rO_xN_yS_z$ ).
- $\dot{m}_{MC}$ : flujo masico de la humedad de biomasa.
- $\dot{m}_{Ash}$ : flujo masico de las cenizas de la biomasa.
- $\dot{m}_{aire}$ : flujo masico del aire.
- $\dot{m}_{Cs}$ : flujo masico del carbono elemental residual.
- $\dot{m}_{H_2}$ ,  $\dot{m}_{CO}$ ,  $\dot{m}_{CO_2}$ ,  $\dot{m}_{H_2O}$ ,  $\dot{m}_{CH_4}$ ,  $\dot{m}_{H_2S}$  y  $\dot{m}_{N_2}$ : son los flujos masicos de los componentes del gas de síntesis.

De las ecuaciones ( 77 ) y ( 78 ) se tiene las siguientes igualdades:

- Flujo masico de la biomasa en base recibida “ar” ( $\dot{m}_{bm}$ ):

$$\dot{m}_{bm} = \dot{m}_{CHONS} + \dot{m}_{MC} + \dot{m}_{Ash} \quad (79)$$

- Flujo masico de biocarbón o tasa de formación de biocarbón ( $\dot{m}_{bioc}$ ):

$$\dot{m}_{bioC} = \dot{m}_{CS} + \dot{m}_{Ash} \quad (80)$$

- Flujo masico de gas o tasa de formación de gas de síntesis ( $\dot{m}_{gas}$ ):

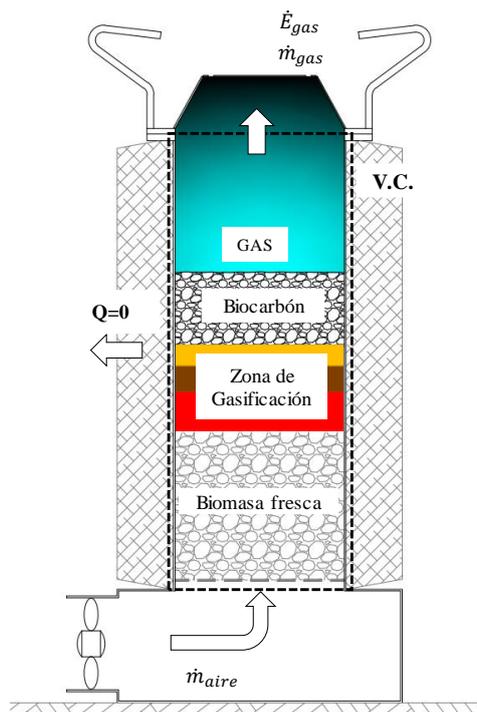
$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{H_2S} + \dot{m}_{N_2} \quad (81)$$

El cálculo de las variables de flujo másico se detalla en la memoria de cálculo en el anexo 6 y 7 y los resultados se presentan en la sección de resultados y discusiones.

### 3.10.2. Balance de masas en el reactor

**Figura 39**

*Volumen de control para el balance de masa y energía en el reactor*



Nota: en la figura se muestra el volumen de control tomando como sistema el reactor

El balance de masa para un volumen de control de masa variable, como ocurre en el reactor, está dado por la siguiente expresión:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = \frac{\Delta m_{VC}}{\Delta t} \quad (82)$$

Donde  $\dot{m}_e$  es la masa que ingresa,  $\dot{m}_s$  es la masa que sale,  $\Delta m_{VC}$  es el cambio de masa que ocurre en el volumen de control en un periodo de tiempo  $\Delta t$ .

De la ecuación anterior se plantea lo siguiente, en términos de los flujos masicos que participan en el proceso:

$$\dot{m}_{aire} - \dot{m}_{gas} = \dot{m}_{bioc} - \dot{m}_{bm} \quad (83)$$

Las ecuaciones (70) y (73) son equivalentes; por lo tanto, si una de ellas se satisface, la otra también lo hará.

### 3.11. BALANCE DE ENERGÍA EN EL REACTOR

El balance de energía esta dado por el principio de conservación de energía. En términos de flujo energético (potencia), similar al análisis del balance de masas tanto en el volumen de control en la zona de gasificación como en el volumen de control del reactor, y tomando en cuenta que el reactor es un sistema adiabático como se indicó en las secciones precedentes. Para el volumen de control de la Figura 38, el balance de energía se representa matemáticamente por la ecuación:

$$\dot{E}_{bm} + \dot{E}_{aire} = \dot{E}_{gas} + \dot{E}_{bioc} \quad (84)$$

Donde:

- $\dot{E}_{bm}$  es la potencia entregada por la biomasa.
- $\dot{E}_{aire}$  es la potencia energética del aire.
- $\dot{E}_{gas}$  es la energía total del gas de síntesis.
- $\dot{E}_{bioc}$  es la potencia energética total residual en el biocarbón.



El aire no tiene valor energético en las condiciones ambientales por lo que la ecuación quedaría expresada como:

$$\dot{E}_{bm} = \dot{E}_{gas} + \dot{E}_{bioC} \quad (85)$$

La energía total del gas de síntesis ( $\dot{E}_{gas}$ ), se refiere a la energía química contenido en el gas de síntesis y la energía sensible debido a la alta temperatura del gas cuando abandona el reactor, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\dot{E}_{gas} = LHV_{gas} \cdot \frac{\dot{m}_{gas}}{\rho_{gas}} + \Delta H_{gas} \cdot \frac{\dot{m}_{gas}}{M_{gas}} \quad (86)$$

Donde:

- $LHV_{gas}$ : poder calorífico inferior del gas de síntesis (kJ/kg), calculado en las condiciones de presión y temperatura a la salida del reactor ( $T_{gas}, P_{0,l}$ ).
- $\dot{m}_{gas}$ : es la tasa de consumo de biomasa (kg/hr).
- $\rho_{gas}$ : densidad del gas (kg/m<sup>3</sup>).
- $\Delta H_{gas}$ : entalpia molar específica del gas (kJ/kg).
- $M_{gas}$ : masa molar del gas (kg/kmol).

### 3.11.1. Eficiencia energética del reactor

Considerando el flujo energético entre la biomasa alimentada y el gas generado, la eficiencia energética del gasificador se define como la relación entre la energía contenida en el gas de síntesis producido y la energía contenida en la biomasa. matemáticamente se representa con la ecuación:

$$\eta_R = \frac{\dot{E}_{gas}}{\dot{E}_{bm}} \times 100\% \quad (87)$$

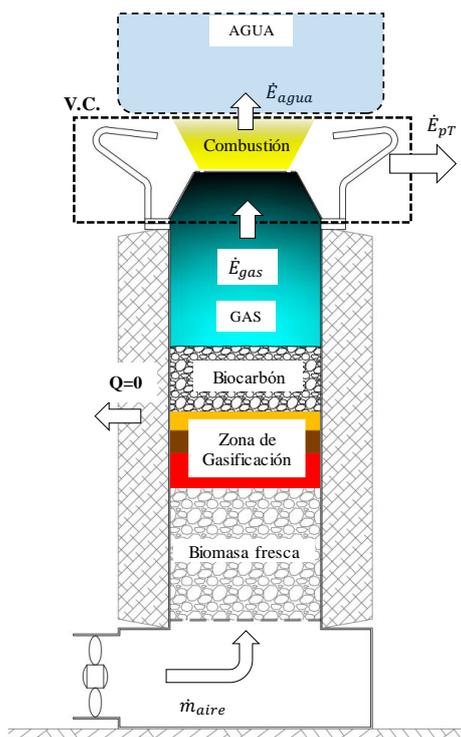
Donde,  $\eta_R$  es la eficiencia del reactor,  $\dot{E}_{gas}$  es el flujo energético del gas de síntesis y  $\dot{E}_{bm}$  es el flujo energético de la biomasa alimentada al reactor.

### 3.12. BALANCE ENERGÉTICO EN EL QUEMADOR

El balance energético en el quemador se calculó a partir de la prueba de ebullición de agua, en la Figura 40 se muestra el volumen de control del quemador donde ocurre la combustión del gas de síntesis, el balance energético en el quemador se puede expresar con la siguiente ecuación:

**Figura 40**

*Volumen de control para el balance de energía en el quemador*



Nota: en la figura se muestra el volumen de control utilizado para el balance de energía en el quemador.

$$\dot{E}_{gas} = \dot{E}_{agua} + \dot{E}_{pT} \quad (88)$$

Donde

- $\dot{E}_{gas}$  es el flujo de energía total del gas de síntesis (kW).

- $\dot{E}_{agua}$  es la potencia entregada al agua, calculado en la prueba de ebullición de agua (kW).
- $\dot{E}_{pT}$  es la potencia de energía térmica perdida en los alrededores por radiación y convección (kW).

### 3.12.1. Eficiencia térmica del quemador

La eficiencia del quemador se define como la relación entre la energía térmica útil aprovechada en el proceso de combustión y la energía total del gas combustible que sale del del reactor al quemador. Matemáticamente, se expresa como:

$$\eta_Q = \frac{\dot{E}_{agua}}{\dot{E}_{gas}} \times 100\% \quad (89)$$

Donde  $\eta_Q$  es la eficiencia del quemador,  $\dot{E}_{agua}$  es la potencia entregada al agua (W) y  $\dot{E}_{gas}$  es la potencia energética total del gas combustible (W).

### 3.13. BALANCE ENERGÉTICO DE LA COCINA

El balance energético de una cocina gasificadora consiste en analizar las diferentes formas de energía involucradas en el sistema para evaluar su eficiencia. En la Figura 41 se muestra una representación de la cocina y un recipiente que contiene agua que se utilizó en la prueba de ebullición de agua. El balance de energía de un sistema está en términos de potencia establecido por la ecuación ( 90 ).

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = \frac{\Delta E_{VC}}{\Delta t} \quad (90)$$

Donde:

- $\dot{E}_e$ : es la potencia total que ingresa al sistema.

- $\dot{E}_S$ : es la potencia total que sale del sistema.
- $\Delta E_{VC}$ : es el cambio de energía del sistema.
- $\Delta t$ : es el periodo de tiempo en el cual ocurre el cambio de energía del sistema.

En la Figura 41, sobre el volumen de control, las únicas formas de energía que cruza el sistema es la energía transferida al agua ( $\dot{E}_{agua}$ ) y la potencia de energía térmica perdida en los alrededores por radiación y convección ( $\dot{E}_{pT}$ ), mientras en el sistema ocurre un cambio de energía, la ecuación ( 90 ) resulta:

$$-(\dot{E}_{agua} + \dot{E}_{pT}) = \frac{E_i - E_f}{\Delta t} \quad (91)$$

Donde  $\dot{E}_{agua}$  es la potencia transferida al agua,  $\dot{E}_{pT}$  es la potencia que se pierde en el quemador en forma de calor,  $E_i$  es la energía inicial del sistema y  $E_f$  es la energía final del sistema. La energía inicial del sistema ( $E_i$ ) es la energía contenida en la biomasa inicialmente ( $E_{bm}$ ) y la energía final del sistema ( $E_f$ ) es la energía total que queda como residuo en el biocarbón ( $E_{bioC}$ ). Por lo tanto, reemplazando en la ecuación ( 91 ) resulta la ecuación ( 92 ) y de esta resulta la ecuación ( 93 ) que es la ecuación de balance de energía de la cocina gasificadora.

$$-(\dot{E}_{agua} + \dot{E}_{pT}) = \frac{E_{bm} - E_{bioC}}{\Delta t} \quad (92)$$

$$\dot{E}_{bm} = \dot{E}_{agua} + \dot{E}_{pT} + \dot{E}_{bioC} \quad (93)$$

La ecuación ( 93 ) describe que la energía contenida en la biomasa ( $\dot{E}_{bm}$ ) se distribuye en tres componentes principales analizada sobre el volumen de control de la Figura 41:

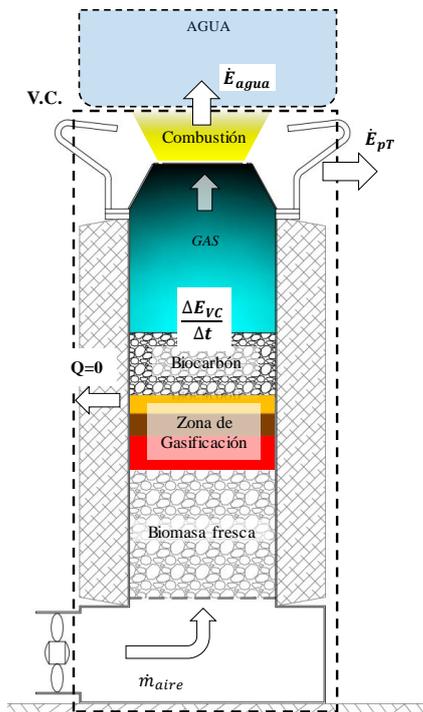
- Energía transferida al agua ( $\dot{E}_{agua}$ ), utilizada en el proceso de cocción.
- Energía perdida por transferencia térmica al entorno ( $\dot{E}_{pT}$ ).

- Energía retenida en el biocarbón residual ( $\dot{E}_{bioc}$ ), que incluye tanto la energía química como la energía sensible del biocarbón.

Esto refleja cómo se aprovecha y se distribuye la energía durante el funcionamiento de la cocina gasificadora.

### Figura 41

*Volumen de control para el balance de energía de la cocina gasificadora*



Nota: en la figura se aprecia el volumen de control utilizado para el balance energético del sistema completo.

#### 3.13.1. Eficiencia térmica de la cocina gasificadora

La eficiencia térmica de una cocina gasificadora mide la cantidad de energía en la biomasa que se aprovecha en forma de calor útil. Matemáticamente es la relación entre la energía útil aprovechada por el agua o algún elemento de cocción y la energía entregada por la biomasa, representada por la ecuación:

$$\eta_T = \frac{\dot{E}_{agua}}{\dot{E}_{bm} - \dot{E}_{CS}} \times 100\% \quad (94)$$

Donde:

- $\eta_T$ : eficiencia térmica de la cocina gasificadora (%)
- $\dot{E}_{agua}$ : potencia de energía transferida al agua (W).
- $\dot{E}_{bm}$ : potencia de energía contenida en la biomasa (W).
- $\dot{E}_{CS}$ : potencia energía retenida en el biocarbón residual (W).

### 3.14. PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA A LA COCINA TRADICIONAL

La cocina tradicional de tres piedras o fogón es un método de cocción antiguo utilizado principalmente en zonas rurales. Consiste en disponer tres piedras o soportes de tamaño similar formando un triángulo sobre los cuales se coloca un recipiente de cocción. En el centro se enciende un fuego alimentado con madera, bosta u otros combustibles sólidos.

**Figura 42**

*Cocina tradicional o fogón*



Nota: en la figura se aprecia la cocina tradicional que simula la cocina de tradicional de tres piedras.



Esta prueba tiene como objetivo evaluar el rendimiento térmico y las emisiones de monóxido de carbono de la cocina tradicional (fogón) de tres piedras mediante la prueba de ebullición de agua. En la Figura 42 se muestra una cocina tradicional similar a la de tres piedras que servirá como referencia para la comparación del rendimiento energético de la cocina gasificadora TLUD (prototipo final), donde se utilizó ladrillos como soporte para la olla, los ladrillos descansan sobre una plancha metálica de 0.4mm de espesor, esto con el fin de recoger las cenizas y carbón luego de finalizar la prueba.

El procedimiento para determinar la eficiencia térmica, se realizó en base al protocolo de la prueba de ebullición de agua descrito en la “sección 3.6” y los resultados se muestran en la sección de “resultados y discusiones”.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA BIOMASA

En la Tabla 7 se presenta las características geométricas obtenidas luego de seguir el procedimiento descrita en la sección de Métodos:

**Tabla 7**

*Características geométricas de la biomasa bosta de alpaca y bosta de vaca*

Biomasa	Densidad Aparente ( $\rho_{bm.a}$ , kg/m <sup>3</sup> )	Diámetro de la Partícula ( $d_p$ , mm)	Esfericidad ( $\Phi$ )	Porosidad del Lecho ( $\epsilon$ )
bosta de alpaca	251.36	7.0	0.5	0.3
bosta de vaca	110.71	6.0	0.3	0.4

Nota: en la tabla se muestra los resultados luego de realizar las mediciones experimentales a las muestras de biomosas

La bosta de alpaca presento una mayor densidad aparente (251.36 kg/m<sup>3</sup>) que la bosta de vaca (110.71 kg/m<sup>3</sup>), esto se debe a que la bosta de alpaca en su forma solida es más compactada, mientras la bosta de vaca es su forma original es más blanda, es decir en forma natural solida presenta porosidades.

Los valores calculados como la esfericidad ( $\Phi$ ) y la porosidad ( $\epsilon$ ) son referenciales, estimaciones en base a aproximaciones para efectos de diseño, que permiten estimar la caída de presión que sufre el fluido (aire) al atravesar el lecho de biomasa. Para una mayor precisión se debe realizar un estudio más detallado con métodos avanzados que requieren equipos especializados. Para determinar con precisión el diámetro equivalente se utilizan métodos de tamizado o análisis de imágenes por computadora que permiten obtener el tamaño promedio de las partículas. La esfericidad

se calcula mediante mediciones ópticas. La porosidad se mide utilizando métodos volumétricos o por desplazamiento de agua para evaluar el volumen de vacíos en el lecho.

#### 4.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA

A continuación, se presentan los resultados del análisis proximal y elemental de las muestras de biomasa de estiércol de vaca y alpaca que fueron enviadas al laboratorio:

**Tabla 8**

*Análisis proximal de la bosta de vaca y alpaca en base recibida (base ar)*

Biomasa	Carbono Fijo (%)	Materia Volátil (%)	Cenizas (%)	Contenido de Humedad (%)
Estiércol de vaca	9.37	70.83	11.44	8.36
Estiércol de alpaca	7.82	63.58	24.13	4.47

Nota: en la tabla se muestra los resultados del análisis proximal de las biomásas que se enviaron al laboratorio.

**Tabla 9**

*Análisis elemental de las biomásas expresado en base seca (base db)*

Biomasa	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)	Ash (%)
Estiércol de vaca	41.32	6.48	1.56	37.93	0.23	12.48
Estiércol de alpaca	36.38	5.34	2.04	30.63	0.37	25.24

Nota: en la tabla se muestra los resultados del análisis elemental de las biomásas que se enviaron al laboratorio.

Con los datos obtenidos en laboratorio del análisis proximal y elemental (Tabla 8 y Tabla 9), se calcularon los análisis proximal y elemental para base recibida (ar) y base seca libre de cenizas (daf), la metodología de estos cálculos se detalla en la sección de “materiales y métodos” y cuyos resultados se presentan a continuación:

**Tabla 10***Análisis elemental de las biomásas expresado en base seca y libre de cenizas (base daf)*

Biomasa	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
Estiércol de vaca	47.212	7.404	1.782	43.339	0.263
Estiércol de alpaca	48.662	7.143	2.729	40.971	0.495

Nota: en la tabla se muestra los resultados calculados del análisis elemental de las biomásas en base seca libre de cenizas.

