



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE**  
**BRIQUETAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y CÁSCARA DE**  
**COCO**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA: LUZ CLARA QUILUMBAQUI GUALACATA**

**DIRECTORA: Ing. PARADA RIVERA MABEL MARIELA, Mgs.**

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Luz Clara Quilumbaqui Gualacata

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Luz Clara Quilumbaqui Gualacata, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 30 de noviembre de 2023.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the author's name.

**Luz Clara Quilumbaqui Gualacata**  
**C.I. 1727676866**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BRIQUETAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y CÁSCARA DE COCO**, realizado por la señorita: **LUZ CLARA QUILUMBAQUI GUALACATA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada, MsC <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-11-30
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera, Mgs. <b>DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-11-30
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes, MsC <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-11-30

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto se lo dedico en primer lugar a mi madre, María Hortencia Gualacata, por ser aquella persona que demuestra trabajo y resiliencia todos los días, por apoyarme en cada decisión que he tomado en el transcurso de mi vida. A mi hermana Lizeth por ser una persona incondicional, mi hermano Israel quien me ha acompañado durante toda mi vida universitaria y me ha enseñado a no rendirme, y mi hermana Nelly quien refleja esfuerzo y trabajo diario.

Luz

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme sus puertas y permitirme crecer tanto profesional como personal. A mi familia por su comprensión y apoyo. Y, por último, a mis profesores en especial al Ing. Paúl Palmay, Ing. Mabel Parada e Ing. Graciela Casillas, quienes me han compartido sus conocimientos y me han brindado todo su apoyo para que este proyecto de investigación se lo realice. Muchas gracias.

Luz

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	3
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Hipótesis.....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes de investigación.....	5
2.2. Referencias teóricas.....	7
2.2.1. <i>Biomasa</i> .....	7
2.2.2. <i>Tipos de biomosas</i> .....	8
2.2.3. <i>Características energéticas de la biomasa</i> .....	8
2.2.3.1. <i>Composición química</i> .....	8
2.2.3.2. <i>Contenido de humedad</i> .....	9
2.2.3.3. <i>Porcentaje de cenizas</i> .....	9
2.2.3.4. <i>Poder calorífico</i> .....	9
2.2.3.5. <i>Densidad aparente</i> .....	10
2.2.4. <i>Cascarilla de arroz</i> .....	10
2.2.5. <i>Fibra de coco</i> .....	10
2.2.6. <i>Briqueta</i> .....	10
2.2.6.1. <i>Propiedades de las briquetas</i> .....	11

2.2.6.2.	<i>Técnicas y tecnologías de briquetización</i> .....	12
2.2.7.	<b><i>Procesos de conversión de la biomasa en energía</i></b> .....	12
2.2.7.1.	<i>Métodos termoquímicos</i> .....	12
2.2.7.2.	<i>Métodos biológicos</i> .....	13
2.2.8.	<b><i>Gasificación de biomasa</i></b> .....	13
2.2.9.	<b><i>Tipos de gasificadores</i></b> .....	13
2.2.9.1.	<i>Gasificador de lecho fijo</i> .....	14
2.2.9.2.	<i>Gasificador de lecho fluidizado</i> .....	16
2.2.9.3.	<i>Gasificador por flujo de arrastre</i> .....	17
2.2.10.	<b><i>Proceso de gasificación</i></b> .....	17
2.2.11.	<b><i>Reacciones de gasificación</i></b> .....	18

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	19
3.1.	<b>Enfoque de la investigación</b> .....	19
3.1.1.	<i>Enfoque cualitativo</i> .....	19
3.1.2.	<i>Enfoque cuantitativo</i> .....	19
3.2.	<b>Alcance de Investigación</b> .....	19
3.2.1.	<i>Investigación exploratoria</i> .....	19
3.2.2.	<i>Investigación descriptiva</i> .....	20
3.2.3.	<i>Investigación experimental</i> .....	20
3.3.	<b>Diseño de la investigación</b> .....	20
3.3.1.	<b><i>Identificación de variables</i></b> .....	21
3.3.1.1.	<i>Variables independientes</i> .....	21
3.3.1.2.	<i>Variables dependientes</i> .....	21
3.4.	<b>Tipo de estudio</b> .....	21
3.5.	<b>Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b> .....	22
3.5.1.	<b><i>Preparación de la muestra de la biomasa</i></b> .....	22
3.5.2.	<b><i>Determinación de análisis proximales de la materia prima de residuos agroindustriales de cascarilla de arroz y cáscara de coco</i></b> .....	22
3.5.2.1.	<i>Contenido de la humedad de los residuos de cascarilla de arroz y cáscara de coco: método de desecación en estufa de aire caliente</i> .....	22
3.5.2.2.	<i>Determinación de contenido de cenizas de la cascarilla de arroz y cáscara de coco: Métodos e incineración en mufla</i> .....	23
3.5.3.	<b><i>Análisis elemental del hidrógeno y oxígeno a la biomasa de los residuos agroindustriales</i></b> .....	24



3.6.	Elaboración de briquetas del 50% cáscara de coco y 50% cascarilla de arroz ...	24
3.6.1.	<i>Parámetros para la elaboración del engrudo óptimo</i> .....	24
3.7.	Descripción del gasificador de la facultad de ciencias.....	25
3.8.	Parámetros de funcionamiento de gasificación.....	25
3.9.	Procedimiento para gasificar .....	26
3.9.1.	<i>Encendido del equipo</i> .....	26
3.9.2.	<i>Encendido del gas</i> .....	27
3.9.3.	<i>Toma de la muestra</i> .....	27
3.9.4.	<i>Apagado</i> .....	28
3.9.5.	<i>Limpieza del equipo</i> .....	28
3.10.	Análisis termodinámico de la gasificación.....	29
3.10.1.	<i>Cantidad estequiométrica de aire para una combustión completa</i> .....	29
3.10.2.	<i>Poder calorífico inferior (PCI)</i> .....	29
3.10.3.	<i>Poder calorífico superior (PCS)</i> .....	30
3.10.4.	<i>Coeficiente de aire en exceso</i> .....	30
3.10.4.1.	<i>Relación entre el ratio de equivalencia y coeficiente de aire en exceso</i> .....	31
3.10.5.	<i>Cantidad de aire para gasificar</i> .....	31
3.10.6.	<i>Cromatografía de gases</i> .....	32
3.11.	Balance de masa.....	32

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	34
4.1.	<b>Análisis proximales y físico-químicas</b> .....	34
4.2.	<b>Procedimiento experimental</b> .....	35
4.2.1.	<i>Parámetros de gasificación</i> .....	35
4.2.2.	<i>Proceso de gasificación</i> .....	35
4.3.	<b>Valoración energética de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco</b> .....	37
4.3.1.	<i>Resultado del análisis cromatográfico del gas de síntesis de las briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco.</i> .....	43
4.3.1.1.	<i>Composición elemental del gas de síntesis</i> .....	45
4.3.1.2.	<i>Poder calorífico inferior y superior del gas de síntesis</i> .....	47
4.4.	<b>Cálculo del balance de masa para las briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco</b> .....	43
4.5.	<b>Análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa obtenidos de la gasificación</b> ..	57
4.5.1.	<i>Análisis estadístico Anova</i> .....	57
4.6.	<b>Discusión de resultados</b> .....	62

<b>CONCLUSIONES</b> .....	64
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	66
<b>GLOSARIO</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b>	Estudios realizados como antecedentes de la investigación.....	6
<b>Tabla 2-2:</b>	Tipos de biomasas .....	8
<b>Tabla 3-1:</b>	Diseño experimental muestra .....	21
<b>Tabla 3-2:</b>	Identificación de la muestra .....	22
<b>Tabla 3-3:</b>	Determinación del contenido de humedad de la cascarilla de arroz y cáscara de arroz.....	22
<b>Tabla 3-4:</b>	Determinación de contenido de las cenizas de los residuos agroindustriales....	23
<b>Tabla 3-5:</b>	Análisis elemental de hidrógeno y oxígeno a biomasa de los residuos agroindustriales .....	24
<b>Tabla 3-6:</b>	especificaciones del gasificador .....	25
<b>Tabla 3-7:</b>	Coefficientes de exceso de aire por diferentes tipos de combustible.....	31
<b>Tabla 4-1:</b>	Composición elemental de la biomasa .....	34
<b>Tabla 4-2:</b>	Parámetros de gasificación.....	35
<b>Tabla 4-3:</b>	Pasos para realizar el proceso de gasificación.....	36
<b>Tabla 4-4:</b>	Datos de la gasificación de briquetas .....	38
<b>Tabla 4-5:</b>	Resultados del coeficiente de aire en exceso para el proceso de gasificación...	42
<b>Tabla 4-6:</b>	Parámetros valorados en el análisis cromatográfico.....	43
<b>Tabla 4-7:</b>	Composición del gas de síntesis de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco .....	44
<b>Tabla 4-8:</b>	Propiedades del gas de síntesis de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco .....	44
<b>Tabla 4-9:</b>	Análisis cromatográfico .....	46
<b>Tabla 4-10:</b>	Poder calorífico superior e inferior de las briquetas.....	48
<b>Tabla 4-11:</b>	Guía durante la primera gasificación.....	49
<b>Tabla 4-12:</b>	Resultados del balance de masa de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco de la primera gasificación .....	51
<b>Tabla 4-13:</b>	Guía durante la segunda gasificación.....	51
<b>Tabla 4-14:</b>	Resultados del balance de masa de briquetas de cascarilla de arroz y cascara de coco de la segunda gasificación .....	53
<b>Tabla 4-15:</b>	Guía durante la tercera gasificación .....	53
<b>Tabla 4-16:</b>	Resultados del balance de masa de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco de la tercera gasificación.....	55
<b>Tabla 4-17:</b>	Resultados del balance de masa .....	55
<b>Tabla 4-18:</b>	Resultados de la fracción sólida y gaseosa de las tres gasificaciones .....	56

<b>Tabla 4-19:</b>	Datos de las entradas y salidas del gasificador.....	57
<b>Tabla 4-20:</b>	Resumen estadístico de la fase sólida y la fase gaseosa para 3 gasificaciones..	58
<b>Tabla 4-21:</b>	Análisis de varianza (ANOVA) entre la fase sólida y la fase gaseosa .....	59
<b>Tabla 4-22:</b>	Fases .....	59

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b>	División de la biomasa .....	7
<b>Ilustración 2-2:</b>	Mecanismos de unión entre partículas aglomeradas .....	11
<b>Ilustración 2-3:</b>	Tipos de gasificadores.....	13
<b>Ilustración 2-4:</b>	Gasificador Updraft.....	14
<b>Ilustración 2-5:</b>	Gasificador Downdraft.....	15
<b>Ilustración 2-6:</b>	Gasificador de flujo cruzado .....	15
<b>Ilustración 2-7:</b>	Gasificador de lecho fluidizado circulante .....	16
<b>Ilustración 2-8:</b>	Gasificador de lecho fluidizado burbujeante.....	16
<b>Ilustración 2-9:</b>	Gasificador por flujo de arrastre.....	17
<b>Ilustración 2-10:</b>	Esquema de la gasificación .....	17
<b>Ilustración 3-1:</b>	Gasificador .....	28
<b>Ilustración 3-2:</b>	Diagrama de balance de masa en el gasificador.....	32
<b>Ilustración 4-1:</b>	Cromatograma del gas de síntesis .....	45
<b>Ilustración 4-2:</b>	Composición del gas de síntesis.....	47
<b>Ilustración 4-3:</b>	Resultado del poder calorífico del gas de síntesis .....	48
<b>Ilustración 4-4:</b>	Resultado del balance de masa.....	56
<b>Ilustración 4-5:</b>	Fisher LSD .....	60
<b>Ilustración 4-6:</b>	Caja y bigotes.....	60
<b>Ilustración 4-7:</b>	Frecuencia estadística.....	61
<b>Ilustración 4-8:</b>	Caja y bigotes de la fase sólida .....	61
<b>Ilustración 4-9:</b>	Caja y bigotes de la fase gaseosa .....	61

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS DE SÍNTESIS DE BRIQUETAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y CÁSCARA DE COCO
- ANEXO A:** PRUEBAS FÍSICO-QUÍMICAS
- ANEXO B:** NORMA ASTM 1945: RANGO DE COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL

## RESUMEN

Ecuador genera grandes cantidades de residuos agrícolas, los cuales son desaprovechados la gran mayoría como abonos naturales, el sector agrícola considera una de las principales fuentes de economía, enfrentándose al gran desafío de reducir la quema descontrolada o depósito en botaderos de los desechos sólidos tanto de la cascarilla de arroz y cáscara de coco, por lo tanto el objetivo de la presente investigación fue analizar energéticamente el proceso de gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco. La metodología implementada tuvo un enfoque cualitativo y cuantitativo, se utilizó un diseño experimental ya que se manipularon las variables como el tipo de biomasa y la cantidad de la misma y se desarrolló en un tiempo determinado; se caracterizó la biomasa y se dedujo sus propiedades mediante análisis proximales y elementales los cuales permitieron determinar si el producto es aceptable como combustible. Además, se realizaron pruebas piloto en el gasificador, para un mejor manejo del mismo y finalmente obtener el gas de síntesis el cual fue analizado en un laboratorio de cromatografía de gases. Mediante esta metodología se logró determinar que el flujo másico del combustible es decir de las briquetas, el de las cenizas y del alquitrán fueron evaluados de forma experimental para cada gasificación, además, su poder calorífico estuvo directamente relacionado con la cantidad de energía liberada al quemar briquetas, el gas de síntesis tuvo una baja concentración de monóxido de carbono, hidrógeno y metano por ende su poder calorífico fue menor. En ese contexto se concluye que efectivamente el poder calorífico puede variar según su la composición exacta del gas de síntesis y las condiciones de gasificación utilizada en el proceso.