**Tabla 11***Análisis elemental de la biomasa en base recibida (ar)*

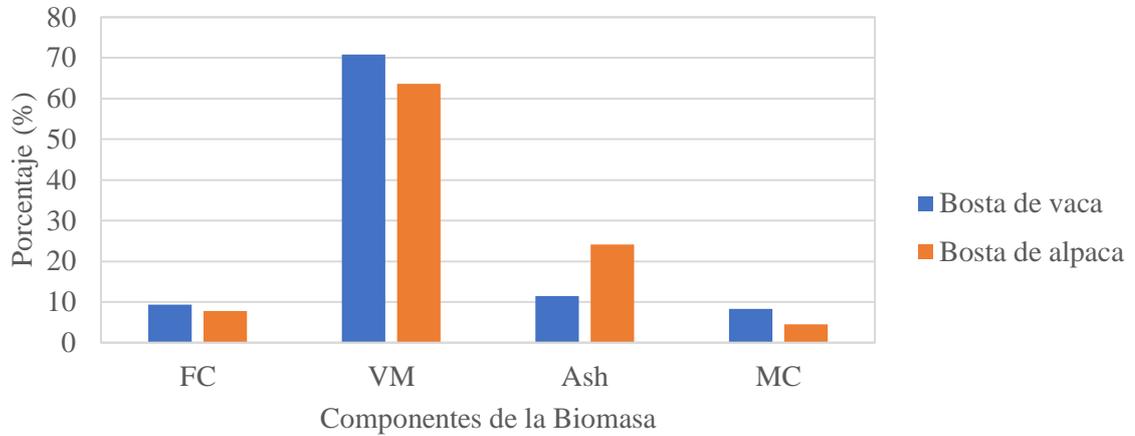
Biomasa	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)	Ash (%)	MC (%)
Estiércol de vaca	37.864	5.938	1.430	34.758	0.211	11.44	8.36
Estiércol de alpaca	34.745	5.100	1.948	29.253	0.353	24.13	4.47

Nota: en la tabla se muestra los resultados calculados del análisis elemental de las biomásas en base recibida.

A partir de los resultados obtenidos del análisis proximal se puede graficar y comparar visualmente los contenidos de carbono fijo, material volátil, cenizas y contenido de humedad. Como se puede visualizar en la gráfica de la Figura 43, la bosta de vaca destaca por su mayor contenido de material volátil con 70.83% frente a 63.58% en la bosta de alpaca, lo que favorece a la liberación de mayor cantidad de gas de síntesis por unidad de masa. El contenido de carbono fijo de la bosta de vaca resulto ser ligeramente mayor que la bosta de alpaca en una diferencia del 1.55%. El contenido de cenizas en la bosta de alpaca es mayor en 12.69% que la bosta de vaca lo que desfavorece en el poder calorífico de la biomasa bosta de alpaca. Por otro lado, bosta de alpaca tiene una humedad de 4.47% frente a 8.36% de la bosta de vaca, esto favorece a la bosta de alpaca ya que se utilizará menos energía para evaporar la humedad contenida en la bosta de alpaca lo que implica que puede transferir mayor cantidad de calor al sistema.

**Figura 43**

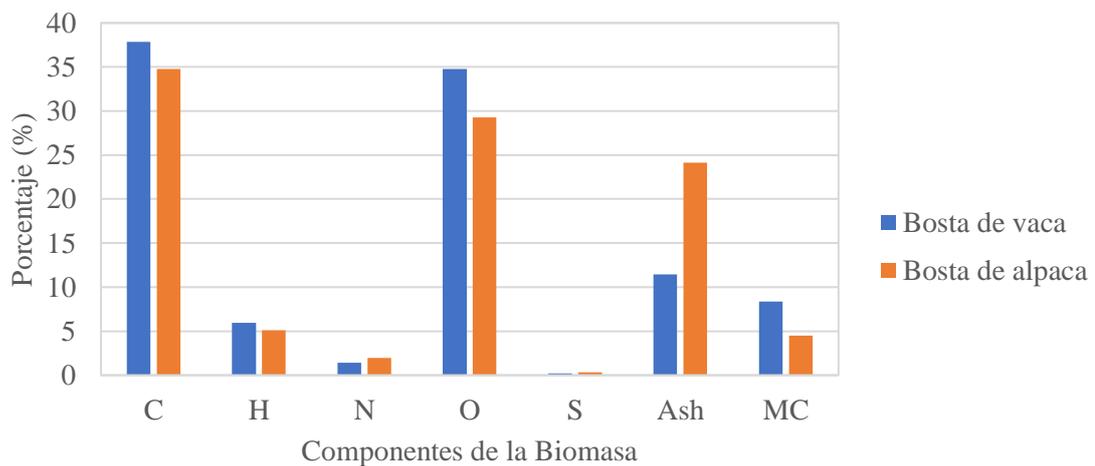
*Comparación de análisis proximal de la bosta de vaca y alpaca en base recibida (ar)*



Nota: MC, VM, Ash y FC son los porcentajes en masa de la humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo, respectivamente.

**Figura 44**

*Comparación de análisis elemental de la bosta de vaca y alpaca en base recibida (ar)*



Nota: C, H, O, N, S, Ash y MC son los porcentajes en masa de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, cenizas y contenido de humedad respectivamente.

Por otro lado, la Figura 44 muestra la comparación de los contenidos de carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno, azufre, cenizas y contenido de humedad en base recibida.

Como se puede apreciar la bosta de vaca tiene mayores contenidos de carbono, hidrogeno, oxigeno lo que implica que este elemento se volatilizara por lo que está relacionado de forma directa con el material volátil del análisis proximal. Una parte del carbono elemental de la biomasa se convertirá en material volátil y la fracción restante en carbono solido que quedará como material residual junto a las cenizas después de la gasificación.

#### 4.2.1. Formula empírica de las biomosas

En la Tabla 12 se presenta los resultados luego de los cálculos para obtener la formula empírica de la biomasa obtenido en base seca y libre de cenizas.

**Tabla 12**

*Formula química empírica de la molécula de biomosas*

Biomasa	Formula Empírica de la Biomasa	Masa Molar (g/mol)
Estiércol de vaca	$CH_{1.7614}O_{0.6315}N_{0.0481}S_{0.0038}$	24.66
Estiércol de alpaca	$CH_{1.8819}O_{0.6885}N_{0.0324}S_{0.0021}$	24.42

Nota: en la tabla se muestra los resultados calculados de las moléculas empíricas de los biomosas

De estas fórmulas empíricas de biomasa dependen los cálculos y estimaciones como del gas de síntesis, la combustión de la biomasa entre otras propiedades. Ya que al representar la biomasa con la formula empírica simplifica los análisis de combustión y la predicción del gas de síntesis.

#### 4.2.2. Poderes caloríficos

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de los cálculos de los poderes caloríficos superior e inferior expresados en diferentes bases de biomasa.

**Tabla 13***Poderes caloríficos superior y poder calorífico inferior de las biomásas*

<b>Biomasa</b>	En base recibida (ar) (kJ/kg)	En base seca (db) (kJ/kg)	En base seca y libre de cenizas (daf) (kJ/kg)
<b>Poder calorífico superior (HHV)</b>			
Estiércol de Vaca	16380.16	17874.46	20424.139
Estiércol de Alpaca	14615.187	15299.055	20469.45
<b>Poder calorífico inferior (LHV)</b>			
Estiércol de Vaca	14985.345	16558.241	18920.227
Estiércol de Alpaca	13478.387	14214.389	19018.586

Nota: en la tabla se muestra los resultados calculados del poder calorífico en base seca, base recibida y base seca libre de cenizas.

En la Tabla 13 se puede verificar que, en todas las bases de análisis, la bosta de vaca presenta un poder calorífico mayor que la bosta de alpaca, lo que nos da a entender que, por cada kilo, el estiércol de vaca tiene un mayor potencial energético.

**En base recibida (ar):** el poder calorífico superior del estiércol de vaca es de 16380.16 kJ/kg, mientras que el de alpaca llega a 14615.187 kJ/kg. Esto nos dice que el estiércol de vaca, así como se encuentra en forma natural, puede entregar más cantidad energía que el de alpaca. Esta diferencia puede deberse a que el estiércol de vaca tiene más contenido de carbono y menos cenizas.

**En base seca (db):** Cuando se quita la humedad, ambos tipos de estiércoles aumentan su poder calorífico. El estiércol de vaca sube a 17874.46 kJ/kg y el de alpaca a 15299.055 kJ/kg. Este incremento muestra que, al reducir



la humedad, ambos estiércoles se vuelven más eficientes energéticamente, aunque el de vaca sigue siendo mayor ligeramente.

**En base seca y libre de cenizas (daf):** si se elimina totalmente la humedad y las cenizas de la biomasa se consigue un poder energético puro de la biomasa. En esta base los valores de HHV son muy parecidos: 20424.139 kJ/kg para el estiércol de vaca y 20469.45 kJ/kg para el de alpaca. Esto nos dice que, cuando dejamos de lado el efecto de las cenizas, ambos estiércoles tienen un potencial energético casi similares. Sin embargo, en las bases donde se considera la ceniza, el estiércol de alpaca se ve más afectado, ya que tiene un contenido de cenizas más alto.

#### 4.2.3. Entalpia de formación de la biomasa

En la tabla siguiente se los resultados del cálculo de la entalpia de formación de las biomosas, debe destacarse que la entalpía de formación calculada es para la formula molecular empírica (ver Tabla 12)

**Tabla 14**

*Entalpia de formación de la biomasa*

Variable	unidad	Bosta de Vaca	Bosta de Alpaca
Entalpia de formación de la biomasa ( $\Delta H_{fbm}$ )	J/mol	-143954	-141600

#### 4.2.4. Densidad energética por volumen de biomasa

Es otro parámetro clave en el análisis energético de la biomasa, existen dos formas de representar la energía contenida en la biomasa el primero es la *densidad energética por unidad de masa* (poder calorífico) y el segundo es la *densidad*

energética por unidad de volumen ( $DEV_{bm}$ ). La densidad energética volumétrica de la biomasa indica la cantidad de energía contenida por unidad de volumen, esto se puede calcular con la ecuación:

$$DEV_{bm} = \rho_{bm.a} \cdot LHV_{bm,ar} \quad (95)$$

Donde:

- $DEV_{bm}$ : Densidad energética por volumen de biomasa ( $\text{kJ/m}^3$ ).
- $\rho_{bm.a}$ : densidad aparente de la biomasa ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $LHV_{bm,ar}$ : poder calorífico inferior de la biomasa ( $\text{kJ/kg}$ ).

Reemplazando valores correspondientes en la ecuación (95) se obtiene los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 15**

*Densidad energética por volumen de biomasa*

Variable	unidad	Bosta de Alpaca	Bosta de Vaca
Densidad energética por volumen de biomasa ( $DEV_{bm}$ )	$\text{MJ/m}^3$	3387.94	1659.10

Como se puede observar la bosta de alpaca tiene un contenido energético por volumen superior ( $3387.94 \text{ MJ/m}^3$ ) frente a la bosta de vaca ( $1659.10 \text{ MJ/m}^3$ ) a pesar de presentar un bajo poder calorífico que la bosta de vaca.

#### **4.3. PRIMERA ETAPA - RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL**

En esta sección se muestran los resultados obtenidos luego de realizar los cálculos operativos que se detallaron en la sección de métodos.

### 4.3.1. Utilizando bosta de alpaca como combustible

#### 4.3.1.1. Índice de gasificación específica

En la Tabla 16 se muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al modelo experimental usando bosta de alpaca como combustible, del cual se obtuvo un tiempo promedio de arranque de 6.93 minutos, un tiempo efectivo de funcionamiento de 66.31 minutos y un Índice de Gasificación Específica (*IGE*) promedio de 91.05 kg/m<sup>2</sup>-h.

La variable más importante que deben destacarse en esta sección es el Índice de Gasificación Específica (*IGE*) que será de mucha utilidad en el diseño del modelo final del gasificador.

**Tabla 16**

*Resultados de pruebas para la bosta de alpaca*

<b>Variable</b>	<b>unidad</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
Masa de la biomasa consumida	kg	1.28	1.27	1.28	1.27
Tiempo de arranque	min.	6.78	7.00	7.00	6.93
Tiempo total de funcionamiento del reactor	min.	75.72	71.00	73.00	73.24
Tiempo efectivo de consumo de biomasa	min.	68.93	64.00	66.00	66.31
<b>Tasa de Gasificación Específica (<i>IGE</i>)</b>	kg/m <sup>2</sup> *h	87.88	93.77	91.50	<b>91.05</b>

#### 4.3.1.2. Control de tensión y flujo de aire en el ventilador

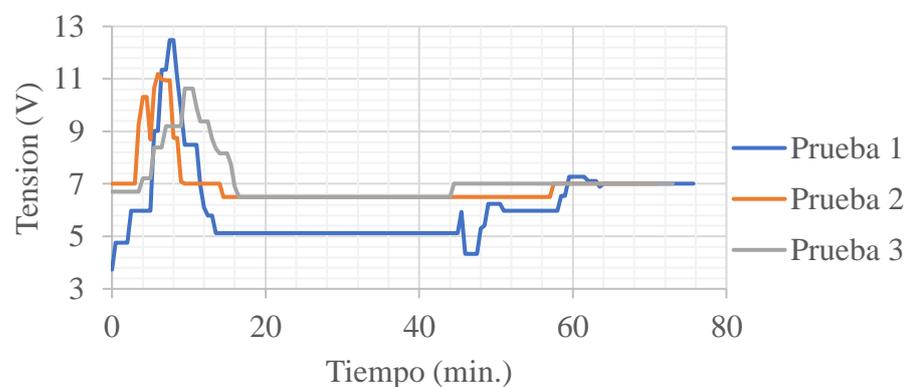
La tensión de alimentación se ajustó manualmente para controlar el flujo de aire en función a la inspección visual de la llama producida en el quemador y puede explicarse al dividir el tiempo total de

funcionamiento en dos periodos: *tiempo de arranque* y *tiempo efectivo de gasificación*, los cuales se describen a continuación:

*Tiempo de arranque*: para iniciar la llama se utilizó un combustible de arranque (alcohol 30 ml) mezclándolo con una pequeña cantidad de biomasa con el fin de proporcionar una fuente de calor para calentar el sistema y dar inicio de la gasificación, esta etapa requirió mayor cantidad de flujo de aire ya que se vio que con un flujo menor de aire no iniciaba la gasificación, por lo que se aumentó la tensión como se puede ver en la Figura 45 (0-7 min.). La demanda de aire en este periodo se debe la necesidad de generar más calor producido por la combustión parcial de la biomasa para calentar el sistema y alcanzar la temperatura mínima necesaria para que la biomasa empiece a pirolizarse, como se puede ver en la Figura 47, la temperatura promedio de la zona de reducción-pirólisis alcanzo de 577°C. Esta temperatura es fundamental para activar las reacciones químicas que transforman la biomasa en gas de síntesis.

### Figura 45

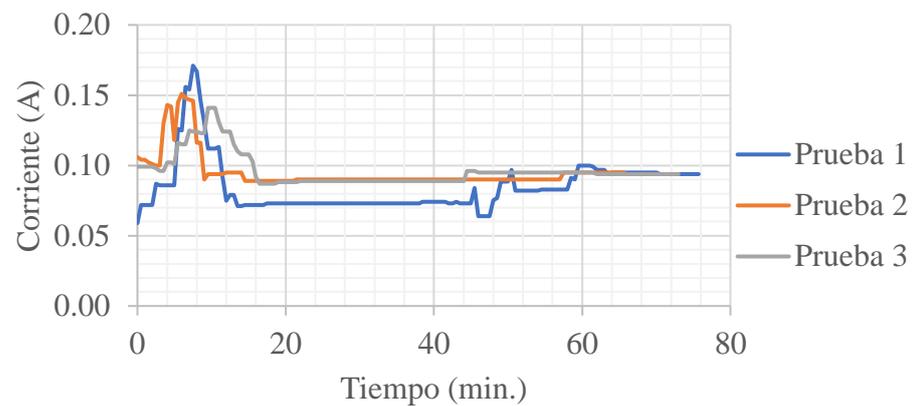
*Variación de tensión suministrada al ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de alpaca*



*Tiempo efectivo de gasificación:* una vez alcanzada la temperatura de operación se requirió disminuir la tensión del ventilador y por ende el flujo de aire como se puede ver en la Figura 45 (10-70min), esta disminución se debe a necesidad de mantener la temperatura de pirólisis por el calor generado por la combustión parcial de los gases de pirólisis (577°C).

### Figura 46

*Variación de la corriente consumida por el ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de alpaca*



En base a los gráficos mostrados se puede estimar en promedio una potencia máxima y potencia de operación (utilizando la fórmula de potencia eléctrica  $P=V \times I$ ) los cuales serán claves para estimar la potencia requerida del ventilador en el diseño del modelo final. Estimándose una potencia de 1.78 W en la fase de arranque, mientras que la potencia en la fase de operación se estima aproximadamente de 0.51 W.

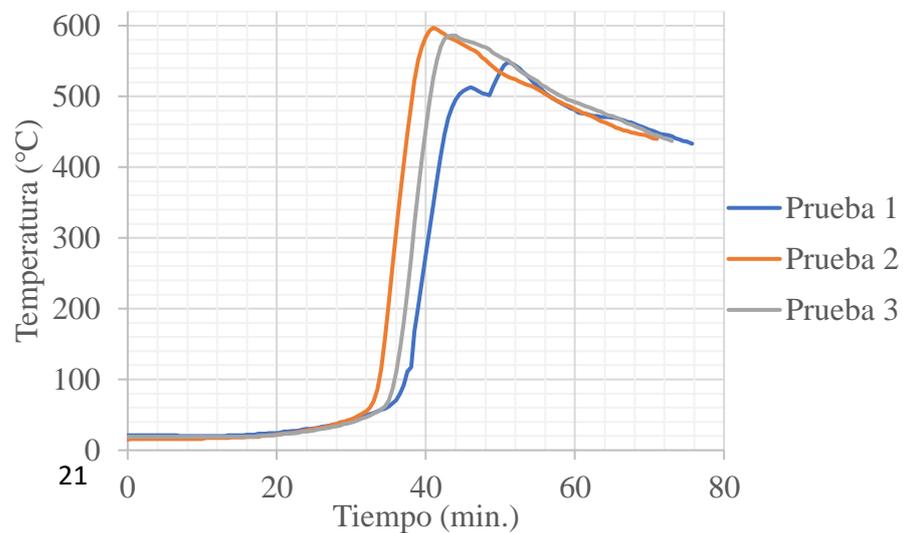
#### 4.3.1.3. Perfil de temperatura en el reactor de biomasa

Las gráficas mostradas en la Figura 47 se pueden ver los tres perfiles de la variación de la temperatura en la parte central del reactor

obtenidas en las pruebas 1, 2 y 3 utilizando como combustible bosta de alpaca. la evolución fue de manera creciente desde la temperatura ambiental ( $15^{\circ}\text{C}$ ) hasta alcanzar una temperatura máxima en promedio de  $578^{\circ}\text{C}$  a los 42 minutos desde el encendido, el cual refleja la temperatura de la zona de combustión parcial.

### Figura 47

*Grafica de variación de temperatura en la parte central del reactor en el proceso de gasificación de la bosta de alpaca*



Nota: en el grafico se aprecia la variación de temperatura en la parte central del reactor

## 4.3.2. Utilizando bosta de vaca como combustible

### 4.3.2.1. Índice de gasificación específica

En la Tabla 17 se presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al modelo experimental donde se puede observar la masa de biomasa utilizada fue un promedio de  $0.56\text{kg}$  que es la masa medida a partir del reactor lleno de combustible. El tiempo de consumo efectivo de biomasa fue de 22.83 minutos, es decir es el tiempo en que la biomasa se

consumió de manera constante, ya que se necesitó un tiempo de arranque de 4.17 minutos para estabilizar la gasificación este periodo incluye el consumo total del combustible iniciador de fuego (30ml de alcohol). Obteniéndose un Índice de Gasificación Especifica (*IGE*) en promedio de 116.37 kg/m<sup>2</sup>-h

**Tabla 17**

*Resultados de pruebas de la bosta de vaca*

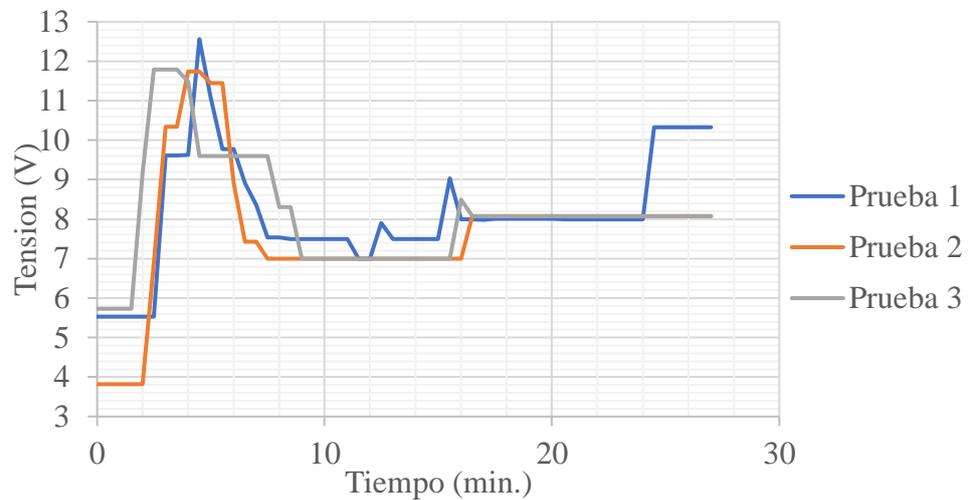
<b>Variable</b>	<b>unidad</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
Masa de la biomasa consumida	kg	0.55	0.56	0.57	0.56
Tiempo de arranque	min.	4.50	4.00	4.00	4.17
Tiempo total de funcionamiento del reactor	min.	27.00	27.00	27.00	27.00
Tiempo efectivo de consumo de biomasa	min.	22.50	23.00	23.00	22.83
<b>Índice de Gasificación Especifica (<i>IGE</i>)</b>	<b>kg/m<sup>2</sup> h</b>	116.41	115.53	117.18	<b>116.37</b>

#### **4.3.2.2. Control de tensión y flujo de aire en el ventilador**

Similar a lo descrito para las pruebas con bosta de alpaca el tiempo total de prueba se divide en dos periodos: *tiempo de arranque* y *tiempo efectivo de gasificación*. En la Figura 48 se puede observar la variación de tensión de alimentación al ventilador y en la Figura 49 se presenta la corriente que consumió el ventilador. Y en la Figura 50 se observa la variación de la temperatura en la parte central del reactor en las pruebas 1, 2 y 3 para la bosta de vaca.

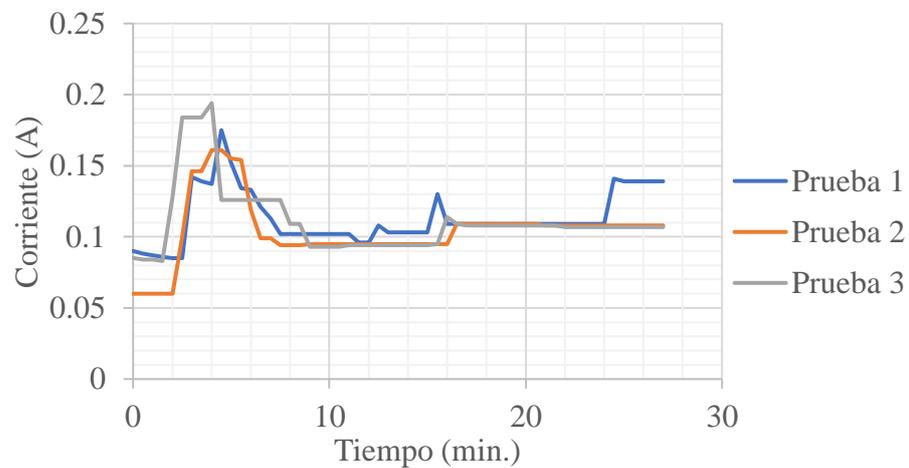
**Figura 48**

*Variación de tensión suministrada al ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de vaca*



**Figura 49**

*Variación de la corriente consumida por el ventilador durante el proceso de gasificación de la bosta de vaca*



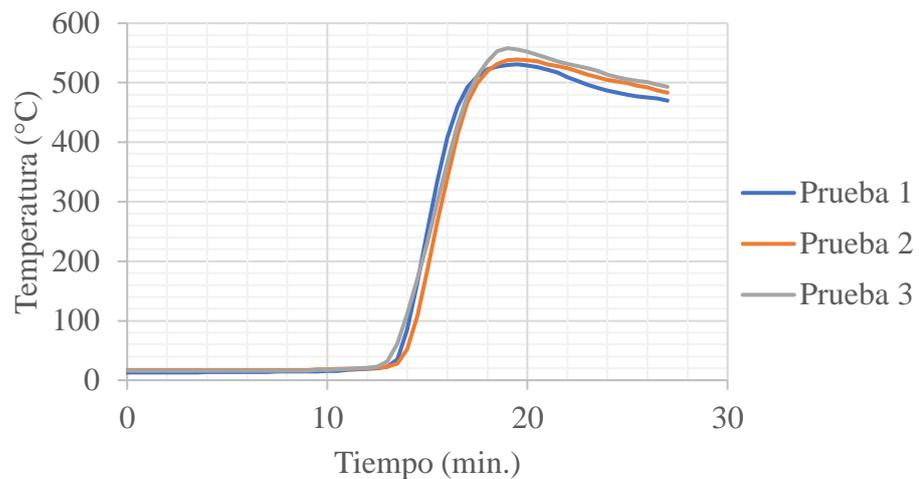
A partir de los grafico en las Figura 48 y Figura 49 se puede estimar la potencia máxima consumida por el ventilador el cual fue de 2.1W en la fase de arranque y una potencia de aproximadamente de 0.51W en la fase de operación.

#### 4.3.2.3. Perfil de temperatura en el reactor de biomasa

En la figura 34 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al modelo experimental, en el que se monitoreo la temperatura en la parte central del reactor. Como se puede observar la evolución de la temperatura fue desde la temperatura ambiental ( $15^{\circ}\text{C}$ ) alcanzando una temperatura máxima promedio de  $543^{\circ}\text{C}$  a 19 minutos desde el encendido, esta temperatura máxima refleja la temperatura de la zona de combustión parcial.

#### Figura 50

*Grafica de variación de temperatura en la parte central del reactor en el proceso de gasificación de la bosta de vaca*



Nota: en el grafico se aprecia la variación de temperatura en la parte central del reactor

#### 4.3.3. Resumen de los parámetros obtenidos de primera etapa de las pruebas del modelo experimental

En la Tabla 18 se muestra una comparación de los parámetros importantes obtenidos en las pruebas del modelo experimental usando biomasa bosta de alpaca

y bosta de vaca, como fuentes de combustible del gasificador, estos se analizan a continuación:

- **Tiempo efectivo de consumo de biomasa:** Como se explicó anteriormente representa el tiempo en que la biomasa es consumido activamente. Bajo un volumen fijo (5.093 L) de biomasa, la bosta de alpaca tuvo una duración en términos de tiempo de consumo (66.31min.) mayor que la bosta de vaca (22.83min.), lo cual se debe a la mayor densidad energética volumétrica que presenta la bosta de alpaca frente a la de vaca (ver Tabla 15).

**Tabla 18**

*Comparación de parámetros importantes en la gasificación de bosta de alpaca y bosta de vaca*

Variable	unidad	Bosta de Alpaca	Bosta de Vaca
Tiempo efectivo de consumo de biomasa	min.	66.31	22.83
Índice de Gasificación Específica ( <i>IGE</i> )	kg/m <sup>2</sup> -h	91.05	116.37
Potencia promedio consumida por el ventilador en la fase de arranque	W	1.78	2.1
Potencia promedio consumida por el ventilador en la fase de operación ( <i>P<sub>v</sub></i> )	W	0.51	0.51

- **Índice de gasificación específica:** Para la bosta de alpaca el IGE se obtuvo un valor de 116.37 kg/m<sup>2</sup>-h que es superior en comparación con 91.05 kg/m<sup>2</sup>-h para la bosta de vaca. Esto refleja que la bosta de vaca, aunque tiene un tiempo de consumo efectivo menor, permite una conversión más rápida de la biomasa en gas, lo que podría tener una ventaja en aplicaciones que requieren un suministro rápido de gas.

- **Potencia consumida por el ventilador:** Para la fase de arranque la bosta de vaca demandó una potencia promedio mayor de 2.1W frente a 1.78W para la bosta de alpaca, esto se debe a la forma geométrica de las partículas de biomasa, ya que las partículas de la bosta de vaca son más irregular que la bosta de alpaca, es decir que la bosta de alpaca a simple inspección visual tiene mayor esfericidad que bosta de vaca que presenta una menor esfericidad debido a la irregularidad de la superficie de las partículas que esta presenta.

Por otro lado, la potencia consumida durante la operación normal de la gasificación, ambas biomásas presentaron aproximadamente un consumo igual. Esto se debería, a pesar de que la potencia de arranque fue superior para la bosta de vaca, presenta mayores espacios vacíos entre partículas, es decir se debe a la mayor porosidad que tiene la bosta de vaca, lo cual es beneficioso para contra arrear la fricción debido a las irregularidades de la superficie de la partícula. Mientras que la bosta de alpaca tiene superficies más alisadas y es más compacta y presenta menor porosidad el lecho de biomasa. Estas son las razones por las cuales presentan potencias de operación aproximadamente iguales.

**Tabla 19**

*Parámetros como objetivos de la primera etapa*

Variable	unidad	Bosta de Alpaca	Bosta de Vaca
Índice de Gasificación Especifica (IGE)	kg/m <sup>2</sup> -h	91.05	116.37
Potencia promedio consumida por el ventilador en la fase de arranque	W	1.78	2.1
Potencia promedio consumida por el ventilador en la fase de operación (P <sub>V</sub> )	W	0.51	0.51

Por lo tanto, se concluye la PRIMERA ETAPA presentando la Tabla 19 como resumen de los valores obtenidos para la tasa de gasificación específica, la densidad aparente de la biomasa y la potencia máxima consumida por el ventilador. Estos resultados proporcionan datos clave que serán útiles en la fase de diseño del modelo final de la cocina gasificadora.

### **Figura 51**

#### *Medición de Temperatura en la superficie externa del reactor*



Nota: en figura se aprecia la temperatura máxima registrada durante las pruebas experimentales, se pintó de color negro la cobertura de chapa galvanizada para aumentar la precisión en la lectura.

Adicionalmente, la temperatura máxima registrada en la superficie exterior del reactor, como se puede apreciar en la Figura 51, se registró una temperatura máxima de 74.4 °C, pero esta temperatura es medida en un solo punto mientras que en otras zonas están a baja temperatura esto es particular de la cocina TLUD ya que la zona de gasificación se desplaza hacia abajo durante el funcionamiento como se puede ver en la Figura 47 y Figura 50, por lo tanto esta temperatura registrada también se desplaza hacia abajo, en consecuencia el cálculo de transferencia de calor por conducción y convección se vuelve complejo en este tipo de gasificadores, para simplificar estos cálculos y disminuir pérdidas térmicas

se debe aumentar el aislante térmico, se sugiere a 2 pulgadas de espesor para considerar en reactor un sistema adiabático.

#### 4.3.4. Evaluación de los quemadores propuestos

En la Figura 52 se pueden observar los quemadores sometidos a la evaluación, los resultados se detallan a continuación:

- **Quemador “a”:** El comportamiento de este quemador se caracteriza por dificultades de encendido y la emisión de humo blanco. Cuando se logra encender la llama se apaga casi inmediatamente, quedando únicamente humo blanco visible, el color blanco del humo es un indicativo del vapor de agua. Este comportamiento indica que la combustión no está ocurriendo correctamente, probablemente debido a que no se logra alcanzar la temperatura suficiente para sostener las reacciones de combustión. Como explica Cengel & Boles (2015), “el combustible debe llevarse arriba de su temperatura de ignición para iniciar la combustión”. Según estos autores las temperaturas mínimas necesarias para que sustancias como el hidrógeno, el monóxido de carbono y el metano inicien su combustión en el aire atmosférico son aproximadamente 580°C, 610°C y 630°C, respectivamente. Además, las proporciones del combustible y del aire deben estar en un nivel apropiado para que comience la combustión. Por lo tanto, se puede afirmar que la causa principal es enfriamiento del gas de síntesis, esto se debería a que el gas ha perdido calor sensible durante el recorrido desde el reactor hasta la salida del quemador. En consecuencia, este quemador comercial de GLP no es adecuado para usar en la cocina gasificadora de biomasa tipo TLUD.

## Figura 52

### Fotografías de la Evaluación de Quemadores



Nota: en las figuras se aprecian la combustión del gas de síntesis en los quemadores preliminares, probados con el gas proveniente de la gasificación de bosta de alpaca.

- **Quemador “b”:** Cómo se puede observar el color de la llama es naranjado-encendido claramente visible lo que indica que hay una combustión incompleta. Este tipo de llama corresponde a un estado intermedio entre las llamas ilustradas en las posiciones “1” y “2” de la Figura 32 (mechero de Bunsen limitado de aire), como se mencionó previamente la coloración intensa es característica de la incandescencia de carbón sólido o carbono no quemado (hollín)



que se está formando en la llama, además de esto durante la prueba se visualizó la producción de humo. Por lo tanto, la causa más probable es la falta de oxígeno.

- **Quemador “c”:** El color que caracteriza es naranjado suave, lo que indica que la combustión es moderadamente completa y con una formación menor de hollín, este color correspondería a la posición “2” de la Figura 32 (mechero de Bunsen con válvula de aire medio cerrada).
- **Quemador “d”:** El color que caracteriza es naranjado suave con algunas zonas azuladas lo que indica que la combustión es mucho mejor que el quemador “c” la producción de hollín se ha visto mucho menor.

De acuerdo a los resultados observados el quemador “d” es la opción más adecuada, a pesar de tener una llama de color naranjado suave con zonas azuladas, muestra una combustión más eficiente en comparación con los otros quemadores y además la producción de hollín es mínima. Por otro lado, como se pudo observar en el quemador “a”, es importante que el calor sensible del gas de síntesis desde la zona de gasificación hasta el quemador, debe ser mínima para que las reacciones de combustión del gas de síntesis se mantengan en el tiempo, lo que esto implica que el reactor debe aumentarse el aislamiento térmico ya que el modelo experimental se diseñó con 25 mm de aislamiento, por lo cual se recomienda duplicar el espesor de aislamiento para que la combustión del gas de síntesis y del sistema sea más eficiente.

Además, el quemador “d” debe modificarse su altura para que esté más cerca a la salida del reactor, lo que ayudaría a evitar que el gas de síntesis pierda calor sensible durante su recorrido, por lo que se recomendó que para el modelo final tenga una altura de 17 mm a 20 mm.

### **Figura 53**

*Determinación de la altura del soporte de la olla*



Nota: en la figura se aprecia la determinación experimental de la altura a la que debe estar la olla en el quemador “d”, se puede ver en la figura que esta altura debe estar aproximadamente a 85 mm.

Finalmente, durante las pruebas del prototipo experimental, al quemador “d” se instaló unos soportes para sostener la olla como se puede apreciar en la Figura 53 para determinar la altura adecuada que comprende entre la olla y los orificios de la salida de gases. Durante la prueba esta altura se varió de acuerdo a la presencia de humo y color de la llama en la combustión del gas de síntesis, se observó que mientras más cerca estaba la olla a los orificios la presencia de humo en la combustión era notable y los niveles de monóxido de carbono (CO) superaba los límites seguro (87 ppm), sin embargo, cuando se alejaba no había presencia de humos y los

niveles de CO se mantenían en los límites seguros (10 ppm), por las pruebas realizadas se determinó que a una altura de aproximadamente 85 mm era adecuada. Cabe mencionar que estos resultados fueron determinados usando bosta de alpaca.

#### **4.3.5. Evaluación del desgaste por altas temperaturas en un reactor TLUD fabricado en acero ASTM A1008**

En la Figura 54 se aprecia un modelo experimental (se define para adelante como modelo *cero*) construido en base a las geometrías establecidas por Belonio (2005) en cuanto a las dimensiones del reactor y quemador, y fabricado completamente en acero LAF ASTM A1008 Gr. CS tipo B.

#### **Figura 54**

*Modelo cero de un gasificador TLUD*



Nota: en la figura se aprecia una cocina gasificadora construida completamente de acero al carbono, en base a las medidas dadas por Belonio (2005) (solo reactor y quemador cumplen las dimensiones dadas por Belonio), el cual utiliza cenizas de biomasa como aislamiento térmico.

Este modelo utilizó ceniza de biomasa como aislante térmico, esto por indicaciones de Belonio. Fue sometido a condiciones de operación prolongadas durante un período de un año con una frecuencia promedio de uso de cuatro veces por semana. Cabe mencionar que este modelo no forma parte oficial de la presente investigación, pero sus resultados sirven como referencia para analizar el comportamiento del material y los efectos del desgaste por altas temperaturas en condiciones prolongadas de operación.