**Palabras clave:** <GASIFICACIÓN>, <CASCARILLA DE ARROZ>, <CÁSCARA DE COCO>, <BRIQUETAS>, <GAS DE SÍNTESIS>, <ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO>, <PODER CALORÍFICO>.

2102-DBRA-UPT-2023



## ABSTRACT

Ecuador generates large amounts of agricultural waste, which are mostly misused as natural fertilizers, the agricultural sector is considered one of the main sources of economy, facing the great challenge of reducing the uncontrolled burning or dumping of solid waste both rice husks and coconut husks, therefore the objective of this research was to energetically analyze the process of gasification of rice husk and coconut husk briquettes. The methodology implemented had a qualitative and quantitative approach, an experimental design was used since variables such as the type of biomass and the amount of biomass were manipulated and developed in a determined time; the biomass was characterized, and its properties were deduced through proximate and elemental analysis which allowed determining if the product is acceptable as fuel. In addition, pilot tests were carried out in the gasifier for better handling and finally to obtain the synthesis gas, which was analyzed in a gas chromatography laboratory. By means of this methodology it was possible to determine that the mass flow of the fuel, i.e. briquettes, ash and tar were evaluated experimentally for each gasification, in addition, its calorific value was directly related to the amount of energy released when burning briquettes, the synthesis gas had a low concentration of carbon monoxide, hydrogen and methane and therefore its calorific value was lower. In this context, it is concluded that the calorific value can vary depending on the exact composition of the synthesis gas and the gasification conditions used in the process.

**Key words:** <GASIFICATION>, <RICE HUSK>, <COCOCONUT HUSK>, <BRIQUETTES>, <SYNTHESIS GAS>, <CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS>, <CALORIFIC POWER>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso Espinosa Mgs.

C.I. 1103696132



## **INTRODUCCIÓN**

A nivel mundial la energía se obtiene de diferentes fuentes renovables y no renovables. Una forma alternativa para generar energía limpia amigable con el medio ambiente es el uso de residuos agroindustriales. La proporción de biomasa en el Ecuador fluctúa entre 5 y 6% del total de las fuentes primarias de energía. Además, siendo Ecuador un país agrícola, existe un desaprovechamiento de los residuos orgánicos, ya que la gran mayoría se los utiliza como abonos naturales, lo cual tiene sus beneficios y sus perjuicios, porque esta materia orgánica al entrar en descomposición puede generar lixiviados que pueden ser ricos en metales y, a su vez, nocivos para los cultivos aledaños. La biomasa como potencial energético ha cobrado énfasis en la actualidad por lo que han desarrollado investigaciones sobre la biomasa y nanocelulosa. Esta investigación tiene como objetivo determinar la calidad de gas de síntesis producto de la gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco como alternativa de energías renovables en procesos de combustión.

Este tema de titulación propone realizar una valoración energética de biomásas mediante el proceso de gasificación a partir de biomásas de residuos orgánicos de esta forma se pretende realizar un estudio de calidad del gas y si su uso posterior es factible para otros procesos, las pruebas se llevarán a cabo mediante el uso del gasificador que se encuentra ubicado en la Facultad de Ciencias, carrera de Ingeniería Química de la ESPOCH el mismo que ha sido diseñado e implementado con fines de carácter investigativo.

Finalmente, como en toda investigación se intenta obtener resultados eficientes y aplicables a la industria, que darán un valor agregado a la agricultura ecuatoriana, como una fuente de energía alterna, contribuyendo a la remediación ambiental y mitigando el cambio climático que genera el consumo de combustibles de origen fósiles altamente contaminantes con el planeta.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

Ecuador siendo un país agrícola genera cantidades de residuos agrícolas, los cuales son desaprovechados la gran mayoría como abonos naturales, el sector agrícola considera una de las principales fuentes de economía, enfrentándose al gran desafío de reducir los desechos sólidos. Una de las agroindustrias más representativas a nivel del país es el procesamiento de arroz generando desechos como la paja, cascarilla, ceniza, salvado y arroz partido. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC)-ESPAC (2018) en conjunto con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2020), el cultivo de arroz es el cuarto con mayor producción, cosechándose alrededor de 1,6 millones de toneladas por año que generan alrededor del 20% de cascarilla. Este último es un residuo que, debido a sus características abrasivas y alto contenido de cenizas y sílice, no es empleada en la alimentación de animales siendo quemadas de manera descontrolada o depositadas en botaderos (Alfredo Cedeño-Palacios III, Eduardo Alcívar-Cedeño y Alejandra Zambrano-Zambrano 2021, p. 5).

La cáscara de coco es otro de los residuos que hasta la actualidad no han sido aprovechados, según datos presentados por (INEC, 2000), en el Ecuador se produce un total de 20.000 toneladas métricas anuales de coco. Sólo el 70 % de la fruta, que corresponde al agua y la pulpa, es aprovechada en el país. El resto, es decir. La corteza del fruto, es desechada, generando consigo una gran cantidad de residuos sólidos que pueden constituir focos de infección y proliferación de roedores (García 2015, p. 4).

La biomasa es una fuente de energía sostenible y renovable. Sin embargo, solo alrededor del 5% de la cantidad de biomasa en la Tierra puede usarse potencialmente para la producción de energía, lo que proporciona aproximadamente el 26 % de las necesidades energéticas del mundo (Kumar et al. 2023).

Los recursos necesarios para realizar la presente investigación son asequibles, la Costa ecuatoriana es una de las regiones dedicada a la agricultura por ello la materia prima es posible de conseguir y una vez procesada la materia prima se obtienen briquetas, las cuales, sometidas a un proceso de gasificación, dependiendo del agente gasificante se obtienen diferentes calidades de gases. La presente investigación es parte del Proyecto De Investigación (Analizar materiales y nanomateriales para aplicaciones energéticas y medio ambientales), formado por el Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (GIMA) de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo general***

Analizar energéticamente el proceso de gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco.

### ***1.2.2. Objetivos específicos***

- Caracterizar la biomasa de cascarilla de arroz y cáscara de coco a través de análisis proximal y pruebas físico-químicas.
- Determinar las condiciones del proceso de gasificación.
- Caracterizar el gas de síntesis obtenido del proceso de gasificación.
- Efectuar un balance de masa del proceso de gasificación.
- Realizar un análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa obtenidos de la gasificación.

## **1.3. Justificación**

En los últimos años se habla fuertemente sobre la “crisis energética” asociada al aumento sostenido del consumo de energía a nivel mundial, principalmente por parte de las economías emergentes y el agotamiento de las fuentes generadoras convencionales. Se pronostica que para el año 2030 el consumo será un 25 % superior al actual. El producto de la crisis energética actual y el consumo proyectado al futuro, se están buscando maneras de diversificar la matriz de energía, abriéndose a diversas opciones de preferencia renovables, la gasificación de biomasa es una de ellas. Al aplicar este tipo de proceso termoquímico se obtienen energía que se aprovecha directamente como energía térmica o se transforma en energía eléctrica (Castello 2014, p. 1).

De acuerdo con el Balance Energético Nacional, para el año 2015 el consumo energético promedio per cápita en el país fue 5,28 BEP. En base a esto, se presentó un ascenso en el consumo energético per cápita en el país con respecto a los de 4,22 BEP consumidos en 2005, representando un 25% de ascenso. Entonces en base a estas cifras, una persona en Ecuador consume el 38,31 % comparado con la media mundial, y el 55,29% con respecto al promedio latinoamericano, observándose que el consumo energético per cápita del país todavía sigue el inferior incluso a nivel regional (Serrano et al. 2017, p. 2).

Por lo mencionado antes, este tema de titulación propone realizar una valoración energética de biomasa mediante el proceso de gasificación a partir de biomasa de residuos orgánicos de esta

forma se pretende realizar un estudio de calidad del gas y si su uso posterior es factible para otros procesos, las pruebas se llevarán a cabo mediante el uso del gasificador que se encuentra ubicado en la Facultad de Ciencias, carrera de Ingeniería Química de la ESPOCH el mismo que ha sido diseñado e implementado con fines de carácter investigativo.

#### **1.4. Hipótesis**

Al realizar un análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa generada durante el proceso de gasificación de briquetas, se postula que existe una relación inversa entre la cantidad de briquetas utilizadas y el contenido de componentes no deseados en el gas producido, a la vez que se espera encontrar una relación directa con el contenido energético del gas generado. En otras palabras, se hipotetiza que a medida que se aumenta la cantidad de briquetas en el proceso de gasificación, se obtendrá un gas con mayor poder calorífico y una reducción en la presencia de componentes indeseados.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

Ecuador y América Latina en general, son muy dependientes de combustibles fósiles para la obtención de la energía y en un muy bajo porcentaje, de energías renovables. Debido a esto, el Gobierno de la República del Ecuador ha incentivado a través del INER (Instituto Nacional de Energías Renovables), “promover la eficiencia energética, una mayor participación de energías renovables sostenibles, el desarrollo y el uso de prácticas tecnológicas diversificadas no contaminantes de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua” (Aguirre 2017, p. 16).

No es para nada nuevo el uso de la biomasa como fuente de energía, pues se sabe que se utilizó en Europa durante la Segunda Guerra Mundial, pero luego se abandonó el uso debido al auge de la industria petrolera. Actualmente se ha reavivado la idea de seguir utilizando esta tecnología debido al inminente agotamiento de las reservas de petróleo y sobre todo a la crisis ambiental a la que nos enfrentamos diariamente. De esta forma, el proceso de gasificación se utiliza para producir un combustible que puede reemplazar a los combustibles fósiles sin dejar impacto ambiental (Aguirre 2017, p. 16).

El caso de la cascarilla de arroz, en el país se ha presentado que este material es simplemente quemado al aire libre o arrojado a los ríos en grandes cantidades, más por desconocimiento de su poder calorífico y de métodos apropiados para su aprovechamiento en el proceso de obtención de una fuente de energía renovable.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que la biomasa es transformada en un gas combustible (gas de síntesis) mediante reacciones químicas que ocurren a altas temperaturas y en presencia de un agente gasificante (Castello 2014, p. 8). La combustión de biomasa producida en nuestro país es un recurso energético potencial que puede reducir la contaminación y producir energía limpia con menores costos de producción.

**Tabla 2-1:** Estudios realizados como antecedentes de la investigación

Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Gasificación de briquetas de carbón con biomasa, una alternativa energética sostenible	Libro	Marco Ardilla Alfonso López Luis Lozano Eduardo Gil	2021	<a href="https://elibro.net/es/ereader/esepoch/219204">https://elibro.net/es/ereader/esepoch/219204</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador	Artículo	José Serrano William Mejía Juvenal Ortiz Andrea Sánchez Silvana Zalamea	2017	<a href="http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/29791/1/4.%201592-4835-1-PB.pdf">http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/29791/1/4.%201592-4835-1-PB.pdf</a>
Evaluación y caracterización energética del gas de síntesis de biomasa con poder calorífico alto, medio y bajo, producto del proceso de gasificación downdraft de 10 kw	Tesis	Luis Aguirre Guerrero	2017	<a href="https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12514/1/T-ESPE-053624.pdf">https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12514/1/T-ESPE-053624.pdf</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Simulación del proceso de gasificación de biomasa	Tesis	Rafael González	2016	<a href="https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11878/RafaelAndres_GonzalezGarcia_2016.pdf?sequence=2&amp;isAllowed=y">https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11878/RafaelAndres_GonzalezGarcia_2016.pdf?sequence=2&amp;isAllowed=y</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa	Tesis	Angelo Castello Belmar	2014	<a href="https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132303/Diseno-de-un-reactor-continuo-de-gasificacion-de-biomasa.pdf?sequence=1">https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132303/Diseno-de-un-reactor-continuo-de-gasificacion-de-biomasa.pdf?sequence=1</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación	Artículo	Ismael Sánchez Antonio Gallardo Natalia Edo	2014	<a href="http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711942.pdf">http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711942.pdf</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad	Libro	Ana Herguedas Encarna García Prado Paniagua	2012	<a href="http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%20C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf">http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%20C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Ingeniería conceptual, básica y de detalle para la construcción y automatización de un gasificador tipo downdraft o flujo concurrente de 10 kw de potencia	Tesis	Marco Tamayo	2012	<a href="https://docplayer.es/143554158-Marco-vinicio-tamayo-alban-carrera-de-ingenieria-mecanica-de-la-escuela-politecnica-de-l-ejercito-sangolqui-ecuador.html">https://docplayer.es/143554158-Marco-vinicio-tamayo-alban-carrera-de-ingenieria-mecanica-de-la-escuela-politecnica-de-l-ejercito-sangolqui-ecuador.html</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y pruebas de producción de gas pobre.	Tesis	Edison Fonseca Cuenca	2011	<a href="https://core.ac.uk/download/pdf/234593309.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/234593309.pdf</a>
Nombre del Estudio	Tipo	Autor	Año	URL/DOI
Gasificación de biomasa y Pirólisis	Libro	Prabir Basu	2010	<a href="https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7">https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7</a>