En la Figura 55, se muestra el modelo cero, donde se retiró la cobertura externa que contenía cenizas como aislante térmico. El análisis visual del reactor muestra signos claros de desgaste térmico, como:

- **Oxidación del material:** La exposición prolongada al calor intenso, al oxígeno presente en el aire y a la humedad propia de la gasificación, provocó la formación de una capa de óxido en las paredes internas del reactor y además en las superficies externas del reactor, este último podría deberse a la presencia oxígeno del aire y sales minerales en las cenizas que se usó como aislante térmico Además, esta oxidación generó una disminución del espesor del material, comprometiendo la resistencia estructural del reactor con el tiempo..
- **Deformaciones estructurales:** Las altas temperaturas, combinadas con las tensiones térmicas, causaron deformaciones en el material, como se puede visualizas en la parte inferior del reactor de la Figura 55, esta deformación observada localizada en la parte inferior, se debe a la presencia del carbón residual o biocarbón. Según Roth (2013), las temperaturas durante la combustión del carbón residual en un reactor

pueden superar fácilmente los 1,000 °C, lo que genera un brillo naranja en el carbón. Estas temperaturas extremas comprometen al material del reactor a un estrés considerable, lo que puede causar daños mayores. Por esta razón es importante apagar el ventilador al finalizar la gasificación.

Por las observaciones descritas, el acero LAF ASTM A1008 que no están diseñados para soportar temperaturas extremas durante largos periodos sin protección adicional, como recubrimientos cerámicos. El análisis sugiere la necesidad de considerar materiales alternativos, como aceros inoxidable (por ejemplo, 304L) o recubrimientos protectores, para mejorar la durabilidad del reactor en aplicaciones futuras.

### **Figura 55**

*Desgaste del reactor del modelo cero durante un año*



Nota: en la figura se muestra el desgaste de una cocina gasificadora TLUD durante un año con una frecuencia de uso de 4 veces por semana, en el cual se puede visualizar el deterioro por efectos de la oxidación y deformaciones por tensiones térmicas por las elevadas temperaturas.

#### 4.4. SEGUNDA ETAPA: RESULTADOS DEL PROTOTIPO FINAL

##### 4.4.1. Dimensionamiento del modelo final

Luego de los cálculos realizados en el diseño del reactor para el modelo final de la cocina gasificadora, los resultados obtenidos del diseño final del reactor para las biomásas de bosta de alpaca y de vaca se resumen en la Tabla 20.

**Tabla 20**

*Resultados de las variables calculada en el diseño para el modelo final del reactor*

Variable	Biomasa		Unidad
	Bosta de Vaca	Bosta de Alpaca	
Tasa de consumo de biomasa ( $\dot{m}_{bm}$ )	1.201	1.335	kg/h
Diámetro del reactor ( $D_r$ )	0.115	0.137	m
Altura del reactor ( $H_r$ )	1.226	0.423	m
Caudal de aire para la fase de arranque ( $Q_{aire}$ ) (15°C, 65.01kPa)	7.501	7.654	m <sup>3</sup> /h
Caída de presión en el reactor ( $\Delta P_{bm}$ )	1519.8	335.8	Pa
Potencia del ventilador ( $P_v$ ) (fase de arranque)	5.28	1.19	W

**Tasa de consumo de biomasa ( $\dot{m}_{bm}$ ):** La Tasa de consumo de biomasa calculado resulto ser ligeramente superior en la bosta de alpaca (1.335 kg/h) en comparación con la bosta de vaca (1.201 kg/h), esto se debe a la diferencia del poder calorífico de las biomásas, ya que para producir una potencia de 3.5 kW la bosta de alpaca debe consumirse en mayor cantidad en masa por presentar menor poder calorífico (13478kJ/kg) frente a la bosta de vaca que presenta un poder calorífico (14985 kJ/kg).



**Diámetro del reactor ( $D_r$ ):** El diámetro del reactor calculado resulto ser mayor para la bosta de alpaca (0.137 m) que para la bosta de vaca (0.115 m) esto se debe a la potencia de diseño y el poder calorífico de la biomasa, ya que para generar una potencia de 3.5kW la bosta de alpaca debe tener una tasa de gasificación superior a la de bosta de vaca por presentar bajo poder calorífico frente a la de vaca.

**Altura del reactor ( $H_r$ ):** La altura del reactor calculado resulto ser menor para la bosta de alpaca (0.423 m) frente a la bosta de vaca (1.226 m), esto indica que la bosta de vaca requiere un reactor más alto. Lo cual se debe a la baja densidad energética volumétrica que presenta la bosta de vaca (1659.10 MJ/m<sup>3</sup>) frente a la bosta de alpaca (3387.94 MJ/m<sup>3</sup>), en otros términos, para satisfacer con la demanda energética la bosta de vaca debe ocupar un volumen superior que la de alpaca, lo cual no es practico en términos de construcción del reactor por lo que las dimensiones del modelo final se tomaran en cuenta las calculadas para la bosta de alpaca.

**Caudal de aire ( $Q_{aire}$ ):** El flujo volumétrico del aire calculado presento aproximadamente iguales para ambas biomasa. Cabe señalar que este caudal de aire calculado es netamente teórico, en la práctica parte del aire que ingresa al reactor no reacciona completamente con la biomasa y sale sin participar en la combustión y/o gasificación.

**Caída de presión en el reactor ( $\Delta P_{bm}$ ):** la caída de presión calculada para la biomasa bosta de vaca (1519.8 Pa) resulto mayor frente a la bosta de alpaca (335.8 Pa), lo que implica una mayor resistencia al flujo de aire en el lecho de biomasa de bosta de vaca, lo cual se debe a la mayor altura calculada para el lecho

de esta biomasa, y además por las diferencias de la esfericidades y porosidades del lecho de biomasa.

**Potencia de operación del ventilador ( $P_v$ ):** La potencia necesaria para el flujo de aire para superar la resistencia del lecho de biomasa de bosta de vaca (5.28 W) resultó ser mayor en comparación con la bosta de alpaca (1.19 W).

#### 4.4.2. Prototipo final de la cocina gasificadora pirolítica

Luego de las pruebas experimentales y las observaciones de los modelos experimentales, en esta sección se detalla las características del modelo final de la cocina gasificadora tipo TLUD, a continuación se detalla las partes constructivas del quemador, reactor, ducto de aire, cenicero y el ventilador:

- **Quemador:** El quemador que se ha ejido es el modelo “d” como se puede ver en la Figura 52, debido a que mostro una combustión limpia (más detalles ver página 168). Debido a las altas temperaturas y a la oxidación que estará sometido el quemador, el material que se eligió para la parte cónica es de acero inoxidable grado 304L y para las partes restantes de acero A36.
- **Reactor:** Las dimensiones del modelo final serán iguales a las calculadas para la biomasa bosta de alpaca, ya que las dimensiones calculadas para el reactor son de tamaño práctico para la fabricación de la cocina, en cambio la de bosta de vaca la altura calculada del reactor es considerablemente grande en términos de fabricación y económicamente sería de costo elevado, ya que la altura de la cocina sería casi el tamaño de una persona. Sin embargo, si el usuario requiere utilizar bosta de vaca, en ese caso para cubrir la demanda energética, la biomasa requerida se dividirá de



aproximadamente en tres lotes de biomasa. El material elegido para la parte cilíndrica del reactor es de acero inoxidable grado 304L, debido su excelente soldabilidad y resistencia a la corrosión.

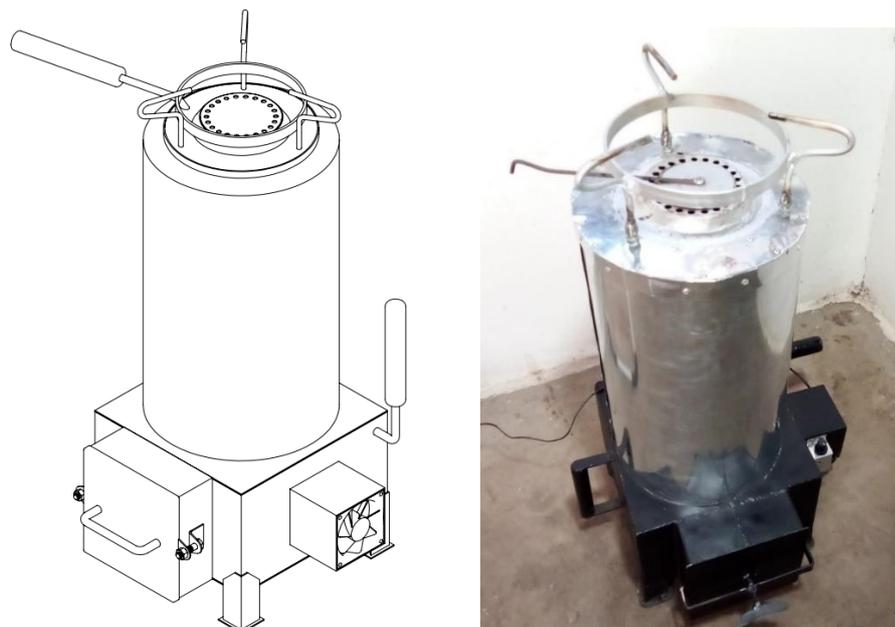
- **Aislamiento térmico:** La manta de fibra cerámica de densidad  $128 \text{ kg/m}^3$  fue seleccionada por su capacidad para soportar temperaturas de hasta  $1260^\circ\text{C}$ , lo cual es adecuado considerando que la temperatura máxima registrada en el reactor fue cercana a  $600^\circ\text{C}$ . Este material ofrece una baja conductividad térmica de  $0.15 \text{ W/mK}$  a  $600^\circ\text{C}$  (ver ANEXO 3), mejorando la eficiencia térmica del sistema al minimizar las pérdidas de calor, además de ser ligero, fácil de instalar y resistente a choques térmicos y químicos, asegurando durabilidad y un buen equilibrio entre rendimiento y costo, este aislante térmico se recubre con plancha galvanizada de espesor  $0.4\text{mm}$  como protección de seguridad.
- **Base del reactor:** se refiere a la base sobre el cual el reactor se apoya, este cumple la función de soporte todos los componentes de la cocina, el diseño se detalla en los planos, por la soldabilidad, por la resistencia altas temperaturas y su bajo costo se decide fabricar de material de acero LAF ASTM A1008, con recubrimiento de pintura de alta temperatura
- **Ventilador:** El ventilador YM1208PTS1 ha demostrado en pruebas del modelo experimental que es capaz de proporcionar el caudal de aire requerido ( $7.654 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y manejar la caída de presión en el sistema. Y por tanto se utilizará el mismo ventilador.
- **Soldadura:** Para unir estos materiales, se decide utilizar el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido conocido como proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding por sus siglas en ingles), ya que es

un proceso de soldadura más económico frente a los otros procesos y los materiales para este son comerciales en la región. Para las uniones entre acero al carbono y acero inoxidable, se emplea el electrodo E309L y en el caso de las uniones entre aceros al carbono, se utiliza el electrodo E6011, según recomendaciones normas AWS (2018).

El diseño final en su conjunto de la cocina gasificadora se presenta en la Figura 56 y los planos se detalla en el ANEXO 5.

### Figura 56

*Vista isométrica del prototipo final*



Nota: en las figuras se muestran el diseño final de la cocina gasificadora tipo TLUD, a la izquierda se muestra el modelo 3D en vista isométrica y a la derecha se aprecia el prototipo final construido.

#### 4.4.3. Prueba de ebullición de agua

Después de realizar las pruebas de ebullición del agua y en base al procedimiento descrito en la sección de métodos se obtuvieron los resultados que se presentan en las Tabla 21 y Tabla 22. Es importante destacar que, en las pruebas

realizadas con bosta de vaca, el reactor se llenó al 100% de su capacidad, mientras que en las pruebas con bosta de alpaca el llenado del reactor fue del 55% de su capacidad.

**Eficiencia térmica ( $\eta_T$ ):** La eficiencia térmica promedio utilizando la bosta de vaca resulto de 27.9%, mientras que utilizando bosta de alpaca alcanzo en promedio de 41.6%. Esta diferencia notable en la eficiencia refleja que la transferencia de calor usando bosta de alpaca es mayor que para la bosta de vaca. La mayor eficiencia con bosta de alpaca podría deberse a la menor cantidad del contenido de humedad que esta presenta según el análisis proximal que se obtuvo en laboratorio.

### Figura 57

*Fotografías de la prueba de ebullición de agua*



Nota: en la figura se muestra fotografías tomadas en la prueba de ebullición de agua en pleno funcionamiento de la cocina. En la izquierda se muestra la cocina utilizando bosta de vaca y en la derecha utilizando bosta de alpaca.

**Tiempo de operación de la cocina ( $t_T$ ):** El tiempo total de la prueba que comprende las fases de arranque en frío y la cocción a fuego lento, también muestra variaciones entre las dos biomásas. Cuando se utilizó bosta de vaca el reactor se llenó al 100% de su capacidad, resultando el tiempo promedio de

operación de 25.5 minutos. Mientras al 55% de la capacidad del reactor con bosta de alpaca fue mayor, con un promedio de 35.4 minutos. Esto indica que a pesar de operar al 55% de su capacidad del reactor con bosta de alpaca, el reactor muestra un funcionamiento prolongado que sería muy útil en la cocción de alimentos en las familias rurales.

**Tabla 21**

*Resultados de la prueba de ebullición de agua con la bosta de vaca*

<b>VARIABLES</b>	<b>Prueba n°1</b>	<b>Prueba n°2</b>	<b>Prueba n°3</b>	<b>unidad</b>
<b>Mediciones Iniciales</b>				
Masa de la cocina gasificadora vacía ( $m_{cocina}$ )	10.719	10.711	10.706	kg
Masa de cocina con combustible ( $m_{cocina+biomasa}$ )	11.287	11.283	11.277	kg
Masa del Combustible Consumida ( $m_{bm}$ )	0.568	0.572	0.571	kg
Masa del recipiente vacía (olla) ( $m_r$ )	0.816	0.818	0.815	kg
Masa del recipiente vacía con agua ( $m_{r+0,H2O}$ )	5.815	5.818	5.815	kg
Masa inicial del Agua ( $m_{H2O,i}$ )	4.999	5.000	5.000	kg
Temperatura del agua antes de la prueba ( $T_i$ )	14.000	15.000	14.000	°C
Temperatura ambiente ( $T_{0,l}$ )	15.000	14.000	14.000	°C
<b>Fase de Arranque en Frío</b>				
Temperatura de ebullición del agua ( $T_{eb,H2O}$ )	86.217	86.217	86.217	°C
Tiempo transcurrido para hervir el agua ( $t_1$ )	20.000	21.000	21.000	min
Masa del recipiente con agua cuando empieza a hervir ( $m_{r+H2O,1}$ )	5.774	5.801	5.778	kg
Masa del Agua al finalizar la fase de arranque en frío ( $m_{H2O,1}$ )	4.958	4.983	4.963	kg
Masa del Agua evaporada al finalizar la fase de arranque en frío ( $m_{H2O,evap,1}$ )	0.041	0.017	0.037	kg
<b>Fase de Cocción a Fuego Lento</b>				
Tiempo total de la prueba ( $t_T$ )	25.000	25.600	26.000	min.
Masa total de la cocina gasificadora al finalizar el ensayo ( $m_{cocina,cenizas,carbon}$ )	10.853	10.861	10.864	kg
Masa de cenizas y carbón residual ( $m_{Ash+Cr}$ )	0.134	0.150	0.158	kg
Masa final de la olla con agua ( $m_{r+H2O,f}$ )	5.740	5.766	5.807	kg
Masa Final del Agua ( $m_{H2O,f}$ )	4.924	4.948	4.992	kg
<b>VARIABLES CALCULADAS</b>				
Masa total de evaporación de agua durante la prueba ( $m_{H2O,evap}$ )	0.075	0.052	0.008	kg
Cambio de temperatura del agua ( $\Delta T_{H2O}$ )	72.217	71.217	72.217	°C

VARIABLES	Prueba n°1	Prueba n°2	Prueba n°3	unidad
Cambio de temperatura de la humedad de biomasa ( $\Delta T_{H_2O,bm}$ )	71.217	72.217	72.217	°C
Masa de carbón residual ( $m_{Cr}$ )	0.069	0.085	0.093	kg
Energía contenida en el combustible ( $E_{bm}$ )	8497.345	8556.985	8542.025	kJ
Energía contenida en el carbón restante ( $E_{Cr}$ )	2263.882	2773.673	3039.825	kJ
Energía transferida al agua ( $E_{H_2O}$ )	1680.697	1608.089	1529.579	kJ
<b>Eficiencia térmica (<math>\eta_T</math>)</b>	<b>26.96</b>	<b>27.81</b>	<b>27.80</b>	<b>%</b>

Nota: en la tabla se muestra los resultados obtenidos en la prueba de ebullición de agua utilizando bosta de vaca.

**Tabla 22**

*Resultados de la prueba de ebullición de agua con la bosta de alpaca*

VARIABLES	Prueba n°1	Prueba n°2	Prueba n°3	unidad
<b>Mediciones Iniciales</b>				
Masa de la cocina gasificadora vacía ( $m_{cocina}$ )	10.715	10.712	10.712	kg
Masa de cocina con combustible ( $m_{cocina+biomasa}$ )	11.416	11.417	11.412	kg
Masa del Combustible Consumida ( $m_{bm}$ )	0.701	0.705	0.700	kg
Masa del recipiente vacía (olla) ( $m_r$ )	0.815	0.816	0.816	kg
Masa del recipiente vacía con agua ( $m_{r+0,H_2O}$ )	5.818	5.817	5.816	kg
Masa inicial del Agua ( $m_{H_2O,i}$ )	5.003	5.001	5.000	kg
Temperatura del agua antes de la prueba ( $T_i$ )	14.000	13	14.000	°C
Temperatura ambiente ( $T_{0,l}$ )	13.000	13	13.000	°C
<b>Fase de Arranque en Frío</b>				
Temperatura de ebullición del agua ( $T_{eb,H_2O}$ )	86.217	86.217	86.217	°C
Tiempo transcurrido para hervir el agua ( $t_1$ )	17.50	17.82	17.43	min.
Masa del recipiente vacía con agua cuando empieza a hervir ( $m_{r+H_2O,1}$ )	5.802	5.801	5.801	kg
Masa del Agua al finalizar la fase de arranque en frío ( $m_{H_2O,1}$ )	4.987	4.985	4.985	kg
Masa del Agua evaporada al finalizar la fase de arranque en frío ( $m_{H_2O,evap,1}$ )	0.016	0.016	0.015	kg
<b>Fase de Cocción a Fuego Lento</b>				
Tiempo total de la prueba ( $t_T$ )	34.75	36.33	35.20	min
Masa total de la cocina gasificadora al finalizar el ensayo ( $m_{cocina, cenizas, carbon}$ )	10.973	10.976	10.965	kg
Masa de cenizas y carbón residual ( $m_{Ash+Cr}$ )	0.258	0.264	0.253	kg
Masa final de la olla con agua ( $m_{r+H_2O,f}$ )	5.330	5.251	5.275	kg
Masa Final del Agua ( $m_{H_2O,f}$ )	4.515	4.435	4.459	kg
<b>Variables Calculadas</b>				
Masa total de evaporación de agua durante la prueba ( $m_{H_2O,evap}$ )	0.488	0.566	0.541	kg
Cambio de temperatura del agua ( $\Delta T_{H_2O}$ )	72.217	73.217	72.217	°C

Variabes	Prueba n°1	Prueba n°2	Prueba n°3	unidad
Cambio de temperatura de la humedad de biomasa ( $\Delta T_{H_2O,bm}$ )	73.217	73.217	73.217	°C
Masa de carbón residual ( $m_{Cr}$ )	0.089	0.094	0.084	kg
Energía contenida en el combustible ( $E_{bm}$ )	9438.46	9492.32	9425.00	kJ
Energía contenida en el carbón restante ( $E_{Cr}$ )	2914.24	3079.38	2758.15	kJ
Energía transferida al agua ( $E_{H_2O}$ )	2615.29	2811.90	2734.16	kJ
<b>Eficiencia térmica (<math>\eta_T</math>)</b>	<b>40.09</b>	<b>43.85</b>	<b>41.01</b>	<b>%</b>

Nota: en la tabla se muestra los resultados obtenidos en la prueba de ebullición de agua utilizando bosta de alpaca.

#### 4.4.3.1. Variables calculadas de la prueba de ebullición de agua

De los resultados de la prueba de ebullición de agua se calculan los parámetros claves, que serán de mucha utilidad para los cálculos de la predicción del gas de síntesis, balances de masa y energía, para el reactor, los cálculos se realizaron considerando el tiempo promedio total de la prueba ( $t_T$ ), los resultados promediados se presentan a continuación:

**Tabla 23**

*Variables calculadas para la predicción del gas de síntesis.*

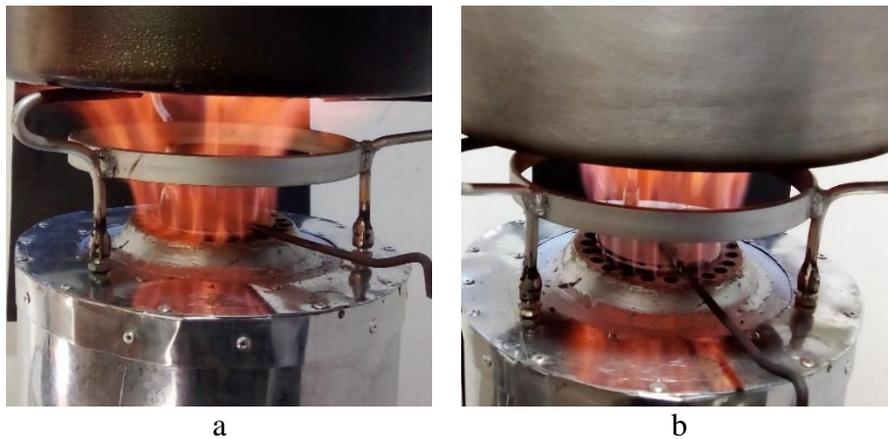
Variabes	Bosta de vaca	Bosta de alpaca	Unidad
Masa del Combustible Consumida ( $m_{bm}$ )	0.570	0.702	kg
Masa de Carbono Residual ( $m_{CS}$ )	0.082	0.089	kg
Tiempo Total de Prueba ( $t_T$ )	25.533	35.428	min
Tasa de Consumo de Biomasa ( $\dot{m}_{bm}$ )	1.340	1.18890	kg/h
Potencia Entregada por la Biomasa ( $\dot{E}_{bm}$ )	5569.268	4446.571	W
Potencia de Energía Retenida en el Carbón Residual ( $\dot{E}_{CS}$ )	1757.481	1372.396	W
Potencia Entregada al Agua ( $\dot{E}_{agua}$ )	1063.626	1279.809	W

#### 4.4.4. Evaluación visual de la combustión del gas de síntesis del modelo final.

En las Figura 58 se muestran el aspecto visible de la llama de la combustión del gas de síntesis tomadas (fotografía) a la mitad del periodo de funcionamiento en la prueba de ebullición de agua, en la figura a) se observa la combustión del gas de la bosta de vaca y en la figura b) se observa la combustión del gas de bosta de alpaca.

#### Figura 58

*Aspecto de la llama en los quemadores del gas de síntesis*



Nota: en las figuras se aprecian la combustión del gas de síntesis de la gasificación de las biomásas. En la figura a se aprecia la combustión del gas de bosta de vaca y en la figura b la combustión del gas de bosta de alpaca.

En la figura a) se observa la condensación del alquitrán (color negro de aspecto viscoso) en las paredes de la olla lo que indica que existe una combustión deficiente, que podría deberse a una combustión a baja temperatura, ya que para reducir el alquitrán se debe alcanzar altas temperaturas en la zona de combustión para fomentar el craqueo térmico (Basu, 2013).

En la figura b) se puede apreciar una combustión más limpia, ya que no se muestra la formación de alquitrán, solo se presenta pequeñas formaciones de

carbonilla en la parte inferior de la olla, lo que indica que la combustión con el gas de bosta de alpaca es mejor que la obtenida con el gas de bosta de vaca. En la Figura 59 se observa la combustión del gas de la bosta de alpaca tomada fotografía con un fondo oscuro, como se puede observar la llama tiene colores azules en la parte inferior y anaranjadas en la parte superior confirmando que la combustión es más eficiente.

### Figura 59

*Color de la llama de la combustión del gas de síntesis de la bosta de alpaca*



Nota: En la figura se aprecia el color del fuego de la combustión del gas de la bosta de alpaca, tomado en un fondo oscuro, ver ANEXO 9.

#### 4.4.5. Monitoreo de los niveles de monóxido de carbono

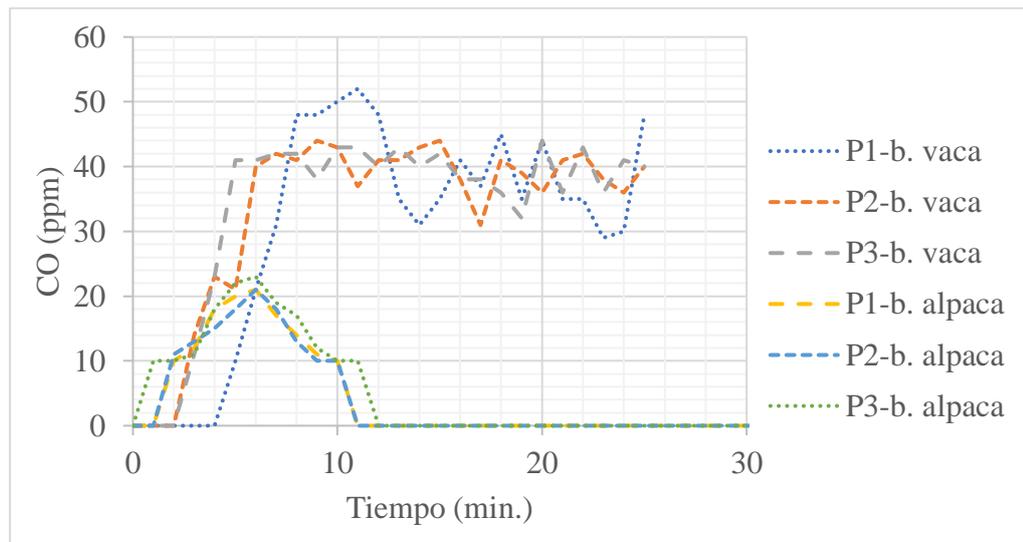
La Figura 60 muestra los niveles de monóxido de carbono (CO) en PPM durante las pruebas de ebullición de agua en la cocina de gasificadora con bosta de vaca y alpaca. En las pruebas con bosta de vaca, los niveles de CO aumentaron rápidamente en los primeros 5 minutos y se estabilizaron con fluctuaciones entre 40 y 50 PPM durante la prueba, lo que indica una combustión incompleta y una liberación significativa de gases no quemados. En cambio, las pruebas con bosta de alpaca mostraron picos más bajos y niveles promedio por debajo de 30 PPM,

reflejando una combustión más eficiente y completa, con un promedio estimado de aproximadamente 9 PPM.

Según las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2010), los niveles máximos permisibles de monóxido de carbono (CO) en interiores son de 100 mg/m<sup>3</sup> (87 ppm) en un promedio de 15 minutos, 35 mg/m<sup>3</sup> (30 ppm) en 1 hora y 10 mg/m<sup>3</sup> (8.7 ppm) en 8 horas, valores diseñados para proteger la salud humana en espacios cerrados. En las pruebas con bosta de vaca, los niveles superaron los 30 PPM en varios momentos, indicando un posible riesgo para la salud si no se implementa una ventilación adecuada. Por otro lado, los niveles observados con la bosta de alpaca fueron más bajos y se mantuvieron dentro de rangos más seguros, mostrando que este tipo de biomasa produce menos emisiones perjudiciales y permite una combustión más limpia.

### Figura 60

*Niveles de monóxido de carbono en PPM, medidos a la cocina gasificadora durante las pruebas de ebullición del agua*



Nota: en el grafico se aprecia la variación de los niveles de monóxido de carbono durante las pruebas experimentales, en el ANEXO 10 se muestra un video donde se esta midiendo el CO en pleno funcionamiento de la cocina con bosta de alpaca.

En conclusión, la bosta de alpaca se presenta como una opción más segura y eficiente, mientras que la bosta de vaca, aunque utilizable, requiere medidas adicionales para controlar las emisiones de CO y proteger la salud del usuario. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar adecuadamente la biomasa y optimizar las condiciones de combustión para minimizar riesgos y mejorar el rendimiento.

#### 4.4.6. Composición del gas de síntesis

Luego de la resolución del sistema de ecuaciones, ecuaciones ( 55 ), ( 56 ), ( 57 ), ( 58 ), ( 59 ), ( 62 ), ( 63 ) y ( 69 ), se obtienen la siguiente composición del gas de síntesis:

**Tabla 24**

*Composición molar y fracción molar del gas de síntesis de las biomosas*

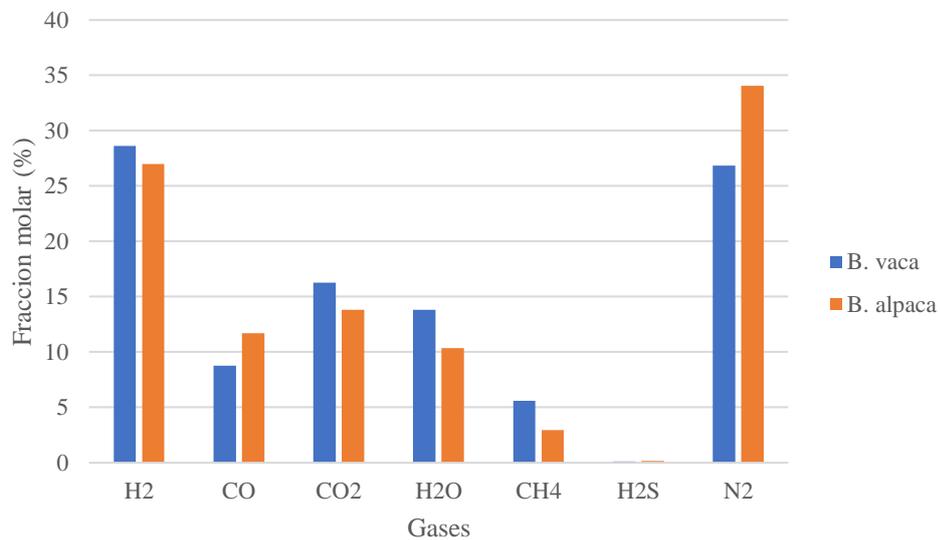
Gases	Bosta de Vaca		Bosta de Alpaca	
	$n_i$	$y_i$	$n_i$	$y_i$
$H_2$	0.5794	0.2861	0.6014	0.26969
$CO$	0.1775	0.08764	0.2613	0.11718
$CO_2$	0.3293	0.16259	0.3083	0.13824
$H_2O$	0.2802	0.13833	0.2305	0.10334
$CH_4$	0.1132	0.05592	0.0654	0.02933
$H_2S$	0.0021	0.00103	0.0038	0.00171
$N_2$	0.5436	0.26839	0.7593	0.34051

Nota: en la tabla se aprecia los resultados luego de la resolución del sistema de ecuaciones de la predicción del gas de síntesis. La composición del gas de síntesis se calculó utilizando las temperaturas determinadas experimentalmente en el reactor (ver sección 4.3).

En la Figura 61 se compara la cantidad de gases que componen el gas de síntesis, donde se observa que el gas este compuesto en términos de gases combustibles de hidrogeno, monóxido de carbono, metano y una mínima cantidad de sulfuro, estos gases son los que determinan el potencial energético del gas de síntesis.

**Figura 61**

*Comparación de la composición del gas de síntesis de las biomásas bosta de vaca y alpaca*



Nota: en la figura se muestra la comparación de la composición del gas de síntesis entre la bosta de alpaca y bosta de vaca.

La Tabla 25 muestra los poderes caloríficos calculados en base a los resultados de la predicción de gas de síntesis. Se puede observar que el poder calorífico inferior del gas de síntesis es mayor para el estiércol de vaca (1335.8 kJ/m<sup>3</sup>) en comparación con el de alpaca (1128.1 kJ/m<sup>3</sup>). Esto sugiere que el gas generado a partir de la bosta de vaca tiene un mayor potencial energético, posiblemente debido a su mayor contenido de carbono fijo y menor cantidad de cenizas en comparación con la bosta de alpaca.

**Tabla 25**

*Propiedades energéticas del gas de síntesis*

Parámetros	Estiércol de Vaca	Estiércol de Alpaca
El poder calorífico inferior a condiciones normales ( $LHV_{N,gas}$ , kJ/Nm <sup>3</sup> )	6221.196	5478.997



Parámetros	Estiércol de Vaca	Estiércol de Alpaca
El poder calorífico inferior ( $LHV_{gas}$ , kJ/m <sup>3</sup> )	1335.8	1128.1
Masa molar ( $M_{gas}$ , g/mol)	21.16	21.88
Densidad ( $\rho_{gas}$ , kg/m <sup>3</sup> )	0.2027	0.201
Entalpia molar ( $\Delta H_{gas}$ , kJ/kmol)	18175.1	18848.6

Nota: la tabla muestra las propiedades energéticas del gas combustible calculados en base a la composición predicha.

#### 4.5. BALANCE DE MASA EN EL REACTOR

En la Tabla 26 y se muestra los resultados de los cálculos del balance de masas realizado en el reactor, donde se puede verificar que la tasa de consumo de biomasa de la bosta de vaca (1.340 kg/h) es mayor que la de bosta de alpaca (1.189 kg/h) eso guarda relación con la tasa de producción de gas de síntesis, dado que usando bosta de vaca (1.812 kg/h) es mayor que usando bosta de alpaca (1.680 kg/h), esto se debería por las características particulares de las biomosas, ya que la bosta de vaca tiene mayor contenido de material volátil de un 70.83% frente a la de alpaca de 63.58% como se puede ver en la Tabla 8.

**Tabla 26**

*Tasa de consumo de reactivos*

Variabes	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Tasa de consumo de biomasa ( $\dot{m}_{bm}$ , kg/h)	1.340	1.189
Tasa de consumo de aire ( $\dot{m}_{aire}$ , kg/h)	0.818	0.928
Total, de tasa de consumo de reactivos ( $\dot{m}_{reactivos}$ , kg/h)	2.158	2.117

La tasa de consumo total de los reactivos coincide con la tasa de formación de los productos como se muestra en la Tabla 26, cumpliendo así con el principio de conservación de la masa.

De la Tabla 27 la tasa de formación de biocarbón de la bosta de vaca (0.346 kg/h) es inferior que la de alpaca (0.438 kg/h), esta diferencia debe a los contenidos de cenizas y carbono fijo, ya que la bosta de alpaca tiene un contenido de cenizas significativamente mayor que la de bosta de vaca.

**Tabla 27**

*Tasa de formación de productos*

VARIABLES	BOSTA DE VACA	BOSTA DE ALPACA
Tasa de formación de gas de síntesis ( $\dot{m}_{gas}$ , kg/h)	1.812	1.680
Tasa de formación de biocarbón ( $\dot{m}_{bioC}$ , kg/h)	0.346	0.438
Total, de tasa de formación de productos ( $\dot{m}_{productos}$ , kg/h)	2.158	2.117

A partir de la Tabla 26 y Tabla 27 se puede definir un parámetro importante que es útil para comparar que cantidad de biomasa se transforma en gas y biocarbón, este parámetro se puede definir como índice de gasificación e índice de carbonización de biomasa, matemáticamente se puede expresar con las siguientes ecuaciones:

$$I_C = \frac{\dot{m}_{bioC}}{\dot{m}_{bm}} \cdot 100\% \quad (96)$$

$$I_G = 1 - I_C \quad (97)$$

Donde:

- $I_C$ : índice de carbonización de la biomasa (%).
- $I_G$ : índice de gasificación de la biomasa (%).

- $\dot{m}_{bioc}$ : tasa de formación de biocarbón (kg/h).
- $\dot{m}_{bm}$ : tasa de consumo de biomasa (kg/h).

**Tabla 28***Índice de carbonización e índice de gasificación de las biomosas*

Variabes	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Índice de carbonización ( $I_C$ , %)	25.82	36.84
Índice de gasificación ( $I_G$ , %)	74.18	63.16

Como era de esperar, el índice de carbonización y índice de gasificación tienen correlación con los contenidos de carbono fijo y material volátil respectivamente (ver Tabla 8).

#### 4.6. BALANCE ENERGÉTICO EN EL REACTOR

En la Tabla 29 y Tabla 30 se presenta los resultados del análisis energético en el reactor, la potencia entregada por la biomasa bosta de vaca (5.569 kW) resulto ser superior que la de bosta de alpaca (4.447 kW) esto se debe al mayor poder calorífico que presenta la bosta de vaca frente a la de alpaca como se puede comparar en la Tabla 13.