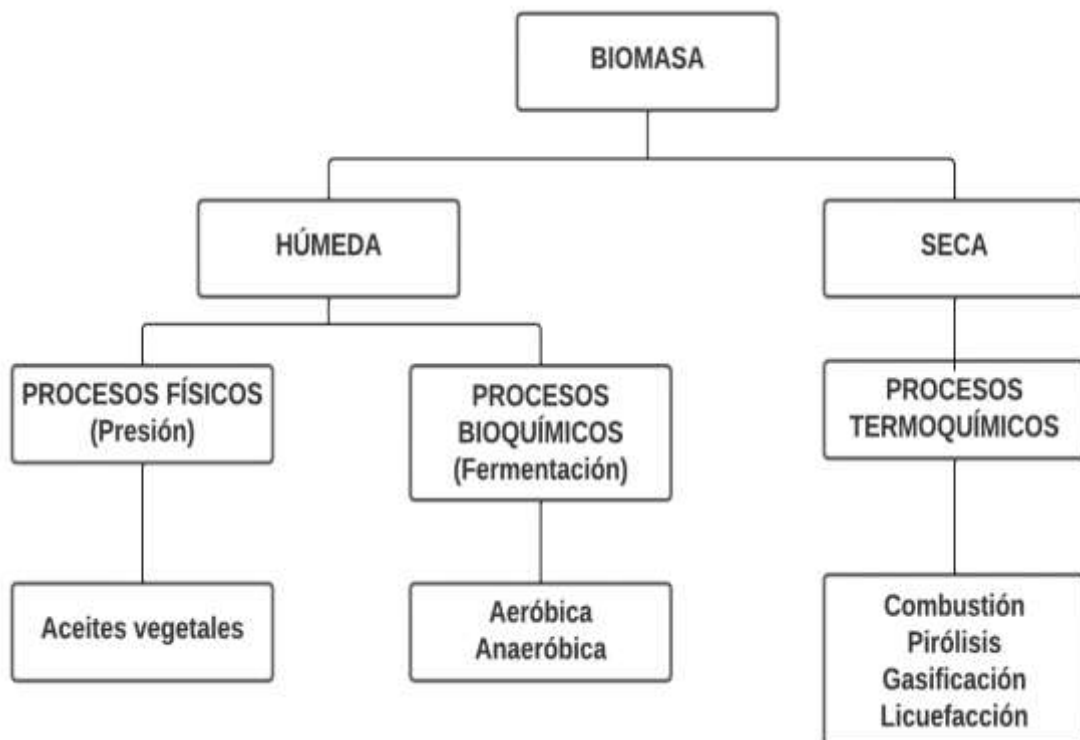
Realizado por: Quilumbaqui Luz, 2023.

## 2.2. Referencias teóricas

### 2.2.1. Biomasa

Fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales. (Herguedas, García y Paniagua 2012, p. 4).

La biomasa es considerada un recurso de energía renovable con gran futuro, ya que se realizan diferentes estudios en cuanto a su aplicación, debido a que la biomasa se puede convertir en bioenergía (calor y electricidad), además en biocombustibles (sólidos, líquidos y gaseosos) (Kongto et al. 2022, p. 5641). A continuación, se observa la división de la biomasa para obtención de energía.



**Ilustración 2-1:** División de la biomasa

Fuente: (Vera 2014, p. 28)

### 2.2.2. Tipos de biomasas

**Tabla 2-2:** Tipos de biomasas

Recurso de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas.	Polvo, sólido, HR > 50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas	Polvo, sólido, HR 30% - 45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	Sólido, HR > 55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido, alto contenido de humedad
	Cáscara y polvo de granos secos	Polvo, HR < 25%
	Estiércol	Sólido, alto contenido de humedad
	Residuos de cosechas: tallos, hojas, maleza	Sólido, HR > 55%
Residuos industriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido, humedad moderada
	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido, alto contenido de humedad
	Aguas de lavado y precocido de carnes y	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido graso
Residuos urbanos	Aguas negras	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos (vegetales)	Sólido, alto contenido de humedad
	Basura orgánica (madera)	Sólido, alto contenido de humedad

Fuente: (González 2016, p. 20-21).

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

### 2.2.3. Características energéticas de la biomasa

La evaluación de la viabilidad técnica y económica de un proceso de conversión de la biomasa en energía requiere considerar ciertos parámetros y condiciones, agrupados en:

#### 2.2.3.1. Composición química

Los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua. Durante la combustión, se quema la parte orgánica, la inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido.



La composición química de la biomasa original se puede conocer llevando a cabo los análisis de los elementos más importantes, como carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), y en algunos casos cloro (Cl). También contiene oxígeno (O), pero este elemento no se determina directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma del resto de elementos más las cenizas (Herguedas, García y Paniagua 2012, p. 8).

#### 2.2.3.2. *Contenido de humedad*

Conocida también como humedad relativa, es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La humedad de la biomasa puede medirse en base seca (h) o en base húmeda (H), ya que se puede considerar el peso húmedo de la leña húmeda (Ph) y el peso seco (Po) obtenido al pesar la leña tras ser secada en una estufa para evaporar el agua presente. Entonces tenemos:

$$h = \frac{P_h - P_o}{P_o} \quad H = \frac{P_h - P_o}{P_h} \quad (1)$$

Cuanto menor sea este contenido mejor será el valor calorífico de la biomasa y su proceso de combustión, ya que cuando se quema la biomasa, primero hay que evaporar el agua antes de que el calor esté disponible. La mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad relativa inferiores al 30%. Con valores superiores se hace necesaria la implementación de operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía (Herguedas, García y Paniagua 2012, p. 8).

#### 2.2.3.3. *Porcentaje de cenizas*

El porcentaje de cenizas es la cantidad de materia sólida que no se consume en el proceso de combustión. Las cenizas pueden ocasionar problemas de operación o pueden ser emitidas al ambiente como material particulado. En otras ocasiones estas pueden ser aprovechadas, como es el caso de las cenizas de la cascarilla de arroz, en la cual estas pueden ser utilizadas como aditivo en la mezcla de concreto o para la elaboración filtros de carbón activado (Aguirre 2017, p. 7).

#### 2.2.3.4. *Poder calorífico*

El poder calorífico de un material es una expresión del contenido energético liberado al momento de combustionar una unidad másica o volumétrica de combustible, manteniendo las mismas condiciones de presión y temperatura entre los productos y reactivos. Se puede expresar de dos formas: poder calorífico superior (PCS) es aquel calor que verdaderamente se produce en la

reacción de combustión, y poder calorífico inferior (PCI) es el realmente aprovechable, producido sin utilizar la energía de la condensación del agua y de otros procesos (Paredes 2019, p. 26).

#### **2.2.3.5. Densidad aparente**

Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta. Los combustibles que presentan una densidad aparente elevada favorecen la relación de energía por unidad de volumen, debido a que se requieren menores tamaños de los equipos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Al contrario, las materias primas de baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte (Herguedas, García y Paniagua 2012, p. 9).

#### **2.2.4. Cascarilla de arroz**

Es un residuo generado en la agroindustria arroceras, es un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice que protege el grano de arroz, y por sus propiedades fisicoquímicas puede ser utilizado como combustible alternativo (Valiente 2017, p. 11).

#### **2.2.5. Fibra de coco**

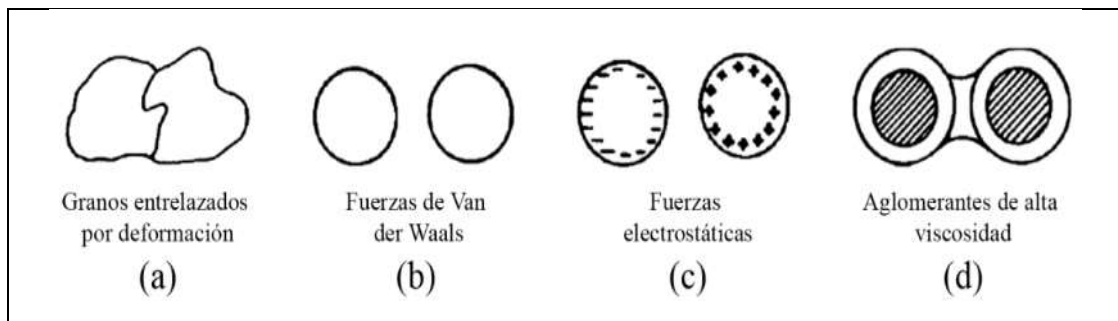
Es un sustrato o fibra que se obtiene de la corteza de su fruto, el cual es el objeto principal de su cultivo gracias al agua que contiene y a su pulpa comestible. Por tanto, la fibra es un subproducto que la mayoría de veces es tratada como desecho (Mazón 2017, p. 23). En el Ecuador la provincia con mayor producción de coco es Esmeraldas.

#### **2.2.6. Briqueta**

Las briquetas son un combustible mayormente de origen lignocelulósico, formadas por la compactación de biomasa utilizada como materia prima. El proceso de briquetado consiste en obtener productos finales de mayor densidad a los productos iniciales, este proceso también es conocido como densificado. La importancia de realizar este proceso es que al momento de transportarlo ocupan menor volumen con el mismo peso, comparado con la materia prima inicial (Valiente 2017, p. 13).

### 2.2.6.1. Propiedades de las briquetas

Los mecanismos de unión entre partículas pequeñas pueden ser por deformación y entrelazamiento de granos; en polvos, la unión se alcanza por fuerzas de Van der Waals, o por fuerzas electrostáticas. En el caso de la biomasa de madera bajo condiciones de alta presión y temperatura, la lignina forma una capa de adsorción fluida que actúa como aglomerante; por lo tanto, en este mecanismo de unión, pueden intervenir fuerzas de adhesión, cohesión, fuerzas atractivas entre partículas sólidas y enlaces entrelazados. En procesos industriales de briquetización, se usan aditivos con propiedades aglomerantes, como alquitrán y otros líquidos orgánicos o minerales, que pueden formar enlaces similares a los puentes sólidos (Ardila Barragán, López Diaz y Lozano Gómez 2021, p. 30).



**Ilustración 2-2:** Mecanismos de unión entre partículas aglomeradas

**Fuente:** (Grover y Mishra 1996).

Las propiedades de los sólidos para la densificación:

- **Fluidez y cohesión:** Características propias de lubricantes y aglutinantes.
- **Tamaño y forma de partícula:** Con materiales entre 6 y 8 mm, con 10 a 20% de componente en polvo (< malla 4), se consigue mejor densificación y cohesión, pero se afecta el flujo. Partículas de diferentes tamaños mejoran la dinámica de empaquetamiento y, también, contribuyen a una alta resistencia estática.
- **Viscosidad:** Mejora la cohesión, pero disminuye la fluidez.
- **Dureza:** Partículas duras dificultan la aglomeración.
- **Distribución del tamaño de partícula:** Composición granulométrica heterogénea aumenta el contacto y la cohesión entre partículas; mejorando la densidad de la briqueta.
- **Humedad:** En sustancias lignocelulósicas, la humedad controlada favorece las propiedades autoadhesivas, a altas presiones y temperaturas. Humedades mayores a la de equilibrio, evitan la absorción de agua, lo cual produce hinchamiento y desintegración de las briquetas durante los períodos de almacenamiento y transporte (Ardila Barragán, López Diaz y Lozano Gómez 2021, p. 31).

### *2.2.6.2. Técnicas y tecnologías de briquetización*

La producción industrial de briquetas se hace por extrusión y compresión.

- En el proceso de extrusión el material se somete presión a uniforme, donde pierde elasticidad para llenar espacios vacíos y aumentar el área de contacto entre partículas; después, elimina vapor para alcanzar densidad uniforme a toda la briqueta.
- En los procesos de compresión en prensa de tornillo y de pistón, la biomasa o la mezcla se comprime dentro de un cilindro, por un pistón alternativo a alta presión. Puede incorporarse un eje en el cilindro para hacer un orificio central en las briquetas, el cual aumenta el área de superficie para optimizar procesos de combustión, pirólisis y gasificación. (Ardila Barragán, López Díaz y Lozano Gómez 2021, p. 31-32).

### *2.2.7. Procesos de conversión de la biomasa en energía*

#### *2.2.7.1. Métodos termoquímicos*

##### *a. Combustión*

Es el proceso de conversión en el cual se produce la oxidación completa del combustible. La combustión directa de la biomasa es el sistema más elemental y, por supuesto, más antiguo de recuperación energética de la misma.

##### *b. Pirólisis*

Es la degradación térmica en ausencia de oxígeno. El objetivo de este proceso es obtener tanto combustible líquido como sea posible. La principal ventaja de este proceso es que este líquido o aceite pirolítico obtenido es fácil de manipular en cuanto a transporte y almacenamiento, pero tienen la desventaja de su inestabilidad química y física.

##### *c. Gasificación*

En este proceso, se produce una conversión de la biomasa en un gas combustible, que actúa de portador de energía, mediante una oxidación parcial a alta temperatura. El principal producto del proceso es un gas combustible, cuyo poder calorífico varía dependiendo de la atmósfera de gasificación (agente gasificante) y del contenido de humedad del combustible (Tamayo 2012, p. 14).

### 2.2.7.2. Métodos biológicos

#### a. Fermentación alcohólica

Transforma la biomasa en etanol (biocombustible). Este alcohol se genera mediante la fermentación de azúcares.

#### b. Fermentación metánica

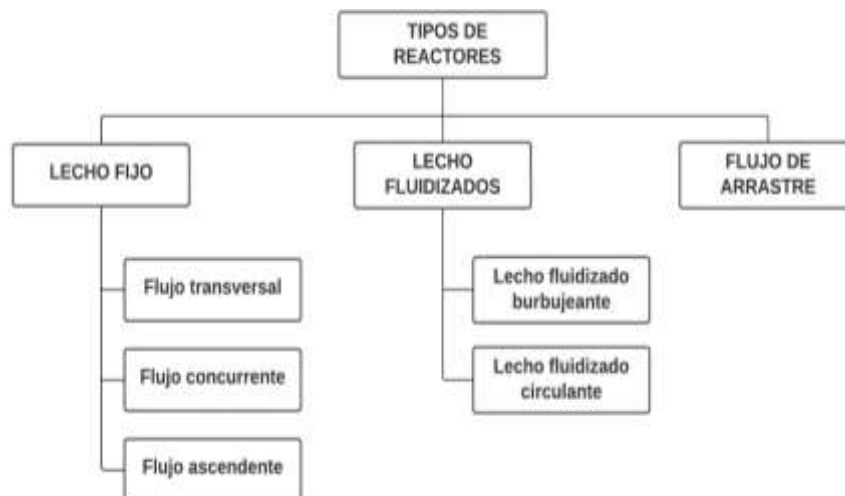
Es la digestión anaerobia de la biomasa por bacterias. Se suele utilizar para la transformación de la biomasa húmeda en los fermentadores o digestores. La celulosa es la sustancia que se degrada en un gas (Tamayo 2012, p. 14).

### 2.2.8. Gasificación de biomasa

Es un proceso termoquímico por el que la biomasa, o materia orgánica, se transforma en gas combustible. Cuando la biomasa, que deberá estar en estado sólido, es sometida a la acción del calor en condiciones de defecto de aire, o combustión incompleta, se producen una serie de reacciones que dan lugar a un gas de gran interés energético. El gas obtenido cuando la gasificación se denomina gas pobre está formado básicamente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), vapor de agua y nitrógeno (N) (si se emplea aire como gasificante) (Sánchez 2014, p. 25).

### 2.2.9. Tipos de gasificadores

Los gasificadores se pueden clasificar según el tipo de lecho en gasificadores de lecho fijo, de lecho fluidizado o de flujo de arrastre tal como se detalla a continuación.



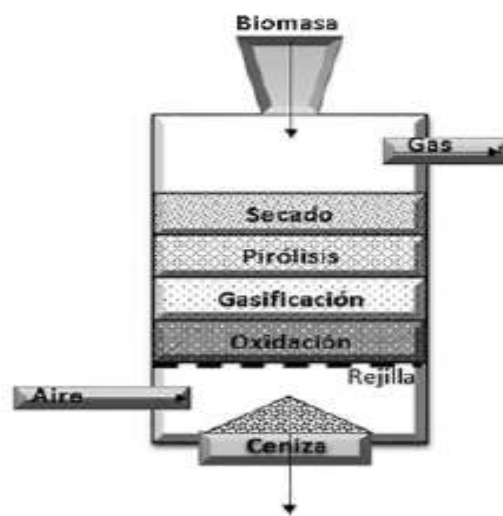
**Ilustración 2-3:** Tipos de gasificadores

Realizado por: Quilumbaqui Luz, 2023.

### 2.2.9.1. Gasificador de lecho fijo

#### a. Gasificador de flujo ascendente (Updraft)

En este tipo de gasificador la alimentación se da por la parte superior mientras que el aire se introduce por el fondo del reactor atravesando una parrilla, en la zona de combustión se alcanza una temperatura cerca de los 1000 °C la cual es controlada por la adición de vapor o aire para la gasificación, encima del ambiente reductor se da la pirólisis del combustible donde grandes cantidades de alquitrán y cenizas son formadas y abandonan el gasificador con el gas formado. La eficiencia energética global del proceso es alta pero también el contenido de alquitrán en los gases (Chejne Janna, Londoño Giraldo y Arenas Castiblanco 2006, p. 19).

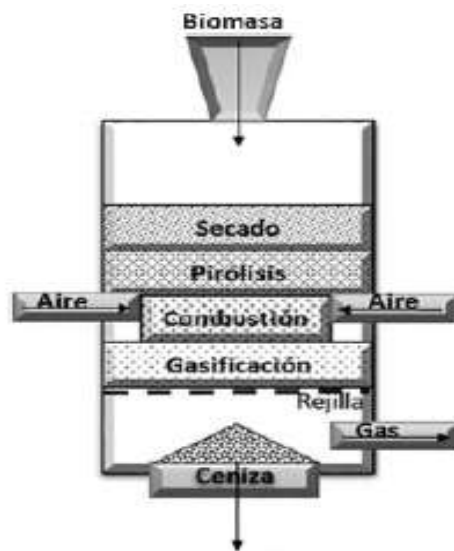


**Ilustración 2-4:** Gasificador Updraft

Fuente: (Peña et al. 2017).

#### b. Gasificador de flujo en cocorriente (Downdraft)

En los gasificadores de flujo en cocorriente la alimentación y el aire entran al gasificador en la misma dirección. La alimentación de la biomasa es por la parte superior, el suministro del agente oxidante es por la parte central y la salida del gas producido es por la parte inferior. Cuando se produce gas, éste debe pasar a través de la ceniza para poder salir, esto ocasiona que se produzcan gases como hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y metano ( $CO_4$ ) lo que compone el gas de síntesis y dependiendo de la temperatura que se tenga en el interior existe una gran reducción de alquitranes, siendo una de las ventajas ya que son muy útiles para el funcionamiento de motores (Rodríguez y Tumbaco 2016, p. 30).

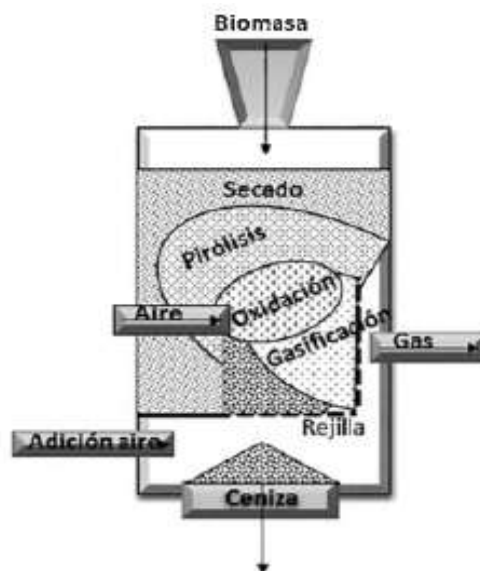


**Ilustración 2-5:** Gasificador Downdraft

Fuente: (Peña et al. 2017)

*c. Gasificador de flujo transversal*

En los gasificadores de flujo transversal o flujo cruzado la alimentación se da por la parte superior mientras que el aire es introducido lateralmente al reactor, los gases son retirados por el lado opuesto del reactor al mismo nivel de la alimentación. Una zona caliente de combustión/gasificación es formada alrededor de la entrada del aire, y la zona de pirólisis y secado se da en la parte superior. La ceniza cae al fondo y la temperatura del gas que abandona el reactor es alrededor de 800 a 900 °C (Chejne Janna, Londoño Giraldo y Arenas Castiblanco 2006, p. 20).



**Ilustración 2-6:** Gasificador de flujo cruzado

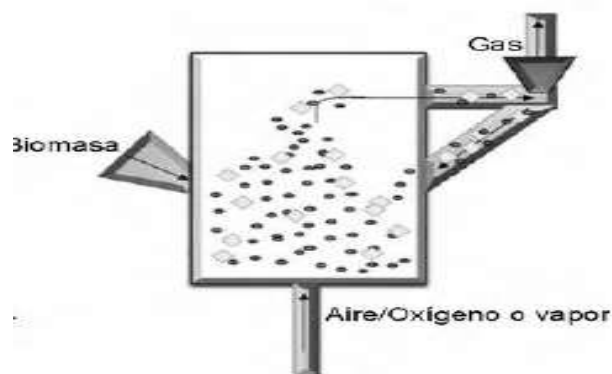
Fuente: (Peña et al. 2017).

### 2.2.9.2. Gasificador de lecho fluidizado

#### a. Gasificador de lecho fluidizado circulante

Los gasificadores de lecho fluidizado circulante tienen alta capacidad y son usados en la industria papelera para la gasificación de la corteza de árboles y otros residuos forestales.

El material del lecho circula entre la zona de reacción y el ciclón, donde las cenizas son removidas y el material del lecho y el alquitrán retornan a la zona de reacción. Estos gasificadores pueden operar a elevadas presiones, lo cual representa una ventaja en el uso final, cuando el gas es requerido a alta presión como es el caso de las turbinas de gas (Chejne Janna, Londoño Giraldo y Arenas Castiblanco 2006, p. 22).

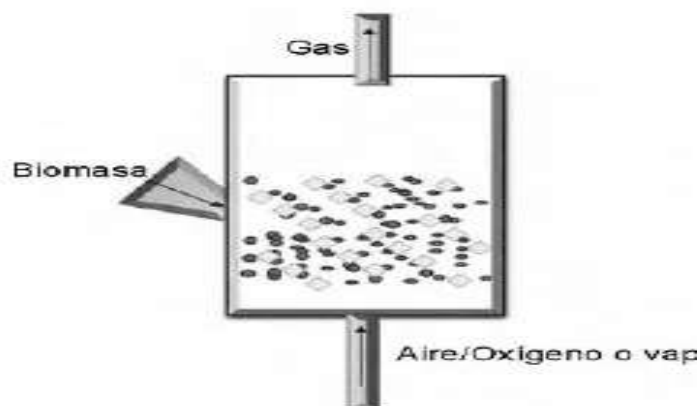


**Ilustración 2-7:** Gasificador de lecho fluidizado circulante

Fuente: (Peña et al. 2017)

#### b. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante

Los gasificadores de lecho burbujeante son recipientes en los que el agente gasificante entra por la parte inferior del lecho de materia prima y forma burbujas de distinto tamaño. Este tipo de reactores trabaja con temperaturas de lecho de 700-900°C, lo que mantiene controlado la relación de agente gasificante/biomasa. (Peña et al. 2017, p. 173).



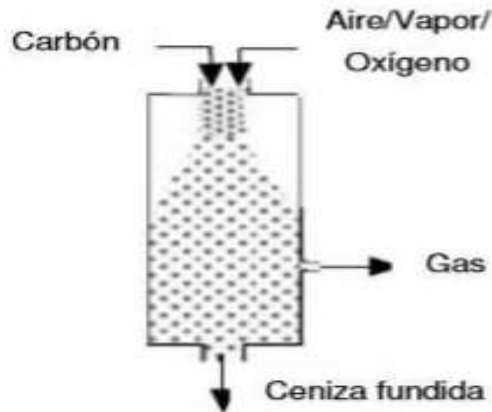
**Ilustración 2-8:** Gasificador de lecho fluidizado burbujeante

Fuente: (Peña et al. 2017).



### 2.2.9.3. Gasificador por flujo de arrastre

En este tipo de gasificador las partículas del combustible se alimentan en la misma dirección con el vapor y el oxidante. El combustible puede ser alimentado de una de dos formas, seco (normalmente usando nitrógeno como gas de transporte) o mojado (llevado en mezcla de agua). Dependiendo del método de la alimentación del combustible, seco o mezcla de agua, los gasificadores por flujo de arrastre pueden aceptar cualquier tipo de combustible (Chejne Janna, Londoño Giraldo y Arenas Castiblanco 2006, p. 20).

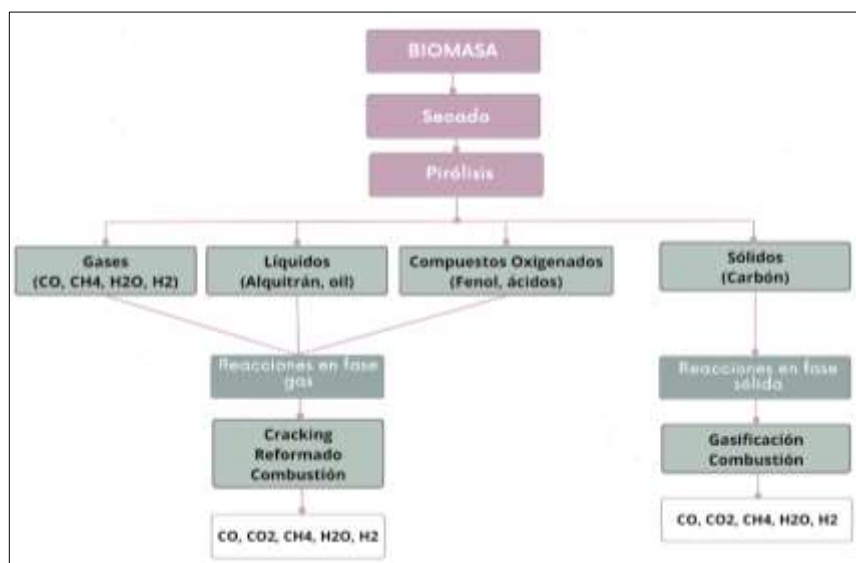


**Ilustración 2-9:** Gasificador por flujo de arrastre

Fuente: (Sánchez, Gallardo y Edo 2014)

### 2.2.10. Proceso de gasificación

Un proceso de gasificación típico generalmente sigue la siguiente secuencia de pasos que se observa en el esquema.



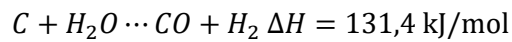
**Ilustración 2-10:** Esquema de la gasificación

Realizado por: Quilumbaqui Luz, 2023.

La biomasa primero se calienta y se seca, para después atraviesa un proceso de degradación térmica o pirólisis. Los productos de la pirólisis (líquidos, sólidos y gaseosos), reaccionan entre ellos y con el agente gasificante para formar el producto de gasificación final (González 2016, p. 35).

### ***2.2.11. Reacciones de gasificación***

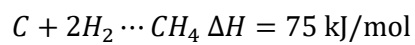
- **Reacción agua-gas**



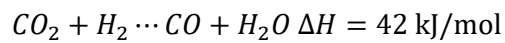
- **Reacción de Boudouard**



- **Reacción de metano**



- **Cambio de reacción**



## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Enfoque de la investigación

El presente trabajo de titulación se desarrollará en base a dos enfoques de investigación, cualitativo donde se enmarca algunos análisis físico-químicos y en cuanto al enfoque cuantitativo abarca todos los análisis de laboratorio y el proceso en sí de la gasificación.

##### 3.1.1. *Enfoque cualitativo*

Se desarrollará un método cualitativo, ya que la caracterización de la biomasa se realizará mediante análisis físico-químicas las cuales detectan características importantes de la biomasa exactamente los elementos atómicos que contiene. La composición puede variar según el tipo de biomasa y del lugar donde se recolecta, lo que nos permitirá determinar la calidad de los productos que se utilizará en el proceso de gasificación y, en definitiva, determinar qué muestras son las más adecuadas para obtener el gas de síntesis.

##### 3.1.2. *Enfoque cuantitativo*

Se realizará un enfoque cuantitativo, ya que de la evaluación de las variables dependientes e independientes se recolectarán datos numéricos, determinando la correlación entre variables como resultado de las muestras, de tal manera que se puedan tabular estadísticamente los datos. Además, se enmarcan todos los análisis de laboratorio los cuales permiten establecer el contenido de humedad y cenizas en la muestra lo que nos permitirá saber la calidad de gas que libera este tipo de biomasa.

#### 3.2. Alcance de Investigación

##### 3.2.1. *Investigación exploratoria*

Se empleará un diseño de tipo exploratorio por que se enfatizará el problema de investigación, en este caso el desecho desmesurado de los residuos y la contaminación generada por los mismos, además es de tipo exploratorio ya que es el primer paso de la investigación porque contribuirá a la identificación del proceso de gasificación, de las variables que intervienen y las características

de la biomasa. Finalmente, con los datos obtenidos determinar si este tipo biomasa se puede utilizar como fuente de energía.

### **3.2.2. *Investigación descriptiva***

Esta investigación parte de un estudio donde se quiere tomar residuos agroindustriales como desechos para la industria, pero como materia prima para generar nuevas fuentes de energía, es por ello que esta investigación abarca procedimientos donde se busca caracterizar mediante pruebas físico-químicas la biomasa representada por la mezcla de cascarilla de arroz y cáscara de coco como fuente energética al obtener gas de síntesis. Por tal razón se intenta realizar un estudio de calidad del gas y si su uso posterior es viable para otros procesos.

### **3.2.3. *Investigación experimental***

Es una investigación experimental ya que el desarrollo de la investigación parte con los análisis de las muestras de biomasa en laboratorios con el fin de caracterizar la biomasa y deducir sus propiedades, es decir, se procederá a realizar análisis proximales y elementales los cuales permite determinar si el producto es aceptable como combustible. Además, se realizará pruebas piloto en el gasificador, para un mejor manejo del mismo y finalmente obtener el gas de síntesis el cual será analizado en un laboratorio de cromatografía.

## **3.3. Diseño de la investigación**

El diseño propuesto de acuerdo al tema de investigación es de tipo completamente aleatorio y su propósito es analizar los resultados finales del gas de síntesis obtenido en el proceso de gasificación utilizando la mezcla de biomasa compactas es decir las briquetas propuestas. Para determinar o caracterizar la composición del gas producido en el gasificador, se realizará análisis de cromatografía de gases. Además, se realizará el análisis elemental. Antes de llevar a cabo la toma de las muestras, por conveniencia realizará 3 pruebas de gasificación a nivel de laboratorio como se muestra a continuación.

Para esta investigación se tomará un muestreo por conveniencia ya que es aquel con el cual se seleccionan las unidades muestrales de acuerdo a la conveniencia o accesibilidad del investigador.

**Tabla 3-1:** Diseño experimental muestra

	<b>Gasificación 1</b>	<b>Gasificación 2</b>	<b>Gasificación 3</b>
<b>Variabes</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>
T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
F <sub>m</sub>	F <sub>m1</sub>	F <sub>m2</sub>	F <sub>m3</sub>
F <sub>a</sub>	F <sub>a1</sub>	F <sub>a2</sub>	F <sub>a3</sub>

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Donde:

T: Temperatura de gasificación (°C)

F<sub>m</sub>: Flujo de biomasa (kg/h)

F<sub>a</sub>: Flujo de aire (kg/h)

### **3.3.1. Identificación de variables**

#### *3.3.1.1. Variables independientes*

- Cantidad de biomasa empleada
- Tipo de biomasa

#### *3.3.1.2. Variables dependientes*

- ✓ Calidad del gas de síntesis

### **3.4. Tipo de estudio**

El tipo de estudio que involucra el trabajo de investigación es de campo debido a que todo el proceso se llevará a cabo a la práctica mediante un estudio completamente aleatorio que será respaldada por la realización de varios procedimientos con el fin de conseguir el mejor rendimiento de energía aprovechable.

### 3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

#### 3.5.1. Preparación de la muestra de la biomasa

**Tabla 3-2:** Identificación de la muestra

Operación	Sustancias y reactivos	Materiales y equipos	Procedimiento
Triturado	Cascarilla de arroz Cáscara de coco	Triturador Balanza Guantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pesar la biomasa a utilizar.</li> <li>- Colocar la biomasa en la trituradora.</li> <li>- Retirar la biomasa triturada.</li> </ul>
Tamizado	Cascarilla de arroz Cáscara de coco	Torre de tamices	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alimentar la torre de tamices con el producto triturado.</li> <li>- Se procede a agitar que llegue a la malla final de la torre.</li> <li>- Retirar el producto tamizado.</li> </ul>

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

#### 3.5.2. Determinación de análisis proximales de la materia prima de residuos agroindustriales de cascarilla de arroz y cáscara de coco

##### 3.5.2.1. Contenido de la humedad de los residuos de cascarilla de arroz y cáscara de coco: método de desecación en estufa de aire caliente

**Tabla 3-3:** Determinación del contenido de humedad de la cascarilla de arroz y cáscara de arroz.

Determinación del contenido de humedad	
Materiales y Equipos	Sustancias y Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estufa de secado</li> <li>✓ Balanza analítica</li> <li>✓ Desecador</li> <li>✓ 4 cápsulas</li> <li>✓ Pinza</li> <li>✓ Guantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cascarilla de arroz</li> <li>- Cáscara de coco</li> </ul>
Procedimiento	Cálculos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esterilizar las cápsulas en la estufa durante 1 hora aproximadamente.</li> <li>- Pesar las cápsulas vacías.</li> <li>- Encerar la balanza y pesar de 5-10 gramos de la muestra en 4 cápsulas.</li> </ul>	El cálculo de la humedad se realiza con la siguiente fórmula:

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Colocar las muestras en la estufa a una temperatura de 105-110°C durante 24 horas.</li> <li>- Dejar enfriar en el desecador hasta que se encuentren a temperatura ambiente durante 20-30 min.</li> <li>- Proceder a realizar el pesado final de las muestras con las cápsulas.</li> <li>- Finalmente aplicar la fórmula del % humedad.</li> </ul>	$\% \text{ Humedad} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100$ <p>Donde:  <math>W_1</math>: Peso inicial de la muestra en gramos.  <math>W_2</math>: Peso de la muestra seca en gramos (peso del recipiente con la muestra – peso del recipiente).</p>
--	---

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

3.5.2.2. *Determinación de contenido de cenizas de la cascarilla de arroz y cáscara de coco: Métodos e incineración en mufla*

**Tabla 3-4:** Determinación de contenido de las cenizas de los residuos agroindustriales

<b>Determinación del contenido de cenizas de los residuos agroindustriales</b>	
<b>Materiales y Equipos</b>	<b>Sustancias y reactivos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mufla</li> <li>✓ Desecador</li> <li>✓ Reverbero</li> <li>✓ Balanza analítica</li> <li>✓ Crisoles</li> <li>✓ Pinza</li> <li>✓ Guantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cascarilla de arroz</li> <li>- Cáscara de coco</li> </ul>
<b>Procedimiento</b>	<b>Cálculos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esterilizar las cápsulas en la estufa durante 1 hora aproximadamente.</li> <li>- Pesar los crisoles vacíos.</li> <li>- Pesar 5-10 gramos de las muestras de biomasa en diferentes crisoles.</li> <li>- Se procede a colocarlos en un reverbero, se calcina en su totalidad las muestras hasta que no haya presencia de humo o vapor.</li> <li>- Ingresar los crisoles en la mufla a una temperatura aproximada de 500 °C-550 °C en un lapso de 24 horas.</li> <li>- Retirar de la mufla, dejar enfriar en el desecador hasta que adquieran la temperatura ambiente durante un tiempo aproximado de 2 horas.</li> <li>- Finalmente retirar y pesar la muestra.</li> </ul>	<p>El cálculo del contenido de cenizas se realiza con la siguiente fórmula:</p> $\% \text{ Cenizas} = \frac{(A \times 100)}{B}$ <p>Donde:  A: peso de la ceniza en gramos (Peso del crisol con ceniza – peso del crisol vacío)  B: peso de la muestra inicial en gramos.</p>

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

### 3.5.3. *Análisis elemental del hidrógeno y oxígeno a la biomasa de los residuos agroindustriales*

**Tabla 3-5:** Análisis elemental de hidrógeno y oxígeno a la biomasa de los residuos agroindustriales

<b>Determinación del contenido de hidrógeno y oxígeno</b>	
<b>Materiales y Equipos</b>	<b>Sustancias y reactivos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Analizador DUMAS</li> <li>✓ Balanza analítica</li> <li>✓ Crisoles</li> <li>✓ Pinzas</li> <li>✓ guantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cascarilla de arroz</li> <li>- Cáscara de coco</li> </ul>
<b>Procedimiento</b>	<b>Cálculos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar el pesaje de la biomasa.</li> <li>- Tomar las muestras y colocarlas en cada uno de los crisoles y utilizar las pinzas para cerrarlos.</li> <li>- Colocar los crisoles sobre la bandeja del equipo.</li> <li>- Encender el equipo.</li> <li>- Esperar el tiempo determinado.</li> <li>- Finalmente, el equipo arroja los datos que posteriormente serán analizados.</li> </ul>	<p>No se aplicaría cálculos para estos análisis ya que los mismos serán proporcionados directamente por el equipo que permite determinar el análisis elemental de forma automática.</p>

**Realizado por:** Quilumbaqui Luz., 2023.

### 3.6. **Elaboración de briquetas del 50% cáscara de coco y 50% cascarilla de arroz**

Para la elaboración de las briquetas se utilizaron 2,5 kg de cascarilla de arroz y 2,5 kg de cáscara de coco que previamente fueron trituradas para disminuir el tamaño de las partículas de tal forma que se encuentre la biomasa totalmente uniforme (Jama 2022, p. 62). Cabe decir que según la bibliografía antes mencionada toma como resultado que la combinación del 50% de cascarilla de arroz con el 50% de cáscara de coco es la más apta para mezclar ya que esta combinación tiene mayor poder calorífico que otras combinaciones, además se mezcló con el aglutinante de almidón de yuca, a continuación de se describe la formulación de un engrudo óptimo.

#### 3.6.1. *Parámetros para la elaboración del engrudo óptimo*

Se realizaron diferentes formulaciones tanto para el aglutinante (almidón de yuca) como para su mezcla con la biomasa para su posterior uso en la elaboración de las briquetas. Entonces mediante bibliografía se pudo evidenciar que la correcta formulación del aglutinante fue el 70 % de agua (ml) y del almidón de yuca 30 %, esto debido a que cumplía con las características ideales para



ser utilizados como engrudo en su combinación con la biomasa de cascarilla de arroz y cáscara de coco y permite compactarse de mejor forma después de su prensado (Jama 2022, p. 62).

### 3.7. Descripción del gasificador de la facultad de ciencias

El gasificador se encuentra ubicado en el Centro de acopio de residuos sólidos de la ESPOCH, el mismo que tiene fines investigativos y educativos los cuales son de suma importancia tanto para estudiantes como docentes. A continuación, se describe los datos técnicos del equipo:

**Tabla 3-6:** especificaciones del gasificador

<b>Gasificador de biomasa</b>	
Tipo	Downdraft
Material	Acero A36 de 4mm, acero inoxidable AISI 430
Aislante térmico	Fibra de vidrio, mortero refractorio
Capacidad	12,5 kg
Agente gasificante	aire
Voltaje	120 V
Diámetro garganta	80 mm
Altura cámara de reducción	205 mm
<b>Biomasa</b>	
Humedad	< 25%
Tamaño promedio de partículas	< 3 cm
Relación aire-combustible	1,5 kg / kg combustible
Carga al gasificador	Manual

Fuente: (Noteno y Zapata 2022)

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

### 3.8. Parámetros de funcionamiento de gasificación

Los parámetros de funcionamiento son aquellos que se determinan de acuerdo a la descripción del gasificador utilizado y mediante la revisión bibliográfica, para realizar la gasificación del presente proyecto investigativo el tipo del gasificador es tipo downdraft, el agente a utilizar es el aire con el cual se obtendría un gas pobre con menor poder calorífico al contrario de utilizar oxígeno, la cantidad de biomasa a utilizar será de 3 kg de briquetas como mínimo, el tipo de materia para el arranque es 1 kg, la temperatura ambiente se determinará mediante la investigación, la presión atmosférica y la densidad del aire se calcula tomando en cuenta que la ubicación de Riobamba está a 2745 m sobre el nivel del mar (z), la temperatura ambiente de 22 °C (295,15 K), hacemos uso de la ecuación (2).

- Presión atmosférica

$$P_{atm} = 101325 * \left( \frac{T_{amb} - 0,0065 * z}{T_{amb}} \right)^{5,256} \quad (2)$$

Donde:

$P_{atm}$  = Presión atmosférica

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente

$z$  = Metros sobre el nivel del mar

$$P_{atm} = 101325 * \left( \frac{295,25 - 0,0065 * 2754}{295,15} \right)^{5,256}$$

$$P_{atm} = 72928 \text{ Pa}$$

- Densidad del aire

Mediante la ecuación de los gases se determina el valor de la densidad del aire, tomando en cuenta que  $R_d$  es la constante de gases, pero en aire seco.

$$P_{aire} = \frac{P_{atm}}{R_d * T_{amb}} \quad (3)$$

Donde:

$R_d$  = Constante de los gases para aire seco

$T$  = Temperatura promedio

$$P_{aire} = \frac{72928}{0,287 \times 10^3 * 295,15}$$

$$P_{aire} = 0,86 \text{ kg/m}^3$$

### 3.9. Procedimiento para gasificar

#### 3.9.1. Encendido del equipo

- Desempear las tapas de la compuerta de entrada de biomasa y la compuerta del depósito de cenizas.
- Inspeccionar que el interior del equipo se encuentre vacío y limpio.
- Colocar la parrilla en la cámara de reducción y verificar que los seguros estén correctamente puestos.
- Conectar el equipo a una toma eléctrica de 120V y esperar hasta que el regulador faculte su encendido para alzar el breque del papel de control.
- Depositar la biomasa en el gasificador por la compuerta de alimentación.

- Colocar las tapas de la compuerta de alimentación y cenizas asegurándose ajustar todos los pernos.
- Encender el carbón previo antes de colocar en el gasificador, una vez encendido el carbón colocar en la cámara de combustión y encender el blower, una vez que llegue a una temperatura de 500 °C en adelante colocar las briquetas (se debe verificar que la biomasa se encuentre completamente encendida asegurándose que exista brazas en ese punto).
- Cerrar el acceso a la cámara de combustión (considerar que antes de colocar la tapa se debe colocar teflón industrial para maximizar la hermeticidad).
- Verificar que blower esté funcionando bien y verificar que se encuentre regulado en el aire estequiométrico.

Tomar en cuenta el movimiento manual del volante que se encuentra en la parte inferior del equipo en caso que el flujo de gas varíe o se entrecorte (Noteno y Zapata 2022, p. 59-60).

### **3.9.2. Encendido del gas**

Para encender el gas, el interior del equipo debe alcanzar temperaturas de combustión mínimo 600 °C y de reducción mínimo 500 °C. Como la etapa de combustión es la que proporciona el calor necesario a la etapa de reducción y esta última etapa es la que garantiza mayor producción de gases inflamables por tal razón se debe estar atento en tomar lecturas de temperatura.

El equipo alcanza temperaturas de gasificación está entre 20 a 25 min, después de este tiempo se puede observar la producción de gas pobre. Para encender el flujo de gas debemos considera los siguientes puntos:

- Para encender el gas se puede utilizar cualquier dispositivo que genere una llama (mechero, fosforera, fósforos, etc.)
- Cuando el flujo de gas pobre disminuya, se debe usar el agitador del equipo para homogenizar la biomasa y mejorar la producción de gas.
- Tener cuidado con la tubería de gas y cámara de cenizas ya que alcanzan temperaturas elevadas.
- Es recomendable que el encendido del gas se lo realice en espacios libre de aire por que dificultan el encendido (Noteno y Zapata 2022, p. 61-62).

### **3.9.3. Toma de la muestra**

Cuando se verifique que el flujo de la llama sea constante se procede a realizar el muestro del gas de síntesis en la bolsa de fluoruro de polivinilo (Tedlar) para ello se debe seguir correctamente el procedimiento escrito por el analista del Laboratorio de análisis instrumental de la EPN. Los cuales son los siguientes pasos:

- Colocar la válvula de la bolsa tedlar en el punto de muestreo
- Abrir la válvula de la bolsa tedlar
- Abrir la válvula de la salida de la muestra
- Cerrar la válvula de salida de la muestra cuando la bolsa tedlar se haya llenado las tres cuartas partes.
- Y se procede a retirar la bolsa tedlar del punto de muestreo.

#### **3.9.4. Apagado**

Cuando el flujo de gas se reduce quiere decir que comienza a salir aire caliente por consiguiente la biomasa en interior del equipo se ha consumido por completo. Una vez finalizada la práctica se debe:

- Apagar el blower.
- Bajar el breque que se encuentra en el panel de control.
- Desconectar el equipo de la toma de corriente eléctrica.
- Desempear las tapas de las compuertas de alimentación y la compuerta de ceniza con el fin de disminuir la temperatura (Noteno y Zapata 2022, p. 62).

#### **3.9.5. Limpieza del equipo**

Finalizado el trabajo esperar durante 1 hora a 1 hora y media o en tal caso hasta que el equipo este totalmente frío. Es importante asegurarse que el equipo se encuentre libre de biomasa en las cámaras de combustión, reducción y acceso lateral. En caso que exista biomasa se procede a quitar los seguros de la parrilla y bajarla sacándola de la cámara de combustión hacia la cámara de cenizas facilitando de esta manera una mejor limpieza (Noteno y Zapata 2022, p. 62).



**Ilustración 3-1:** Gasificador

**Fuente:** (Noteno y Zapata 2022)

### 3.10. Análisis termodinámico de la gasificación

Teniendo en cuenta los parámetros del trabajo, el análisis termodinámico se realiza en el área de gasificación, tanto las variables de entrada como las variables de salida se establecieron cuantitativamente con el fin de obtener gas de síntesis. Para ello es necesario tomar en cuenta la cantidad de aire estequiométrico, el poder calorífico inferior, poder calorífico superior, el coeficiente de aire en exceso, la cantidad de aire para gasificar y los análisis cromatográficos, a continuación, se detallan los siguientes parámetros.

#### 3.10.1. Cantidad estequiométrica de aire para una combustión completa

Considerando que la composición del aire es oxígeno (21%) y nitrógeno (78%) y otros gases menos comunes, el aire seco requerido para una combustión completa en unidad de masa de hidrocarburo. A continuación se da a conocer la siguiente ecuación que conlleva a determinar la cantidad de aire estequiométrico.

$$m_{at} = 0,1153 * C + 0,3434 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 0,0434 * S \quad (4)$$

Donde:

$$m_{at} = \text{masa de aire estequiométrico en } \frac{\text{kg aire}}{\text{kg combustible}}$$

C, H, O, S = porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre en base seca

Entonces para obtener los coeficientes estequiométricos mediante un análisis estequiométrico de la composición química, se toma los valores porcentuales de la composición elemental de los dos tipos de biomasa de la Tabla , con la ecuación (5).

$$G_{xi} = \frac{i}{100} \quad (5)$$

$i$  = Composición de los elementos (%)

$G_{xi}$  = Fracción gravimétrica (kg)

#### 3.10.2. Poder calorífico inferior (PCI)

Es la cantidad total de calor que se disipa de la combustión completa de un combustible. El PCI toma en consideración que el vapor de agua contenido en los gases no se condensa. Mediante la

fórmula de Dulong se calcula el poder calorífico inferior de la biomasa seca, a continuación, la resolución.

$$PCI = 8,140 \times C + 29,000 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,220 \times S \quad (6)$$

Al aplicar esta ecuación (6) con los respectivos valores en peso de la biomasa seca se obtiene el valor del poder calorífico tanto para la cascarilla de arroz como de la cáscara de coco.

### 3.10.3. Poder calorífico superior (PCS)

El poder calorífico superior (PCS) en la gasificación es importante porque determina la cantidad de energía que se puede liberar y utilizar a partir del combustible durante el proceso de gasificación. Cuanto mayor sea el PCS, más energía disponible habrá en el gas de síntesis producido. Es importante tener en cuenta que el PCS puede variar según el tipo de combustible utilizado y las condiciones de gasificación.

$$PCI = 8,140 \times C + 34,400 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,220 \times S \quad (7)$$

Mediante la aplicación de la ecuación (6) de Dulong, se obtiene el poder calorífico superior de la biomasa seca.

### 3.10.4. Coeficiente de aire en exceso

El coeficiente de aire en exceso (también conocido como exceso de aire) es una medida de la cantidad de aire que se mezcla con el combustible en una combustión. Es la relación entre la cantidad de aire real que se encuentra en la combustión y la cantidad de aire teórica necesaria para que se quemara todo el combustible.

$$EA = \frac{m_{ar}}{m_{at}} \quad (8)$$

Donde:

$EA$  = Coeficiente de aire en exceso

$m_{ar}$  = Masa de aire real o actual  $\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$

$m_{at}$  = Masa de aire teórico o estequiométrico  $\frac{Kg \text{ aire}}{Kg \text{ combustible}}$

**Tabla 3-7:** coeficientes de exceso de aire por diferentes tipos de combustible

Combustibles	Valores establecidos de aire en exceso (EA)
Líquidos	1,1 - 1,2
Sólidos	1,5 - 2,0
Gaseosos	1,0 - 1,1

Fuente: (Orozco 2017)

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

#### 3.10.4.1. Relación entre el ratio de equivalencia y coeficiente de aire en exceso

La relación entre el ratio de equivalencia y el coeficiente de aire en exceso es directamente proporcional, lo que significa que a medida que se aumenta el coeficiente de aire en exceso, el ratio de equivalencia también aumenta. Esto ocurre porque, cuando se agregan mayores cantidades de aire en exceso en la combustión, se diluyen los gases y se reduce la concentración de oxígeno alrededor del combustible. Como resultado, se necesitará una mayor cantidad de combustible para quemar todo el oxígeno disponible y mantener una combustión completa.

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \lambda = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{\text{aire actual}}{\text{aire estequiométrico}} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}} \quad (9)$$

Donde:

$ER$  = Ratio de equivalencia, ( $ER < 1,0$ ) se menciona que la mezcla es rica

$EA$  = Aire en exceso, ( $EA > 1,0$ ) se menciona que la mezcla es pobre

#### 3.10.5. Cantidad de aire para gasificar

La cantidad de aire requerida para la gasificación dependerá del análisis elemental del material y de la relación estequiométrica deseada. Es importante realizar un análisis detallado y considerar las condiciones específicas de gasificación para determinar la cantidad de aire adecuada.

$$m_{ag} = m_{at} \times ER \quad (10)$$

Donde:

$m_{ag}$  = masa de aire requerido para gasificación en  $\frac{\text{kg aire}}{\text{Kg combustible}}$

$ER$  = relación de equivalencia

Se dice que los valores apropiados para la relación de equivalencia se encuentran entre los valores de 0,2 a 0,25.

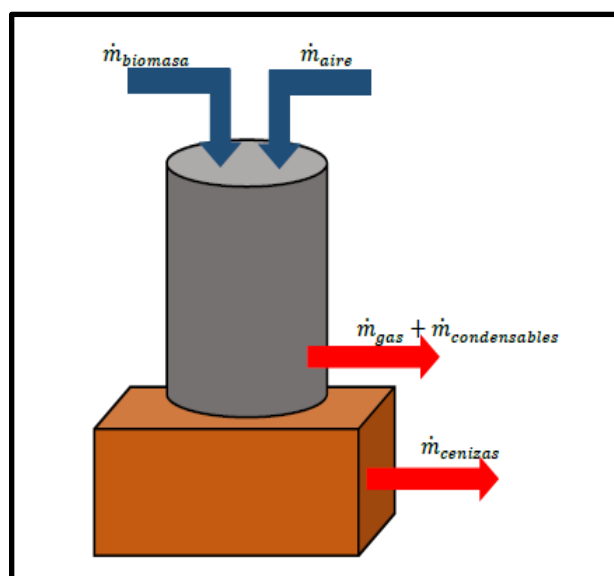
### 3.10.6. Cromatografía de gases

Se realizó la cromatografía del gas de síntesis de briquetas en el Laboratorio de análisis instrumental de la Escuela Politécnica Nacional con la finalidad de determinar la presencia y cantidad de diferentes compuestos, así como caracterizar su composición química, bajo la norma ASTM D 1945, titulada “Método de ensayo estándar para el análisis de hidrocarburos por cromatografía de gases” que describe los equipos necesarios, las condiciones de operación y los parámetros de calibración que deben seguirse para obtener resultados precisos. También establece criterios para la validación de los resultados obtenidos y proporciona las pautas para la interpretación de los cromatogramas. Es importante destacar que la norma ASTM D 1945 es una guía reconocida internacionalmente para el análisis de hidrocarburos mediante cromatografía de gases. Su cumplimiento garantiza la calidad y consistencia de los resultados obtenidos en el análisis de muestras de hidrocarburos.

Entonces

### 3.11. Balance de masa

Se realiza un balance de masa para determinar la cantidad de briquetas que entra al gasificador y qué cantidad de gas de síntesis sale o se genera. Para el balance de masa se utilizan los valores de flujo másico de biomasa, aire y gas que se obtienen en la prueba de gasificación.



**Ilustración 3-2:** Diagrama de balance de masa en el gasificador

Fuente: (Orozco 2017).



ENTRADA = SALIDA

$$B + A = G + R$$

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{cenizas} + \dot{m}_{alquitrán} \quad (11)$$

Donde:

$\dot{m}_{biomasa}$  = Cantidad de biomasa [kg/h]

$\dot{m}_{aire}$  = Flujo másico de aire para gasificación [kg/h]

$\dot{m}_{gas}$  = Flujo másico de gas pobre producido [kg/h]

$\dot{m}_{cenizas}$  = Flujo másico de cenizas producidas [kg/h]

$\dot{m}_{alquitrán}$  = Flujo másico de alquitrán (condensable) [kg/h]

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Esta sección tiene como objetivo dar a conocer los respectivos resultados que se obtuvieron durante el proyecto de investigación, cabe decir que el gas obtenido del proceso de gasificación de briquetas depende de factores como es la temperatura, el diseño del equipo, propiedades físicas y químicas de la biomasa, el agente gasificante el cual en este caso se utilizó aire, entre otros.

#### 4.1. Análisis proximales y físico-químicas

Los valores de la composición elemental de la biomasa de cáscara de coco y cascarilla de arroz se realizaron en el laboratorio de analítica de la Facultad de Ciencias, ver ANEXO D.

**Tabla 4-1:** Composición elemental de la biomasa

<b>Biomasa</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>O (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>	<b>U (%)</b>	<b>PCI (J/g)</b>
Cascarilla de arroz	41,87	4,30	38,50	1,39	-	2,795	13,74	33097,88921
Cascara de coco	30,57	8,92	44,73	0,89	-	4,2891	20,53	32482,82841

**Realizado por:** Quilumbaqui Luz., 2023.

La Tabla 4-1, nos indica los valores porcentuales de la composición elemental de los dos tipos de biomasa los cuales mediante las técnicas descritas en el capítulo anterior se obtuvo los siguientes valores en los se puede decir que supuestamente la cascarilla de arroz es el residuo más apto para llevar a cabo su proceso de combustión completa a causa su alto contenido de carbono en su composición, se observa además que las dos biomasa contienen altos porcentajes de oxígeno, lo cual quiere decir que si se gasifica con aire, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto de la biomasa sufre la reducción. Pero el contenido de humedad presente en la cáscara de coco es mayor que la cascarilla de arroz, y estos valores no deberían ser mayores al 10% ya que para un proceso de gasificación esto es un inconveniente porque no se obtiene un gas de calidad.

Estos análisis de la composición elemental de la biomasa son técnicas que son llevadas a cabo para determinar la proporción de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y pequeñas cantidades azufre. En este proyecto de investigación se tomó datos tanto del carbono como del nitrógeno de las dos biomasa de (Jama 2022), para esta investigación se continuó haciendo el análisis físico-químico de hidrógeno y oxígeno de igual forma para las dos biomasa, donde se pudo evidenciar que el porcentaje de hidrógeno es el doble a consideración de la cascarilla de arroz, así mismo

teniendo mayor humedad que el otro donde se puede constatar que el poder calorífico del coco es menor que la de la cascarilla de arroz.

## 4.2. Procedimiento experimental

Para la obtención del gas de síntesis se llevó a cabo un procedimiento experimental el cual facilita determinar los parámetros de funcionamiento para la gasificación.

### 4.2.1. Parámetros de gasificación

Se llega a determinar los parámetros que se tienen que tomar en cuenta para realizar el proceso de gasificación para hacer un mejor uso del proceso, es decir, estos parámetros me ayudaron a conocer cómo funciona el equipo, con que agente gasificante se debe realizar las pruebas, que cantidad promedio de biomasa es recomendable colocar en el gasificador, a que presión atmosférica se da a cabo el proceso, la temperatura del entorno, y la densidad del aire. A continuación, se muestra en la tabla 4-2, lo antes mencionado.

**Tabla 4-2:** Parámetros de gasificación

Parámetros de gasificación	
Tipo de gasificador	Downdraft
Agente gasificante	Aire
Densidad del aire	0,86 kg/m <sup>3</sup>
Cantidad de biomasa	3 kg de briquetas cascarilla de arroz y cáscara de coco
Tipo de materia para el arranque	carbón
Cantidad de arranque	1 kg
Temperatura ambiente	22,7 °C
Presión atmosférica	72928 Pa





**Realizado por:** Quilumbaqui Luz., 2023.

### 4.2.2. Proceso de gasificación

A continuación, se detalla resumidamente el proceso que se llevó a cabo para gasificar briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Pasos para realizar el proceso de gasificación

Pasos para realizar el proceso de gasificación	
<p>Realizar la dosificación de la muestra</p>	
<p>Encendido de la materia de arranque</p>	
<p>Llegar a una temperatura de gasificación y se procede a colocar las briquetas al gasificador mediante una tolva.</p>	
<p>Una vez cerrada la compuerta superior. Giramos la palanca en la parte inferior para que se distribuya mejor las briquetas</p>	

<p>Verificar la presencia de gas mediante un mechero.</p>	
<p>Tomar la muestra de gas de síntesis en la funda tedlar.</p>	
<p>Almacenar en un recipiente seguro llevar al laboratorio a ser analizado.</p>	
<p>Una vez terminado el proceso recoger la fracción sólida residual (cenizas) y pesar.</p>	

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

### 4.3. Valoración energética de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco

Al momento de colocar el carbón en el gasificador se tomó datos de la temperatura cada 5 minutos durante 1 hora y 30 minutos aproximadamente con el fin de verificar el momento exacto la presencia de gas y el tiempo que la llama perdura encendida.

**Tabla 4-4:** Datos de la gasificación de briquetas

Temperatura	Tiempo (min)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)
t <sub>0</sub>	0	23	23
t <sub>1</sub>	5	148	41
t <sub>2</sub>	10	380	53
t <sub>3</sub>	15	557	69
t <sub>4</sub>	20	582	118
t <sub>5</sub>	25	585	149
t <sub>6</sub>	30	583	151
t <sub>7</sub>	35	562	218
t <sub>8</sub>	40	552	209
t <sub>9</sub>	45	551	230
t <sub>10</sub>	50	551	223
t <sub>11</sub>	55	545	268
t <sub>12</sub>	60	465	178
t <sub>13</sub>	65	448	200
t <sub>14</sub>	70	421	165
t <sub>15</sub>	75	397	151
t <sub>16</sub>	80	381	145
t <sub>17</sub>	85	367	148

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

A demás se obtuvieron previamente los resultados del análisis elemental que muestra la composición química de la biomasa seca. Como se mencionó anteriormente para transformar los valores porcentuales de la composición química de biomasa de la tabla 4-4, en fracciones gravimétricas se aplica la ecuación (5).

$$G_{xi} = \frac{i}{100}$$

✓ Cascarilla de arroz

$$G_{xc} = \frac{41,87}{100} = 0,4187 \text{ kg}$$

$$G_{xH} = \frac{4,30}{100} = 0,043 \text{ kg}$$

$$G_{xo} = \frac{38,50}{100} = 0,385 \text{ kg}$$

$$G_{xN} = \frac{1,39}{100} = 0,0139 \text{ kg}$$

Una vez calculados los valores de la fracción gravimétrica, se hace uso de la ecuación (4) para establecer el valor de la masa de aire estequiométrico o teórico.

$$m_{at} = 0,1153 \times C + 0,3434 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 0,0434 \times S$$

$$m_{at} = (0,1153 \times 0,4187) + 0,3434 \left( 0,043 - \frac{0,385}{8} \right) + (0,0434 \times 0)$$

$$m_{at} = 0,046 \text{ kg/kg}$$

Se utiliza ER de 1,5 para combustibles sólidos que se localiza en la Tabla 3-6, y se procede a calcular el aire real que se utiliza en la combustión completa aplicando la ecuación (8).

$$ER = \frac{m_{ar}}{m_{at}}$$

$$m_{ar} = EA \times m_{at}$$

$$m_{ar} = 1,5 \times 0,046$$

$$m_{ar} = 0,069 \text{ kg/kg}$$

Mientras que para determinar la relación entre el ratio de equivalencia (ER) y el coeficiente de aire en exceso (EA) se indica en la siguiente ecuación (9).

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{\text{aire actual}}{\text{aire estequiométrico}} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{m_{ar}}{m_{at}} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{0,069}{0,046} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = 1,5 = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

En seguida que se determina la relación entre el ratio de equivalencia ER que se encuentra entre los valores de 0.2 a 0,25, valores convenientes para una gasificación tipo Downdraft, además se cuenta con la masa de aire estequiométrico, se procede a calcular la masa de aire necesario para efectuar la gasificación utilizando la ecuación (10).

$$m_{ag} = m_{at} \times ER$$

$$m_{ag} = 0,046 \times 0,20$$

$$m_{ag} = 0,0092 \text{ kg/kg}$$

✓ Cáscara de coco

De la misma manera se procede a tomar los valores del análisis elemental de la tabla 4-4, para determinar sus fracciones gravimétricas con la ecuación (5) y posteriormente obtener el valor de la masa de aire estequiométrico.

$$G_{xi} = \frac{i}{100}$$

$$G_{xC} = \frac{30,57}{100} = 0,3057 \text{ kg}$$

$$G_{xH} = \frac{8,92}{100} = 0,0892 \text{ kg}$$

$$G_{xO} = \frac{44,73}{100} = 0,4473 \text{ kg}$$

$$G_{xN} = \frac{0,89}{100} = 0,0089 \text{ kg}$$

Al tener las fracciones gravimétricas de la biomasa de la cáscara de coco, se aplica la ecuación (4) para conseguir el valor de la masa de aire estequiométrico.

$$m_{at} = 0,1153 \times C + 0,3434 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 0,0434 \times S$$

$$m_{at} = (0,1153 \times 0,3057) + 0,3434 \left( 0,089 - \frac{0,447}{8} \right) + (0,0434 \times 0)$$



$$m_{at} = 0,047 \text{ kg/kg}$$

Con el coeficiente de aire en exceso (EA) de 1,5 para combustibles sólidos y la masa de aire teórico o estequiométrico, se determina la masa de aire real con la siguiente ecuación (8).

$$ER = \frac{m_{ar}}{m_{at}}$$

$$m_{ar} = EA \times m_{at}$$

$$m_{ar} = 1,5 \times 0,047$$

$$m_{ar} = 0,07 \text{ kg/kg}$$

Para identificar la eficiencia del gas, se relaciona el valor de la masa del aire real con el valor de la masa del aire teórico con la ecuación (9).

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{m_{ar}}{m_{at}} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{0,07}{0,047} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = 1,48 = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

En cuanto a la cantidad de aire que se necesita para realizar la gasificación, se toma en cuenta los valores de 0,2 a 0,25 de ER para un mejor rendimiento. En este caso se toma 0.2 en la ecuación (10).

$$m_{ag} = m_{at} \times ER$$

$$m_{ag} = 0,047 \times 0,20$$

$$m_{ag} = 0,0094 \text{ kg/kg}$$

- ✓ Cantidad de aire estequiométrico que se utiliza para la mezcla de las dos biomásas (briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco).

$$m_{at} = \frac{0,046 + 0,047}{2}$$

$$m_{at} = 0,0465 \text{ kg/kg}$$

- ✓ Cantidad de aire real que se utiliza para la mezcla de las dos biomásas (briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco).

$$m_{ar} = \frac{0,069 + 0,07}{2}$$

$$m_{ar} = 0,0695 \text{ kg/kg}$$

- ✓ Cantidad de aire para realizar la gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco.

$$m_{ag} = \frac{0,0092 + 0,0094}{2}$$

$$m_{ag} = 0,0093 \text{ kg/kg}$$

- ✓ Coeficiente de aire en exceso ( $\lambda$ )

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$$

$$\lambda = \frac{1,5 + 1,48}{2}$$

$$\lambda = 1,49$$

**Tabla 4-5:** Resultados del coeficiente de aire en exceso para el proceso de gasificación

Parámetros	Cascarilla de arroz	Cáscara de coco	Mezcla de ambas biomásas	Unidades
$m_{at}$	0,046	0,047	0,0465	kg/kg
$m_{ar}$	0,069	0,07	0,0695	kg/kg
$m_{ag}$	0,0092	0,0094	0,0093	kg/kg
$\lambda$ (coeficiente de aire en exceso)	1,5	1,48	1,49	

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

En la Tabla 4-5, se muestran los valores obtenidos de la gasificación, como en esta investigación se trabajó con una mezcla de biomásas, entonces se identificó los parámetros por separado para

luego encontrar el aproximado de la mezcla. El coeficiente de aire en exceso que se presentó en la gasificación de briquetas fue mayor a 1 el cual quiere decir que se obtuvo una mezcla de gas pobre con bajo poder calorífico. En sí esto demuestra la proporción entre la cantidad de aire real y la necesaria para una combustión exacta, si el  $\lambda$  es menor a 1 es combustión por déficit de aire y por el contrario si es mayor a 1 es una combustión por exceso de aire.

#### 4.3.1. Resultado del análisis cromatográfico del gas de síntesis de las briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco.

Los análisis cromatográficos se realizaron de acuerdo con la norma ASTM 1095 en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional. Se adjunta el informe de resultados en la sección de anexos, ANEXO C.

**Tabla 4-6:** Parámetros valorados en el análisis cromatográfico

Condiciones de trabajo	
Parámetros	Valores
Temperatura ambiente	17 °C
% HR ambiente	47%
Temperatura de la muestra	64,5 °F 18 °C
Presión de la muestra	0,7 psi 4895,3 Pa
Norma de referencia	ASTM 1945: Cromatografía
Procedimiento interno	PE-7.2-01 7.2-02 PE-

**Realizado por:** Quilumbaqui Luz., 2023.

Mediante los parámetros descritos en la siguiente Tabla 4-6, se puede determinar que la temperatura ambiente se debe considerar ya que puede afectar la volatilidad de los componentes de la muestra y también puede influir en la estabilidad y eficiencia de la columna cromatográfica. Otro parámetro que se tuvo en cuenta es la humedad relativa, es importante que la proporción de vapor de agua presente en el aire tenga relación con la cantidad máxima que el aire puede contener a una determinada temperatura; la temperatura de la muestra también puede influir en la separación de los componentes y la eficiencia del método. En algunos casos una presión más alta puede mejorar la velocidad de separación y la resolución de los componentes en la columna cromatográfica, y esto depende según del tipo de cromatografía utilizada. Además, al comparar la respuesta de la muestra con la norma de referencia, se puede determinar la cantidad o la concentración de los componentes en la muestra. Y finalmente, procedimiento interno se refiere a una serie de pasos y técnicas utilizadas para monitorear y asegurar la calidad de precisión de los

resultados. Esto puede incluir la utilización de estándares internos, la calibración del equipo, la verificación de la precisión y la repetibilidad, y la documentación adecuada del procedimiento. Estos parámetros son solo algunos de los muchos factores que pueden influir en los resultados de un análisis cromatográfico, garantizando la precisión y la validez de los resultados.

**Tabla 4-7:** Composición del gas de síntesis de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco

COMPOSICIÓN	Componente	%Moles	Desv. Std
	Hidrógeno	1,4	0,017
	Oxígeno	6,52	0,067
	Nitrógeno	67,54	0,532
	Monóxido de carbono	5,63	0,009
	Metano	1,55	0,014
	Dióxido de carbono	16,37	0,169
	Etano	0,09	0,009
	Agua	0,82	0,025
	Propano	0,09	0,005

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

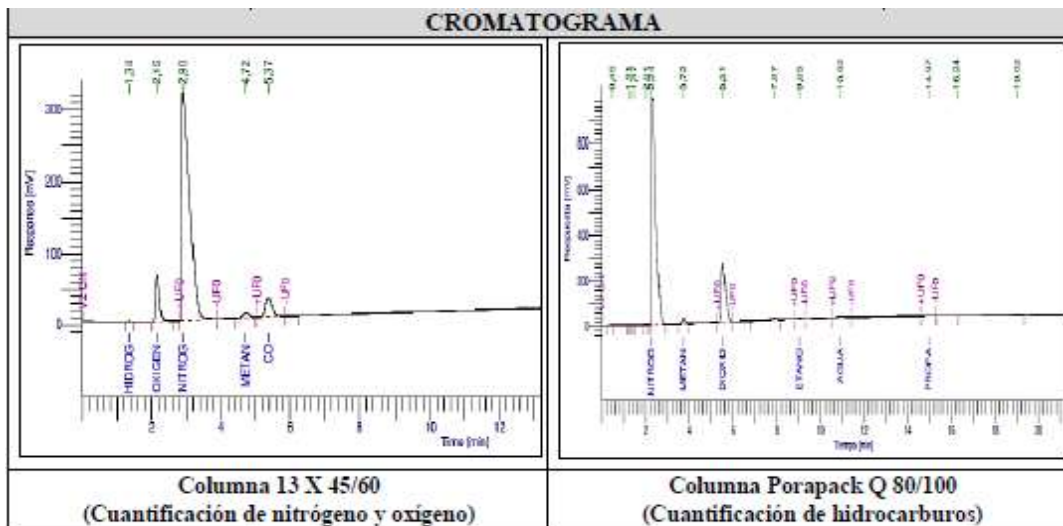
Según el análisis cromatográfico que se lo realizó, se puede observar que existe en mayor cantidad el nitrógeno con un 67,54 % molar, lo cual quiere decir que hubo mayor cantidad de aire a la entrada del gasificador o mismo esta clase de mezcla de briquetas no son útiles para la obtención de gas de síntesis; además de se puede observar en el ANEXO E que esta concentración se encuentra en el rango de composición según la norma.

**Tabla 4-8:** Propiedades del gas de síntesis de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco

PROPIEDADES	Componentes	Valores	Unidades
	Densidad relativa	1,05	-
	Peso molecular promedio	30,37	[g/mol]
	Densidad de la muestra	1,28	[g/L]
	Poder calorífico superior	1582,78	[kJ/m]
	Poder calorífico inferior	1471,36	[KJ/m]
	Factor de compresibilidad	1,0000	(z)

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

La cromatografía muestra el porcentaje molar de cada componente que conforma el gas de síntesis, conformado por elementos generales y en pequeñas trazas de hidrocarburos, este análisis fue realizado en la Escuela Politécnica Nacional bajo la norma ASTM D 1945: Cromatografía, el informe del análisis del gas de síntesis se presenta en el ANEXO C.



**Ilustración 4-1:** Cromatograma del gas de síntesis

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

En la ilustración 4-1, se indica las diferentes especies moleculares presentes en la mezcla gaseosa de la primera gasificación de briquetas. El objetivo de la cromatografía es la cuantificación de cada compuesto presente la mezcla, para ello separar compuestos orgánicos e inorgánicos térmicamente estables y volátiles una mezcla determinándolas en concentraciones estándares o en trazas (ppm) mediante una técnica analítica.

#### 4.3.1.1. Composición elemental del gas de síntesis

La gasificación es un proceso termoquímico en el que el sustrato carbonoso (briquetas en este caso) se transforma en un gas combustible de bajo poder calorífico a través una serie de reacciones, en esta investigación se usó briquetas el cual es una alternativa sostenible para la obtención de energía para ello se trabajó con parámetros como es la temperatura, agente gasificante que fue el aire, vapor de agua,  $O_2$  y  $CO_2$ . Una vez transformado las briquetas en gas de síntesis, este producto está compuesto por hidrógeno  $H_2$ , monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), agua ( $H_2O$ ) y trazas de hidrocarburos como es el etano ( $C_2H_6$ ) y propano ( $C_3H_8$ ). Las aplicaciones de este producto de gas se basan en la utilización de la energía térmica que genera el propio proceso de gasificación y el aprovechamiento y aprovechamiento del gas producido como en la producción de energía eléctrica, asimismo puede ser materia prima o un agente intermediario para la obtención de diferentes productos químicos entonces se procura obtener un alto rendimiento de gas de síntesis.

El análisis cromatográfico muestra el componente que conforma el gas de síntesis, en este caso los resultados de este análisis se obtuvieron en cantidades de concentración de cada componente, se observa en la siguiente Tabla 4-9.

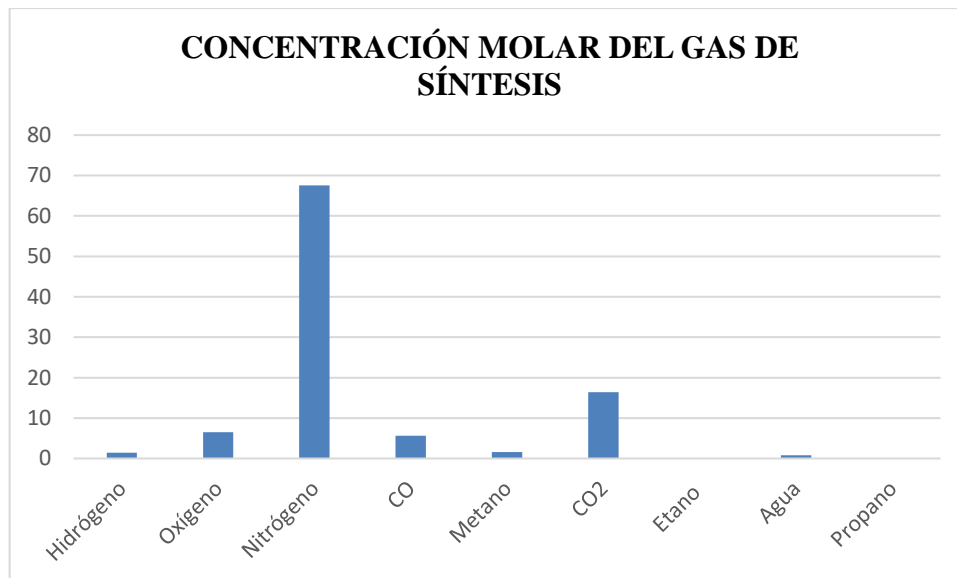
**Tabla 4-9:** Análisis cromatográfico

<b>RESULTADOS</b>			
	Componente	% moles	Desv. Std
<b>COMPOSICIÓN</b>	Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	1,40	0,017
	Oxígeno (O)	6,52	0,067
	Nitrógeno (N)	67,54	0,532
	Monóxido de carbono (CO)	5,63	0,009
	Metano (CH <sub>4</sub> )	1,55	0,014
	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	16,37	0,169
	Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	0,09	0,009
	Agua (H <sub>2</sub> O)	0,82	0,025
	Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0,09	0,005
	Total	100,00	0,847
<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>			
Temperatura (°C)	17	Norma de referencia	ASTMD 1945: Cromatografía

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

El proceso de gasificación se dio a condiciones de trabajo ya antes mencionadas, por lo que son de suma importancia para el resultado esperado, ya que éstas en gran medida pueden favorecer o por el contrario perjudicar el resultado. Mediante la Ilustración 4-2, se puede apreciar que las concentraciones molares varían en su totalidad obteniéndose de esta manera una concentración de H<sub>2</sub> de 1,40 % y CO de 5,63 % respectivamente, mencionando estos dos elementos ya que en la obtención de gas de síntesis estos dos elementos son los más representativos como dice (Forero, Guerrero y Sierra 2012) que un gas de síntesis está compuesto principalmente por H<sub>2</sub> y CO, debido a su composición dispone de un alto poder calorífico por tal motivo su uso va enfocado directamente a sistemas de generación eléctrica o como intermediario para procesos de síntesis. Entonces se aprecia que CO<sub>2</sub> con el 16,37 % y Nitrógeno con el 67,54 % son los más representativos en la Ilustración 4-2, deduciendo de esta manera que el flujo de aire de entrada al gasificador fue excesivo ya que el agente gasificante fue aire conformado por nitrógeno, oxígeno y otros compuestos que también forman parte en trazas pequeñas, es decir por debido al incremento aire/biomasa. Pero aquello no quiere decir que no se generó la gasificación ya que se demuestra que si hay pequeñas cantidades de H<sub>2</sub> y CO, en si el tiempo de la llama encendida fue muy corto por el 1,55 % de CH<sub>4</sub>. Por otra parte, (Castiblanco y Milquez 2021) menciona que la

temperatura es otro de los factores que influye en el proceso de gasificación, y por ende hará un cambio en la composición del gas de síntesis, por consiguiente, manifiesta que las cantidades de CO y H<sub>2</sub> aumentan sobre todo al aumentar la temperatura, y luego comienzan a disminuir. Por otro lado, al aumentar el oxígeno, las cantidades de H<sub>2</sub> y CO disminuyen lo que atribuye a que la gasificación está cerca a la combustión lo que produce un aumento de CO<sub>2</sub>. Con respecto a esta investigación de acuerdo a la Tabla 4-4, a la t<sub>7</sub> de 562 °C hubo presencia de gas que perduro un corto lapso de tiempo lo que conlleva a decir que luego de este transcurso de tiempo la temperatura se mantuvo constante en un rango aproximado de 20 min, para luego disminuir la temperatura, es decir que los picos más altos fueron t<sub>5</sub> de 583 °C y t<sub>6</sub> de 583 °C, más de esto la temperatura empezó a disminuir y permanecer constante, lo que lleva a decir que no hubo un incremento significativo de temperatura para que incremente la cantidad de H<sub>2</sub> y CO, en consecuencia degradando la calidad del gas producto.



**Ilustración 4-2:** Composición del gas de síntesis

**Realizado por:** Quilumbaqui Luz., 2023.

Por otra parte, al tratarse de una gasificación de una mezcla de biomazas posiblemente existen ciertas interacciones que no permitan la producción una alta concentración de hidrógeno.

También existe la posibilidad que, al momento de producirse los hidrocarburos en pequeñas trazas, los enlaces que estaban formando hidrógeno (H<sub>2</sub>), por mismamente se trasladan para formar la estructura de etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) y propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>).

#### 4.3.1.2. Poder calorífico inferior y superior del gas de síntesis

En la siguiente Tabla 4-10, se puede observar los datos del poder calorífico superior (HLV) y del poder inferior (LHV) no varía significativamente, es decir que el LHV es menor que el HLV