**Tabla 29***Potencias energéticas de los reactivos*

Variabes	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Potencia entregada por la biomasa ( $\dot{E}_{bm}$ , kW)	5.569	4.447
Potencia entregada por el aire ( $\dot{E}_{aire}$ , kW)	0	0
Total, de potencia energética de los reactivos ( $\dot{E}_{reactivos}$ , kW)	5.569	4.447

La potencia total del gas de síntesis de la bosta de vaca resulto superior que la bosta de alpaca, esto podría estar relacionado con el mayor contenido de material volátil que presenta la bosta de vaca en comparación con la de bosta de la alpaca (ver Tabla 8) sumado a la mayor tasa de gasificación que presento la bosta de vaca.

**Tabla 30***Potencias energéticas de los productos*

Variabes	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Potencia total del gas de síntesis ( $\dot{E}_{gas}$ , kW)	3.749	3.021
Potencia de energía total residual en el biocarbón ( $\dot{E}_{bioC}$ , kW)	1.820	1.426
Total, de potencia energética de los productos ( $\dot{m}_{productos}$ , kW)	5.569	4.447

#### 4.6.1. Eficiencia del reactor

La eficiencia del reactor utilizando bosta de alpaca fue ligeramente superior que, usando la bosta de vaca, podría decirse que son iguales, ya que para diseñar el reactor se tomó como valor estimado del 70% resultando el valor real calculado cercano a este.

**Tabla 31***Eficiencias térmicas del reactor para las biomásas de bosta de vaca y alpaca*

Variabes	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Eficiencia térmica del reactor ( $\eta_R$ , %)	67.3	67.9

#### 4.7. BALANCE ENERGÉTICO EN EL QUEMADOR

En la tabla siguiente se presenta los resultados de las energías que intervienen en el análisis energético den el reactor. La potencia transferida al agua por el quemador

usando bosta de alpaca (1.279 kW) fue más efectivo que con la bosta de vaca (1.064 kW), mientras usando bosta de vaca (2.686 kW) las pérdidas térmicas fueron superior comparando con el uso de bosta de alpaca (1.741 kW). Lo que implica que el quemador es más eficiente usando bosta de alpaca (ver Tabla 33), mientras para la bosta de alpaca se requiere una cámara de combustión específicamente diseñado para esta biomasa.



**Tabla 32**

*Potencia que intervienen en el quemador*

Variabes	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Potencia transferida al agua ( $\dot{E}_{agua}$ , kW)	1.064	1.279
Potencia de pérdidas térmicas en el quemador ( $\dot{E}_{pT}$ , kW)	2.686	1.741
Total, de potencia entregada por el gas (kW) ( $\dot{E}_{gas}$ )	3.749	3.020

#### 4.7.1. Eficiencia térmica del quemador

La eficiencia del quemador usando bosta de alpaca resulto ser superior que la usando bosta de vaca, esto se reflejó visualmente durante la prueba de ebullición de agua, como se puede apreciar en la Figura 58, usando bosta de vaca las pérdidas se debieron a la mala combustión de su gas de síntesis, por la presencia de alquitranes en el gas.

**Tabla 33**

*Eficiencia térmica del quemador*

Variables	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Eficiencia térmica del quemador ( $\eta_Q$ , %)	28.37	42.4

#### 4.8. BALANCE ENERGÉTICO EN LA COCINA GASIFICADORA

Los resultados del balance energético de la cocina gasificadora se presentan en las Tabla 34 y Tabla 35, los resultados demuestran que la energía entregada al sistema ( $\dot{E}_e$ ) es igual a las energías que salen del sistema ( $\dot{E}_s$ ) cumpliendo con el principio de conservación de energía.

**Tabla 34**

*Potencias energéticas entregada a la cocina de gas de síntesis*

Variables	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Potencia entregada por la biomasa ( $\dot{E}_{bm}$ , kW)	5.569	4.447
Total, de potencia entregada a la cocina de gas de síntesis ( $\dot{E}_e$ , kW)	5.569	4.447

**Tabla 35***Potencias energéticas de salidas de la cocina de gas de síntesis*

VARIABLES	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Potencia entregada al agua (potencia útil) ( $\dot{E}_{agua}$ , kW)	1.064	1.280
Potencia energética total residual en el biocarbón ( $\dot{E}_{bioC}$ , kW)	1.820	1.426
Potencia de pérdidas térmicas en el quemador ( $\dot{E}_{pT}$ , kW)	2.686	1.741
Total, de potencia de salida de la cocina de gas de síntesis ( $\dot{E}_S$ , kW)	5.569	4.447

#### 4.8.1. Eficiencia térmica de la cocina de gasificadora

La eficiencia mostrada en la Tabla 36 son las eficiencias térmicas de la cocina gasificadora, del cual la eficiencia térmica de la cocina usando bosta de alpaca (41.6%) fue superior a la de bosta de vaca (27.9%), demostrando que el diseño final de la cocina es adecuado especialmente para el uso de la bosta de alpaca, mientras para la bosta de vaca, implica que se requiere mejora la eficiencia, con un diseño de la cámara de combustión específicamente para el uso de bosta de vaca.

**Tabla 36***Eficiencias térmicas de la cocina de gas de síntesis*

VARIABLES	Estiércol de Vaca	Estiércol de Alpaca
Eficiencia térmica de la Cocina ( $\eta_T$ , %)	27.9	41.6

## **4.9. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA COCINA TRADICIONAL**

En esta sección se analiza el desempeño de la cocina tradicional luego de realizar la prueba de ebullición de agua utilizando bosta de alpaca y vaca como combustible. La evaluación comprende el análisis de los parámetros como eficiencia térmica, consumo de biomasa y emisiones de monóxido de carbono, los cuales son críticos para comprender las limitaciones y los impactos ambientales y de salud asociados a su uso.

### **4.9.1. Resultados de la prueba de ebullición de agua de la cocina tradicional**

En la Tabla 37 se presenta los resultados de la prueba de ebullición de agua para la cocina tradicional, sea obtenido resultados con diferencias significativas en el comportamiento del fuego y la eficiencia según el tipo de combustible utilizado. Con bosta de vaca (Figura 62), se alcanzó una eficiencia térmica de 16.94% con un consumo de 0.769 kg de combustible, logrando hervir el agua en 24.5 minutos. Durante la prueba, la combustión fue ligeramente estable con elevada emisión de humo y el fuego se mantuvo encendido sin interrupciones. Por otro lado, al utilizar bosta de alpaca (Figura 63), aunque la eficiencia térmica fue ligeramente superior (18.79%) con un consumo de 0.728 kg, el fuego fue muy inestable, requiriendo asistencia manual para el suministro de aire mediante un abanico. Hubo momentos en los que el fuego se apagaba, obligando a reencenderlo con cerillos, lo que dificultó alcanzar el punto de ebullición. El agua solo llegó a 74°C después de 44 minutos, evidenciando la complejidad de mantener una combustión eficiente con este tipo de biomasa en la cocina tradicional.

**Tabla 37**

*Resultados de la prueba de ebullición de agua de la cocina tradicional*

Variables	Prueba con b. vaca	Prueba con b. alpaca	unidad
Masa inicial del Agua ( $m_{H_2O,i}$ )	5.000	5.000	kg
Masa de biomas Consumida ( $m_{bm}$ )	0.769	0.728	kg
Temperatura del agua antes de la prueba ( $T_i$ )	15.000	13.000	°C
Temperatura ambiente ( $T_{0,l}$ )	14.000	14.000	°C
Temperatura de ebullición del agua ( $T_{eb,H_2O}$ )	86.217	86.217	°C
Temperatura final del agua ( $T_f$ )	86.00	74.00	°C
Tiempo transcurrido para hervir el agua ( $t_1$ )	24.50	(*)	min.
Tiempo total de prueba ( $t_T$ )	31.00	44.00	min.
Masa total de evaporación de agua durante la prueba ( $m_{H_2O,evap}$ )	0.126	0.012	kg
Masa de cenizas y carbón residual ( $m_{Ash+Cr}$ )	0.120	0.263	kg
Masa de carbón elemental residual ( $m_{Cr}$ )	0.032	0.087	kg
Energía contenida en el combustible ( $E_{bm}$ )	11504.06	9802.13	kJ
Energía contenida en el carbón restante ( $E_{Cr}$ )	1050.47	2864.54	kJ
Energía transferida al agua ( $E_{H_2O}$ )	1770.79	1303.85	kJ
<b>Eficiencia térmica (<math>\eta_T</math>)</b>	<b>16.94</b>	<b>18.79</b>	<b>%</b>

Nota: (\*) indica que no se logró llegar al punto de ebullición el agua en el recipiente.

**Figura 62**

*Cocina tradicional utilizando bosta de vaca como combustible*



Nota: en la figura se muestra la prueba de ebullición del agua a la cocina tradicional utilizando bosta de vaca, la fotografía se tomó en pleno funcionamiento, donde se puede ver la producción de humo.

Por otro lado, las concentraciones de monóxido de carbono (CO) resultaron como se muestra en la Figura 64. En el grafico se puede observar las emisiones para la bosta de vaca alcanzaron un pico de 45-50 ppm alrededor del minuto 20, manteniéndose altas hasta el minuto 30, con una disminución gradual hacia el final, reflejando una combustión más intensa pero contaminante.

### Figura 63

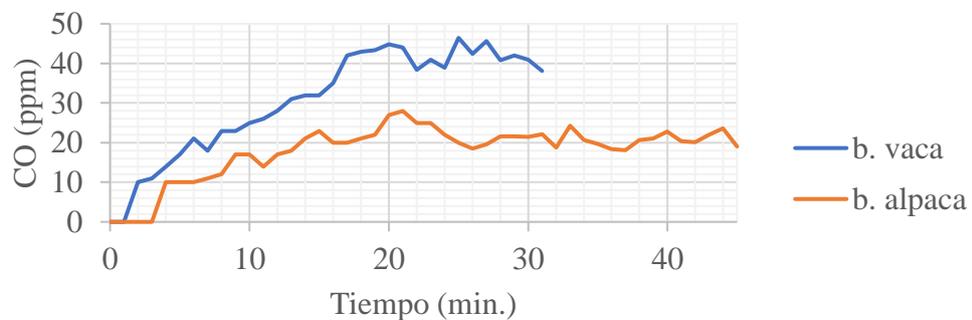
*Cocina tradicional utilizando bosta de alpaca como combustible*



Nota: en la figura se muestra la prueba de ebullición del agua a la cocina tradicional utilizando bosta de vaca, la fotografía se tomó en pleno funcionamiento, donde se puede ver la producción de humo.

### Figura 64

*Grafica de los niveles de concentración de CO con la cocina tradicional*



Nota: en el grafico se aprecia los niveles de monóxido de carbono medidos durante la prueba de ebullición de agua de la cocina tradicional.



Con bosta de alpaca, las emisiones fueron más bajas, oscilando entre 15 y 25 ppm, aunque presentaron problemas de estabilidad en la combustión. Esto evidencia que la bosta de vaca es más contaminante, mientras que la bosta de alpaca, aunque menos eficiente, requiere ajustes para optimizar su uso.

#### **4.10. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA COCINA GASIFICADORA TLUD Y LA COCINA TRADICIONAL**

En esta sección, se realiza una comparación entre el rendimiento del prototipo final de la cocina gasificadora TLUD y una cocina tradicional de tres piedras, considerando parámetros como eficiencia térmica, emisiones contaminantes, tiempo de ebullición y consumo de combustible. Este análisis tiene como objetivo identificar las ventajas y limitaciones del nuevo diseño en relación con la tecnología tradicional utilizada en la zona rural del departamento de Puno.

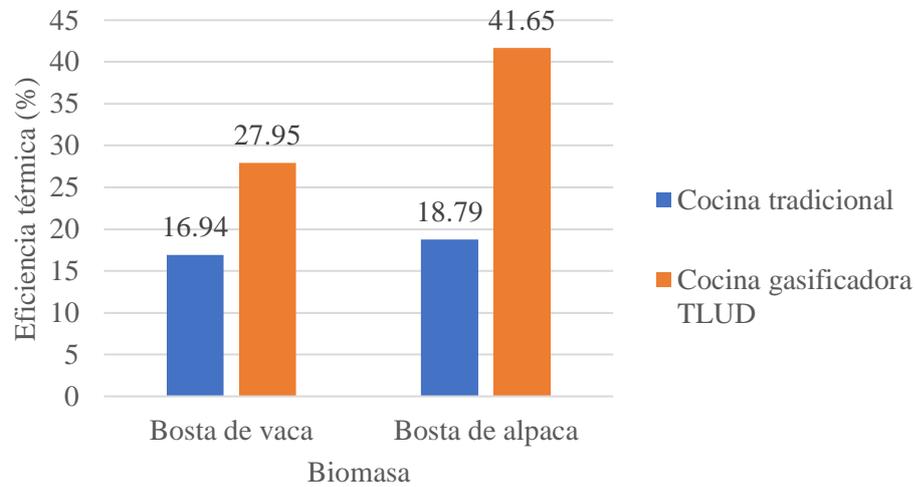
##### **4.10.1. Comparación de la eficiencia térmica**

En la Figura 65 se comparan las eficiencias térmicas entre la cocina tradicional y la cocina gasificadora. Con bosta de vaca, la cocina gasificadora alcanza una eficiencia térmica del 27.95%, significativamente superior al 16.94% de la cocina tradicional. Por otro lado, con bosta de alpaca, la cocina gasificadora logra una eficiencia del 41.65%, superando ampliamente el 18.79% de la cocina tradicional.

Estos resultados reflejan que la cocina gasificadora es más eficiente que la cocina tradicional, debido que los gases combustibles se aprovechan mejor en la cámara de combustión (quemador) especialmente para la bosta de alpaca donde la eficiencia es más elevada. Esto evidencia la viabilidad de la cocina gasificadora TLUD como una alternativa más eficiente y sostenible para las zonas rurales.

**Figura 65**

*Comparación de las eficiencias térmicas*



Nota: El grafico compara las eficiencias térmicas promedios obtenidos en la prueba de ebullición de agua de la cocina tradicional y cocina gasificadora.

#### 4.10.2. Comparación del consumo de combustible

El consumo de combustible se puede comparar en función de la energía transferida al agua (energía útil) y la masa de biomasa consumida, obtenidas en las pruebas de ebullición de agua. La relación entre la energía útil y la biomasa entregada para ambas tecnologías se muestran en la Tabla 38, para la bosta de vaca la energía aprovechada con la cocina gasificadora por cada kg de biomasa es 2857.06 kJ superando a la cocina tradicional de 2302.72 kJ, lo que representa un ahorro de combustible del 19.4% respecto a la cocina tradicional. Por otro lado, por cada kg de bosta de alpaca la energía aprovechada es de 3875.28 kJ con la cocina gasificadora resultando significativamente superior a la cocina tradicional de 1791.00 kJ de energía aprovechada, lo que representa un ahorro de combustible del 53.8% respecto a la cocina tradicional.

Estos resultados demuestran que la tecnología de cocina gasificadora TLUD ahorra mucho mejor el combustible frente a la cocina tradicional, lo que resulta beneficioso para el medio ambiente ya que utilizar menor cantidad de biomasa, implica generar menos gases de efecto invernadero relacionado con la combustión, sumado a esto la cocina gasificadora al usar la biomasa produce como sub producto que es la producción de biocarbón donde aparte de ahorrar combustible, también queda retenida el carbono en el biocarbón.

**Tabla 38**

*Relación Energía Útil/Biomasa Consumida (kJ/kg)*

Prototipo	Bosta de vaca	Bosta de alpaca
Cocina tradicional	2302.72	1791.00
Cocina gasificadora TLUD	2857.06	3875.28

#### **4.10.3. Comparación de tiempo de ebullición**

El tiempo de ebullición se refiere al de tiempo transcurrido para hervir el agua, es decir el tiempo necesario para alcanzar el punto de ebullición, estos datos se registraron en las pruebas de ebullición de agua (ver Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 37). La comparación del tiempo de ebullición es importante para determinar cuál de la tecnología es el más adecuado para cumplir la necesidad en la cocción de los alimentos en términos de rapidez.

En la Tabla 39 se muestra la comparación del tiempo necesario para llevar al punto de ebullición del agua durante la prueba de ebullición, resultando que utilizando bosta de vaca en la cocina gasificadora fue más rápido (20.7 min.) que con la cocina tradicional (24.50 min.), mientras usando la bosta de alpaca se llegó

al punto de ebullición en un tiempo mucho menor que los otros casos (17.6 min) y además frente a la cocina tradicional que no se llegó al punto de ebullición.

Estos resultados demuestran que la cocina gasificadora es más rápida para la cocción de alimentos, reduciendo significativamente el tiempo necesario para hervir agua o cocinar en comparación con la cocina tradicional.

**Tabla 39**

*Comparación de tiempo de ebullición (min.)*

<b>Prototipo</b>	<b>Bosta de vaca</b>	<b>Bosta de alpaca</b>
Cocina tradicional	24.50	(*)
Cocina gasificadora TLUD	20.70	17.60

*Nota.* (\*) indica que no se logró llegar al punto de ebullición durante la prueba de ebullición del agua.

#### **4.10.4. Comparación de Emisión de CO**

Como se mencionó previamente, las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2010) establecen que los niveles máximos permisibles de monóxido de carbono (CO) en interiores son de 100 mg/m<sup>3</sup> (87 ppm) en un promedio de 15 minutos, 35 mg/m<sup>3</sup> (30 ppm) en 1 hora y 10 mg/m<sup>3</sup> (8.7 ppm) en 8 horas, con el objetivo de proteger la salud en espacios cerrados.

Con base en las directrices de la OMS (2010), los resultados promedios que se muestran en la Tabla 40 que, con bosta de vaca la cocina tradicional y la cocina gasificadora presentan concentraciones promedio de CO de 31 ppm y 32 ppm, respectivamente. Estas cifras exceden el límite de 8.7 ppm establecido para exposiciones de 8 horas y se acercan al límite de 30 ppm para exposiciones de 1 hora. Esto indica que ambas tecnologías generan emisiones que podrían ser riesgosas en interiores, especialmente en espacios con poca ventilación.

Con bosta de alpaca, la cocina gasificadora presenta un mejor desempeño, con emisiones promedio de 9 ppm, dentro del límite de 10 ppm para exposiciones de 8 horas, lo que demuestra un nivel seguro según las recomendaciones de la OMS. Por otro lado, la cocina tradicional alcanza 18 ppm, superando el límite seguro de 8.7 ppm para 8 horas y aproximándose al límite de 30 ppm para 1 hora. Esto evidencia que la cocina gasificadora TLUD es más efectiva para reducir las emisiones de CO, particularmente al utilizar bosta de alpaca haciéndola más adecuada para entornos interiores.

**Tabla 40**

*Comparación de la concentración de CO (PPM)*

<b>Prototipo</b>	<b>Bosta de vaca</b>	<b>Bosta de alpaca</b>
Cocina tradicional	31	18
Cocina gasificadora TLUD	32	9

#### **4.11. VENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE LA COCINA GASIFICADORA**

Las cocinas gasificadora al utilizar biomasa ofrece importantes veneficios tanto ambientales como socioeconómicos.

##### **4.11.1. Costo de fabricación y beneficio social**

El costo de fabricación incluye los costos de los materiales, mano de obra, equipos y herramientas, estos se detallan en la Tabla 41:

**Tabla 41**

*Costo de fabricación de la cocina gasificadora*



Ítem	Descripción	Unidad	P. Unitario (S/)	Cantidad	Subtotal (S/)
<b>1.</b>	<b>Materiales</b>				
1.1.	Plancha LAF ASTM A1008 Gr. CS tipo B 1.5X1200X2400 mm	Pz.	175.00	0.11	19.78
1.2.	Plancha galvanizada 0.4X1200X2400 mm	Pz.	52.00	0.14	7.08
1.3.	Plancha inoxidable 304L 1.5X1200X2400 mm	Pz.	500	0.08	37.55
1.4.	Fierro redondo liso Ø10x6000 mm	Pz.	17.50	0.08	1.40
1.5.	Alambre #4	kg	7.00	0.20	1.40
1.6.	Alambre #8	kg	6.50	0.50	3.25
1.7.	Plancha A36 3/16"	kg	3.72	3.00	11.15
1.8.	Soldadura	gbl.	50.00	1.00	50.00
1.9.	Discos de corte	gbl.	30.00	1.00	30.00
1.10.	Aislamiento térmico Lana mineral 0.61mx3.81m x2"	Pz.	275.00	0.13	35.97
1.11.	Ventilador de 12V 1.5W CPU	und.	13.00	1.00	13.00
1.12.	Regulador de velocidad del ventilador	und.	15.00	1.00	15.00
1.13.	Fuente de tensión de 12V	und.	15.00	1.00	15.00
1.14.	Pintura de alta temperatura	gbl.	24.00	1.00	24.00
1.15.	Remaches	gbl.	1.50	1.00	1.50
1.16.	Otros costos	gbl.	20.00	1.00	20.00
<b>2.</b>	<b>Total, Materiales</b>				<b>312.37</b>
<b>3.</b>	<b>Equipos y Herramientas</b>	gbl.			<b>45.00</b>
<b>4.</b>	<b>Mano de Obra</b>	gbl.			<b>190.00</b>
<b>5.</b>	<b>Total, Costo</b>				<b>521.08</b>

Nota: en la tabla se muestra el presupuesto estimado con precios referenciales.

El costo de fabricación de la cocina gasificadora asciende a S/ 521.08, lo cual representa un costo que puede ser accesible a la mayoría de las familias de las zonas rurales del departamento de Puno, este innovador dispositivo esta principalmente enfocado a las zonas altas donde el acceso al GLP es limitado, además la abundancia de la bosta de alpaca es considerablemente notable por ser zonas de crianza de alpacas. El uso de esta cocina se convierte en una alternativa accesible que podría mejorar la calidad de vida en las zonas rurales. Además, el costo de fabricación estimado de la cocina gasificadora se podría disminuir significativamente con una producción en masa. Es necesario llevar a cabo estudios detallados sobre el impacto económico y social que la

implementación de la cocina gasificadora podría tener en la población de las zonas rurales, estableciendo este análisis para futuras investigaciones.

#### 4.11.2. Beneficios ambientales

El uso de la cocina gasificadora diseñada, al utilizar una fuente de combustible renovable como es la biomasa, contribuye en la reducción de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Además, uno de los subproductos de la gasificación de la biomasa es el biocarbón (ver Figura 66) lo cual puede utilizarse en la agricultura para mejorar la salud del suelo aumentando su fertilidad y capacidad de retención de agua, de esta manera también contribuye a mitigar el cambio climático al secuestrar carbono atmosférico. (Pérez-Cabrera et al., 2021, p. 718).

#### Figura 66

*Biocarbón producto de la gasificación de la biomasa*



Nota: en la figura se muestra el biocarbón como producto residual de la gasificación de la biomasa en la cocina TLUD. Donde, a: biocarbón de bosta de vaca y b: biocarbón de bosta de alpaca.



#### 4.12. DISCUSIONES

El diseño y construcción de la cocina gasificadora pirolítica tipo TLUD (Top-Lit Updraft) representa una propuesta innovadora para poder enfrentar las necesidades energéticas de las comunidades rurales del altiplano peruano. Este diseño resalta por su capacidad para aprovechar la biomasa local como bosta de vaca y alpaca, como una fuente de energía renovable, este diseño es comparable con los diseños encontrados en la literatura como De La Hoz et al. (2017), Belonio (2005) y entre otros.

Los análisis químicos y físicos realizados, demuestran que estas biomásas bosta de vaca y bosta de alpaca presentan poderes caloríficos superiores (HHV) de 17,874 kJ/kg y 15,299 kJ/kg respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del rango típico para biomásas lignocelulósicas, que suelen oscilar entre 14,000 y 20,000 kJ/kg según Basu (2013), lo que confirma su viabilidad como combustible.

En este estudio, el índice de gasificación específica (IGE), o también conocido como tasa de gasificación específica (SGR) se obtuvo de 116 kg/m<sup>2</sup>-h para la bosta de vaca y 91 kg/m<sup>2</sup>-h para la bosta de alpaca, estos valores hallados son comparables a los reportados por Suhartono et al. (2020), quienes determinaron que el SGR varía en un rango de 58 a 202 kg/m<sup>2</sup>-h para pellets de combustible derivado de residuos (RDF Refuse-Derived Fuel) utilizando un gasificador experimental a escala pequeña. Al igual que en la metodología del presente estudio, este estudio utilizó un gasificador experimental para estimar el valor de SGR antes de diseñar un sistema de escala comercial. Aunque el artículo no incluyó estos resultados en sus conclusiones, los valores experimentales de del índice de gasificación específica (IGE) destacan como parámetros fundamentales en el diseño de gasificadores a mayor escala. Esto evidencia la alineación entre distintos



enfoques experimentales y refuerza la importancia de nuestras mediciones como fundamento para el diseño y la optimización de sistemas a mayor escala.

Al evaluar el potencial energético del gas producido en la cocina gasificadora tipo TLUD mediante el modelo de equilibrio termodinámico resulto que para la bosta de vaca el poder calorífico inferior de  $1336 \text{ kJ/m}^3$  ( $6221 \text{ kJ/Nm}^3$ ) y  $1128 \text{ kJ/m}^3$  ( $5479 \text{ kJ/Nm}^3$ ) para la bosta de alpaca. Estos resultados son superiores a los reportados por Mendoza Fandiño et al. (2020), quienes obtuvieron un poder calorífico inferior de  $1556 \text{ kJ/kg}$  ( $2155 \text{ kJ/Nm}^3$ ) al gasificar briquetas compuestas por una mezcla de serrín de acacia y estiércol bovino en un gasificador de corriente descendente.

Los resultados experimentales en la prueba de ebullición de agua (WBT) indicaron que la eficiencia térmica promedio de la cocina gasificadora TLUD utilizando bosta de alpaca fue del 42% mientras con la bosta de vaca fue del 28%. Estos valores son comparables con los reportados por Osei et al. (2020), quienes estudiaron una estufa gasificadora tipo TLUD determinando que las eficiencias térmicas oscilo entre 30.5% y 38.1% utilizando cascarilla de arroz como combustible. Por otro lado, Álvarez Pablo (2009) reporto una eficiencia térmica del 30% para una cocina mejorada el cual incluye la bosta de vaca, lo que se aproxima a la eficiencia térmica hallada para la bosta de vaca en la cocina TLUD. Esto sugiere que las características específicas de las biomásas bosta de vaca y alpaca, como el poder calorífico y la densidad, desempeñan un papel importante en la eficiencia del sistema.

Las emisiones de monóxido de carbono se mantuvieron dentro de niveles seguros en el caso de la bosta de alpaca (9 ppm), mientras que la bosta de vaca mostró valores superiores a los límites recomendados. Estos valores son comparables con lo reportado por Álvarez (2009) quien obtuvo 3.9 ppm en una cocina mejorada que utilizo leña y bosta



de vaca como combustible. Estos hallazgos resaltan la necesidad de optimizar el diseño del reactor, así como el flujo de aire, para garantizar una combustión más limpia y eficiente (Dankawu et al., 2022).

Al comparar la eficiencia energética de una cocina gasificadora con una cocina tradicional utilizando bosta de vaca y de alpaca como combustibles, se observó que la cocina gasificadora aprovechó 2857 kJ por kilogramo de bosta de vaca, superando los 2302 kJ/kg de la cocina tradicional, lo que representa un ahorro de combustible del 19,4%. En el caso de la bosta de alpaca, la cocina gasificadora aprovechó 3875 kJ/kg, significativamente superior a los 1791 kJ/kg de la cocina tradicional, resultando en un ahorro del 53,8%. Estos resultados son consistentes con los reportados por Álvarez (2009), quien documentó un ahorro de combustible del 42% al emplear una cocina mejorada en comparación con una tradicional. La variabilidad en los porcentajes de ahorro puede atribuirse a diferencias en el diseño de las cocinas, las características de los combustibles y las condiciones operativas. Sin embargo, la tendencia general indica que las cocinas mejoradas, como las gasificadoras, ofrecen una eficiencia energética superior y una reducción en el consumo de combustible en comparación con las cocinas tradicionales.

Las eficiencias térmicas determinadas para del reactor de la cocina gasificadora TLUD mostraron para las biomásas de bosta de vaca (67,3%) y bosta de alpaca (67,9%) indican un desempeño energético comparable entre ambos tipos de combustible. Este resultado resalta la capacidad de los reactores gasificadores para aprovechar eficientemente el contenido energético de biomásas con características químicas y físicas distintas. Según estudios previos, la eficiencia térmica de los reactores de gasificación se encuentra generalmente en el rango de 60% a 75%, dependiendo de la configuración del reactor y las propiedades de la biomasa utilizada (Rajvanshi, 1986). Estas eficiencias



reflejan la conversión efectiva de energía en gas de síntesis utilizable, lo que valida la idoneidad de la tecnología TLUD para aplicaciones en comunidades rurales. Además, la cercanía de los valores sugiere que la bosta de alpaca tiene un leve beneficio en términos de eficiencia térmica, posiblemente debido a una mayor densidad aparente o características de combustión más favorables.

La eficiencia térmica del quemador TLUD fue diferente según el tipo de biomasa. Con la bosta de alpaca se alcanzó un 42.4%, mientras que con la de vaca solo llegó a un 28.37%. Esto se debe a que los gases de pirólisis de la alpaca se queman mejor y de forma más estable. Ahora, si lo comparamos con quemadores de GLP, que llegan a más del 57% de eficiencia con alturas de apenas 25 mm (Rojas et al., 2018), vemos que estos tienen ventaja porque el GLP, al ser un gas homogéneo, se mezcla mejor con el aire y quema más rápido. En cambio, en el TLUD, la altura óptima es mayor (85 mm) porque los gases necesitan más espacio para quemarse por completo. Esto nos deja claro que para mejorar el rendimiento del TLUD hay que enfocarnos en ajustar mejor el diseño del quemador y el flujo de aire, para que sea más competitivo frente a tecnologías más limpias y eficientes.

Con la bosta de alpaca la reducción de emisiones de humo y partículas tóxicas minimiza el riesgo de enfermedades respiratorias, especialmente en mujeres y niños, que son los grupos más vulnerables en las comunidades rurales (Deliana et al., 2021). Asimismo, el biocarbón generado como subproducto puede utilizarse como fertilizante, cerrando el ciclo de carbono y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles (Holik et al., 2020).

Sin embargo, el proyecto enfrenta retos técnicos y operativos. La intermitencia del proceso de gasificación por lotes y las emisiones de CO de la bosta de vaca representan desafíos importantes. Para abordar estos problemas, se podrían incorporar tecnologías



complementarias, como sistemas de filtrado de partículas y materiales refractarios que mejoren la retención térmica. Además, la ampliación del uso de esta tecnología a otras fuentes de biomasa podría incrementar su versatilidad y aceptación en diversas regiones (Shomad et al., 2021).

En conclusión, este proyecto prueba que las cocinas gasificadoras pirolíticas son una opción real y sostenible para las comunidades rurales. Ayudan a mejorar la calidad de vida, a usar de forma más consciente los recursos locales y a depender menos de los combustibles fósiles. Sin embargo, quedan cosas por hacer: habría que trabajar en optimizar el diseño del reactor, ver cuánto cuesta realmente implementar estas cocinas y entender si la gente las aceptará o no. Además, incluir esta tecnología en las políticas públicas podría marcar una diferencia enorme para mejorar las condiciones en las zonas rurales, de manera sostenible y sin perder eficiencia.



## V. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo de la investigación y la ejecución de las pruebas correspondientes, se lograron alcanzar los objetivos planteados, destacando los siguientes puntos importantes:

- Se realizaron análisis químicos y físicos detallados de las biomásas bosta de vaca y alpaca, confirmando que ambas tienen características viables como combustibles para el proceso de gasificación. La bosta de vaca presentó mayor contenido energético con un poder calorífico superior de 17,874 kJ/kg, en comparación con la bosta de alpaca que mostró un poder calorífico superior de 15,299 kJ/kg obtenidos en base seca.
- Se diseñó y construyó un prototipo experimental de cocina gasificadora tipo TLUD basado en los modelos encontrados en la literatura, esto permitió determinar los parámetros importantes para el diseño del prototipo final de la cocina gasificadora. Al utilizar bosta de vaca como combustible, se registró un índice de gasificación específica (IGE) de 116.37 kg/m<sup>2</sup>-h y una temperatura máxima registrada en el reactor de 543 °C, mientras para la bosta de alpaca el índice de gasificación específica fue de 91.05 kg/m<sup>2</sup>-h y una temperatura máxima registrada en el reactor fue de 577 °C.
- Se diseñó el prototipo final de la cocina gasificadora TLUD con dimensiones del reactor de diámetro 0.137 m y con una altura de 0.423 m de material de acero inoxidable y el resto de componentes de acero al carbono para garantizar durabilidad y resistencia al calor, este reactor se recubrió con fibra cerámica de alta temperatura de densidad 128kg/m<sup>3</sup> con un espesor de 2 pulgadas para minimizar las pérdidas térmicas. Se implementó un sistema de aire forzado usando un ventilador de 12V DC



- y 0.19A con dimensiones de 80x80x25mm lo que permitió un rendimiento estable y eficiente.
- Se realizaron pruebas experimentales al prototipo final, las cuales mostraron una eficiencia térmica promedio del 28% para la bosta de vaca y del 42% para la bosta de alpaca en la prueba de ebullición de agua. Los resultados también evidenciaron un ahorro de combustible del 19,4% al emplear bosta de vaca y del 53,8% con bosta de alpaca en comparación con la cocina tradicional de tres piedras. Estas cifras resaltan el mejor aprovechamiento energético de la biomasa en la cocina gasificadora, lo que la posiciona como una alternativa más eficiente y viable para comunidades rurales.
  - Las emisiones de monóxido de carbono utilizando bosta de alpaca se mantuvieron dentro de límites seguros, con un promedio de 9 ppm, lo cual indica que este tipo de biomasa es adecuado para un uso prolongado sin riesgos significativos para la salud. Por otro lado, al utilizar bosta de vaca, los valores de emisiones fueron significativamente más elevados, superando los límites permisibles de exposición segura. Esto sugiere que, aunque la bosta de vaca es viable como combustible, su uso requiere una optimización adicional en el diseño del sistema de combustión o en la regulación del aire para reducir las emisiones y cumplir con los estándares de seguridad.
  - El balance energético realizado evidenció un aprovechamiento eficiente de la biomasa y del gas de síntesis generado en el proceso. El reactor alcanzó una eficiencia energética del 67% al utilizar bosta de vaca, con una potencia generada de 3,749 kW, y del 68% al emplear bosta de alpaca, con una potencia de 3,021 kW. Por otro lado, el quemador mostró una eficiencia térmica del 42% al aprovechar el gas de bosta de alpaca, con una potencia útil de 1,279 kW, y del 28% con el gas derivado de la bosta de vaca, logrando una potencia útil de 1,064 kW. Estos resultados reflejan una



conversión energética efectiva en el reactor, aunque resaltan la necesidad de optimizar el quemador para mejorar el aprovechamiento de la energía disponible, especialmente al trabajar con bosta de vaca, donde se observó un menor rendimiento en la etapa final del proceso.

En conclusión, se pudo diseñar y construir una cocina gasificadora tipo TLUD que se ajusta a las necesidades de las comunidades rurales, aprovechando los recursos que tienen a la mano. Los resultados muestran que esta tecnología es viable para ser usada en estas zonas, ofreciendo una opción más sostenible y adaptada a su realidad.



## VI. RECOMENDACIONES

- Dado que las pruebas con bosta de vaca mostraron niveles de emisiones de monóxido de carbono que superaron los límites permisibles, se recomienda investigar y desarrollar un diseño más efectivo de la cámara de combustión. Esto podría incluir la implementación de sistemas de postcombustión o la mejora del flujo de aire para garantizar una combustión más completa y reducir la formación de gases tóxicos.
- Para obtener un perfil térmico más exacto del proceso de pirólisis, es recomendable instalar múltiples sensores de temperatura a lo largo del reactor. Esto permitirá identificar de manera más precisa las variaciones de temperatura y optimizar el proceso de conversión térmica.
- Realizar estudios experimentales enfocados en la caracterización de la composición del gas de síntesis, incluyendo la proporción de sus componentes como CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, y otros hidrocarburos. Esto ayudará a comprender mejor las propiedades energéticas y el potencial de uso del gas producido.
- Se sugiere llevar a cabo estudios que analicen el nivel de emisiones de partículas suspendidas al usar la cocina de gas de síntesis con bosta de vaca y alpaca. Esto contribuirá a evaluar el impacto ambiental y la calidad del aire en espacios cerrados, así como a mejorar la seguridad y la sostenibilidad del sistema.
- Se recomienda utilizar un material refractario en las zonas de alta temperatura del reactor para garantizar su resistencia térmica y prolongar la vida útil de la cocina.
- Es necesario evaluar el desempeño del diseño en acero inoxidable durante periodos prolongados de operación, considerando la resistencia a la corrosión, la fatiga térmica y los efectos del uso continuo a altas temperaturas, con el fin de validar su durabilidad y eficiencia a largo plazo.



## VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Accinelli, R., Yshii, C., Córdova, E., Sánchez-Sierra, M., Pantoja, C., & Carbajal, J. (2004). *Evaluación del efecto de los combustibles de biomasa en el aparato respiratorio en tres comunidades rurales andinas: Cutini Capilla, Ayamachay y Uyshahuasi*. Laboratorio de Respiración, Instituto de Investigaciones de la Altura, Universidad Peruana Cayetano Heredia. Financiado por la Agencia de Cooperación Alemana al Desarrollo (GTZ).
- Alfonso Serrano, J. F. (2009). ¿Es posible inferir la eficiencia de un proceso de combustión a partir de una inspección visual de la llama? Corporación CDT de GAS. Recuperado de <https://www.lavision.de/en/products/flowmaster/index.php>
- Álvarez Pablo, H. J. (2009). *Estudio de cocinas mejoradas empleando leña y bosta como combustible* (Tesis de licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/571>
- American Welding Society. (2018). *AWS A5.4/A5.4M: Specification for stainless steel electrodes for shielded metal arc welding*. American Welding Society.
- Aydin, E. S., Yucel, O., & Sadikoglu, H. (2017). *Development of a semi-empirical equilibrium model for downdraft gasification systems*. *Energy*, 130, 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.132>
- Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory (2ª ed.)*. Academic Press.
- Belonio, A. T. (2005). *Rice Husk Gas Stove Handbook*. Appropriate Technology Center, Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University.
- Cedinox. (s.f.). *Resistencia a la corrosión del acero inoxidable a altas temperaturas*. Recuperado de <https://www.cedinox.es/es/publicaciones/noticias/Resistencia-a-la-corrosion-del-acero-inoxidable-a-altas-temperaturas>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica (8ª ed.)*. McGraw-Hill.



- Channiwala, S. A., & Parikh, P. P. (2002). *Empirical correlation to predict the higher heating value of solid, liquid and gaseous fuels*. *Fuel*, 81(8), 1051-1063.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Chen, W., Annamalai, K., Ansley, R. J., & Mirik, M. (2012). *Updraft fixed bed gasification of mesquite and juniper wood samples*. *Energy*, 41, 454-461.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.052>
- Dahlquist, E. (Ed.). (2013). *Technologies for converting biomass to useful energy: Combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation*. CRC Press.
- Dankawu, U. M., Usman, F., Musa, I. M., Safana, A., Ndikilar, C., Shuaibu, H., Yakubu, A., Uzair, M., Lariski, F. M., Silikwa, N., & Ahmadu, M. (2022). *Assessment of biogas production from mixtures of poultry waste and cow dung*. *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(1b).  
<https://www.ajol.info/index.php/dujopas/article/view/224831/212107>
- De La Hoz, K., Pérez, J. F., & Chica Arrieta, E. L. (2017). *Design of a Top-Lit Up-Draft Micro-gasifier Biomass Cookstove by Thermodynamic Analysis and Fluent Modeling*. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(4), 2173-2187.
- DeFoort, M., L'Orange, C., & Kreutzer, C. (2010). *Stove Manufacturers Emissions & Performance Test Protocol (EPTP)*. Engines & Energy Conversion Lab, Colorado State University. Recuperado de <https://cleancooking.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/73-1.pdf>
- Deliana, D., Hanafiah, D. S., & Pohan, R. A. R. (2021). *Alternative energy from cow dung waste to an independent and creative community*. *Abdimas Talenta*, 6(1).  
<https://talenta.usu.ac.id/abdimas/article/download/4752/4674>
- Diamoresa. (s.f.). *Fibra cerámica: Información técnica*. Recuperado de <https://www.diamoresa.com.ar/Manuales/Fibra%20ceramica.pdf>
- Dutta, P. P., Pandey, V., Das, A. R., Sen, S., & Baruah, D. C. (2014). *Down draft gasification modelling and experimentation of some indigenous biomass for thermal applications*. *Energy Procedia*, 54, 21-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.246>



- Espinoza Quispe, W. C. (2021). *Diseño de una cocina gasificadora de leña para reducir las emisiones contaminantes de la combustión en la zona rural* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Centro del Perú.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/7316>
- Gagliano, A., Nocera, F., Patania, F., Bruno, M., & Castaldo, D. G. (2016). *A robust numerical model for characterizing the syngas composition in a downdraft gasification process*. *Comptes Rendus Chimie*, 19(4), 441–449.  
<https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.09.019>
- Gonzales Arnao, W. H. (2018). *Construcción y caracterización de estufa con sistema de microgasificación* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias. Lima, Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/15990>.
- Holik, A., Khirzin, M., & Aji, A. A. (2020). *PKM Pemanfaatan Limbah Kotoran Sapi Menjadi Biogas Sebagai Sumber Energi Alternatif di Kelurahan Bulusan Kecamatan Kalipuro Kabupaten Banyuwangi*. *Jurnal Dinamika*, 5(2).  
<https://publikasi.polije.ac.id/index.php/j-dinamika/article/download/v5-i2-a/pdf>
- Ibrahim, A., Veremieiev, S., & Gaskell, P. H. (2022). *An advanced, comprehensive thermochemical equilibrium model of a downdraft biomass gasifier*. *Renewable Energy*, 194, 912-925. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.069>
- Ibrahim, B., & Gunjo, D. G. (2024). *Experimental and numerical investigation of throated downdraft gasifier using mango seed hull as a biomass*. *International Journal of Thermofluids*, 22, 100608. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100608>
- Jarunthammachote, S., & Dutta, A. (2007). *Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier*. *Energy*, 32(9), 1660-1669.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.010>
- Jayah, T. H., Aye, L., Fuller, R. J., & Stewart, D. F. (2003). *Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying*. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 459-469.  
[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00037-0)
- Kaupp, A., & Goss, J. R. (1981). *State of the art report for small scale (to 50 kW) gas producer - engine systems (Contract No. 53-319R-0-141)*. U.S. Department of



- Agriculture, Forest Service. Financed by U.S. Agency for International Development, Bioenergy Systems & Technology Project No. 936-5709.
- Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2013). *Combustion: From basics to applications*. Wiley-VCH.
- Lagarza Cortes, C., William Vicente y Rodríguez, M., Salinas Vázquez, M., González Oropeza, R., & Sánchez Muñoz, J. (2009). *Análisis numérico del flujo en un mezclador de aire y combustible con sección variable*. Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 976–982. ISBN 978-607-95309-1-4.
- Levine, I. N. (2014). *Principios de fisicoquímica* (6<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Mahmoudi, A. (2015). *Prediction of heat-up, drying and gasification of fixed and moving beds by the Discrete Particle Method (DPM) (Tesis doctoral)*. Université du Luxembourg.
- Mendoza Fandiño, J. M., González Doria, Y. E., Doria Oviedo, M., Pedroza Urueta, Á., & Ruiz Garcés, A. F. (2020). *Fabricación de biocombustibles sólidos densificados (briquetas) a base de serrín de acacia y estiércol de bovinos en el departamento de Córdoba*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(3), 448-460. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000300448>
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2018). *Fundamentos de termodinámica técnica* (2.<sup>a</sup> ed.). Editorial Reverté.
- Oakey, J. (Ed.). (2016). *Fuel flexible energy generation: Solid, liquid and gaseous fuels*. Woodhead Publishing.
- Osei, I., Kemausuor, F., Commeh, M. K., & Owusu-Takyi, L. (2020). *Design, fabrication and evaluation of non-continuous inverted downdraft gasifier stove utilizing rice husk as feedstock*. *Scientific African*, 8, e00414. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00414>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants*. World Health Organization. Recuperado de <https://www.who.int>



- Pedroso, D. T., Blanco Machín, E., Silveira, J. L., & Nemoto, Y. (2013). *Experimental study of bottom feed updraft gasifier*. *Renewable Energy*, 57, 311-316.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.056>
- Peduzzi, E., Boissonnet, G., & Maréchal, F. (2016). *Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition*. *Fuel*, 181, 207-217.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.111>
- Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-Lopez, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejagal, I., Salcedo-Pérez, E., & Balois-Morales, R. (2021). *Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(4), 713-725. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2542>
- Rajvanshi, A. K. (1986). Biomass Gasification. *Alternative Energy in Agriculture*, 2, 83–102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-470815-4.50010-4>
- Reed, T. B., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Solar Energy Research Institute, U.S. Department of Energy.
- Rojas, F. J., Jiménez, F., & Soto, J. (2018). Análisis teórico y experimental de la potencia y eficiencia térmica de cocinas industriales que usan gas licuado de petróleo. 16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.250>
- Roth, C. (2013). *Micro-gasification: Cooking with gas from dry biomass* (2nd ed.). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Salcedo Díaz, R. (2011). *Operaciones de flujo de fluidos*. [PDF]. Universidad de Alicante. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20297/1/tema\\_6.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20297/1/tema_6.pdf).
- Scharler, R., Archan, G., Rakos, C., von Berg, L., Lello, D., Hochenauer, C., & Anca-Couce, A. (2021). *Emission minimization of a top-lit updraft gasifier cookstove based on experiments and detailed CFD analyses*. *Energy Conversion and Management*, 247, 114755. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114755>
- Scharler, R., Archan, G., Rakos, C., von Berg, L., Lello, D., Hochenauer, C., & Anca-Couce, A. (2021). *Emission minimization of a top-lit updraft gasifier cookstove*



- based on experiments and detailed CFD analyses*. Energy Conversion and Management, 247, 114755. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114755>
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO). (2021). *Boletín Informativo N.º 16: Resultados de evaluación de cocinas mejoradas en campo: Huancavelica, Cajamarca, Puno y Ayacucho*. Lima, Perú. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2718484/Bolet%C3%ADn%20Informativo%2016.pdf>.
- Shah, K. S., Mohd Hashim, M. H. B., Emad, M. Z., Ariffin, K. S. B., Junaid, M., & Khan, N. M. (2020). *Effect of particle morphology on mechanical behavior of rock mass*. Arabian Journal of Geosciences, 13(708). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05680-5>
- Shomad, M. A., & Anggoro, S. (2021). *Biogas power plant in Kalipucang hamlet, Bangunjiwo village, Kasihan district, Bantul regency*. Journal of Renewable Energy and Environmental Protection, 1(1). <https://jppmi.ptti.web.id/index.php/jppmi/article/download/4/19>
- Silva, I. P., Lima, R. M. A., Silva, G. F., Ruzene, D. S., & Silva, D. P. (2019). *Thermodynamic equilibrium model based on stoichiometric method for biomass gasification: A review of model modifications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 114, 109305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109305>
- Siwiec, T. (2007). The sphericity of grains of filtration beds applied for water treatment on examples of selected minerals. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 10(1), Art. 30. <http://www.ejpau.media.pl/volume10/issue1/art-30.html>
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2007). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química* (7ª ed., revisión técnica de M. Flores Rojas, trad. de E. Alatorre Miguel, E. Fernández Alvarado y E. Sordo Zabay). McGraw-Hill Interamericana.



- Suasnabar Dávila, M. J. (2014). *Diseño de caldera doméstica para quemar bosta (Tesis de licenciatura)*. Pontificia Universidad Católica del Perú.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/5455>
- Suhartono, Nurhadi, Utomo, Y. S., Djunaedi, I., Santosa, A., & Hidayat, Y. (2020). *Design calculation of a 100 kWe refuse derived fuel gasifier*. International Journal of Scientific & Technology Research, 9(3), 350–355.  
<https://ijpsat.org/index.php/ijpsat/article/download/4093/2523>
- The Water Boiling Test: Version 4.2.3. (2014). *Cookstove emissions and efficiency in a controlled laboratory setting*. Clean Cookstoves.  
<https://www.cleancookstoves.org/our-work/standards-and-testing/learn-about-testing-protocols/>
- Tryner, J., Willson, B. D., & Marchese, A. J. (2014). *The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves*. Energy for Sustainable Development, 23, 99-109.  
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.009>
- UNFCCC. (2005). *Clarifications on definition of biomass and consideration of changes in carbon pools due to a CDM project activity*. CDM – Executive Board.  
Retrieved from <https://cdm.unfccc.int/EB/020/eb20rep.pdf>

## ANEXOS

### ANEXO 1: Informes de laboratorio del análisis proximal de las biomásas.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
Unidad de Biomasa Energética

#### REPORTE DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO – TGA (PROXIMAL) LER – BIOMASA 086 - 2024

Solicitante : Sr. Ronald Juan Poma Flores  
Atención : Sr. Ronald Juan Poma Flores  
Muestra : Estiércol seco de alpaca y de vaca  
Procedente de : Puno  
Fecha Recepción : 03/09/2024  
Fecha Reporte : 30/09/2024  
Norma : ASTM D7582

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE HÚMEDA			
		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MATERIA VOLÁTIL (%)	CENIZAS (%)	CARBONO FIJO (%)
UBE-(09/2024)-0165	Estiércol de vaca	8.36	70.83	11.44	9.37
UBE-(09/2024)-0166	Estiércol de alpaca	4.47	63.58	24.13	7.82

**NOTA:**

- El análisis se realizó con la muestra en base húmeda (muestra tal como se recibió). El análisis se realizó con la muestra triturada.
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



V°B°

Judith Ramirez Candia, Ph. D.  
Jefe(a) del Laboratorio de  
Energías Renovables





## ANEXO 2: Informes de laboratorio del análisis elemental de las biomosas.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
Unidad de Biomasa Energética

### REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S) LER – BIOMASA 087 - 2024

**Solicitante** : Sr. Ronald Juan Poma Flores  
**Atención** : Sr. Ronald Juan Poma Flores  
**Muestra** : Estiércol seco de alpaca y de vaca  
**Procedente de** : Puno  
**Fecha Recepción** : 03/09/2024  
**Fecha Reporte** : 30/09/2024  
**Norma** : ASTM D5373

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
UBE-(09/2024)-0165	Estiércol de vaca	41.32	6.48	1.56	37.93	0.23
UBE-(09/2024)-0166	Estiércol de alpaca	36.38	5.34	2.04	30.63	0.37

**NOTA:**

- El análisis se realizó con la muestra en base seca (la muestra fue secada en estufa a 105°C durante 24 horas).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



V°B°

Judith Ramírez Candia, Ph. D.  
Jefe(a) del Laboratorio de  
Energías Renovables



### ANEXO 3: Ficha técnica de aislante térmico

**Producto : MANTA CERAMICA** **INFORMACION TECNICA**

**DESCRIPCION**

- Disponibles para entrega inmediata con diversas combinaciones de dimensiones y densidades.
  - Baja conductividad térmica y energía térmica almacenada.
  - Elevada resistencia a los choques térmicos y ataques químicos.
  - Buenas características acústicas y de protección contra-fuego.
  - Alta flexibilidad, facilitando cortes e instalación.
- La manta es producida a partir de sílice y alúmina de alto grado de pureza. Resultando fibras refractarias totalmente inorgánicas, densificadas y entrelazadas para garantizar buena resistencia mecánica al manipuleo durante la instalación.



**PROPIEDADES FISICAS**

Color .....Blanco  
 Densidad(kg/m<sup>3</sup>).....64-192  
 Espesor .....3-51  
 Temperatura Máxima de Uso (°C)..... 1100  
 Uso Límite ..... 1260  
 Punto de Fusión (°C) ..... 1760  
 Diámetro de las Fibras (μ,medio) ..... 2,8  
 Largo de Fibras (cm,medio).....10-25

**COMPOSICION QUIMICA TIPICA**

(% peso, después de quemado)

Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ..... 47  
 Sílice (SiO<sub>2</sub>) ..... 53  
 Otros .....trazos

**PROPIEDADES QUIMICAS**

Los productos de fibra cerámica poseen excelente resistencia a los ataques químicos,exceptuando los ácidos fluorhídrico y fosfórico y los álcalis fuertes (ej. Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O). La manta no es afectada por el aceite o el agua. Sus propiedades térmicas y físicas son restauradas al secarse.

**RESISTIVIDAD TERMICA (R)**

El valor de la resistividad térmica de la fibra cerámica es definido como la inversa de la conductividad térmica multiplicada por el espesor (mm). El valor de R a 21°C según la norma ASTM C518-76 para 25mm y 96kg/m<sup>3</sup> es 0,163/mm.

**PROPIEDADES TERMICAS**

(CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (Btu.in/ft<sup>2</sup>.h.°F)  
 X TEMPERATURA MÉDIA(°F)) ASTM C 201

Temperatura media, 8 pcf	BTU.in/ft <sup>2</sup> .h.°F	W/mK	Temperatura media, 4 pcf	BTU.in/ft <sup>2</sup> .h.°F	W/mK
500°F (260°C)	0.44	0.06	500°F (260°C)	0.54	0.08
1000°F (538°C)	0.87	0.12	1000°F (538°C)	1.29	0.19
1500°F (816°C)	1.45	0.21	1500°F (816°C)	2.30	0.33
1800°F (982°C)	1.83	0.26	1800°F (982°C)	2.96	0.43
2000°F (1093°C)	2.09	0.30	2000°F (1093°C)	--	--
Temperatura media, 6 pcf					
500°F (260°C)	0.47	0.07			
1000°F (538°C)	1.01	0.15			
1500°F (816°C)	1.73	0.25			
1800°F (982°C)	2.19	0.32			
2000°F (1093°C)	--	--			



**ANEXO 4:** Planos del prototipo experimental.

[https://drive.google.com/file/d/1rXrZIdboq2\\_laJqPeS3qg\\_WrrKR\\_NYwC/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1rXrZIdboq2_laJqPeS3qg_WrrKR_NYwC/view?usp=sharing)

**ANEXO 5:** Planos del prototipo final.

<https://drive.google.com/file/d/1ceySI0GBw3DHAtp8jmNspKCD4-m8-6ja/view?usp=sharing>

**ANEXO 6:** Memoria de calculo con bosta de vaca

<https://drive.google.com/drive/folders/1O6k0QXtE63ovIytuS1huDN7xM-4BBYx9?usp=sharing>

**ANEXO 7:** Memoria de cálculo con bosta de alpaca

[https://drive.google.com/drive/folders/1vjgbl2yF5EEtPhFpVu\\_delCtiwUcPOUX?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1vjgbl2yF5EEtPhFpVu_delCtiwUcPOUX?usp=sharing)

**ANEXO 8:** Video de la combustión de gas de bosta de alpaca

<https://drive.google.com/file/d/1UIldrvcPvIKEwUjbUlvv7Npp15il97I1/view?usp=sharing>

**ANEXO 9:** Video de monitoreo de CO a la combustión de gas de alpaca

<https://drive.google.com/file/d/130UmvGafVbTQ3xD1iwpV4D4wEUo0m1f3/view?usp=sharing>



## ANEXO 10: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo RONALD JUAN POMA FLORES,  
identificado con DNI 45539901 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
“ DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA  
GASIFICADORA PIROLÍTICA DE BOSTA PARA LA  
ZONA RURAL DEL DEPARTAMENTO DE PUNO. ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 16 de DICIEMBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 11: Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo RONALD JUAN POMA FLORES,  
identificado con DNI 45539901 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA  
GASIFICADORA PIROLÍTICA DE BOSTA PARA  
LA ZONA RURAL DEL DEPARTAMENTO DE PUNO. ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 16 de DICIEMBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella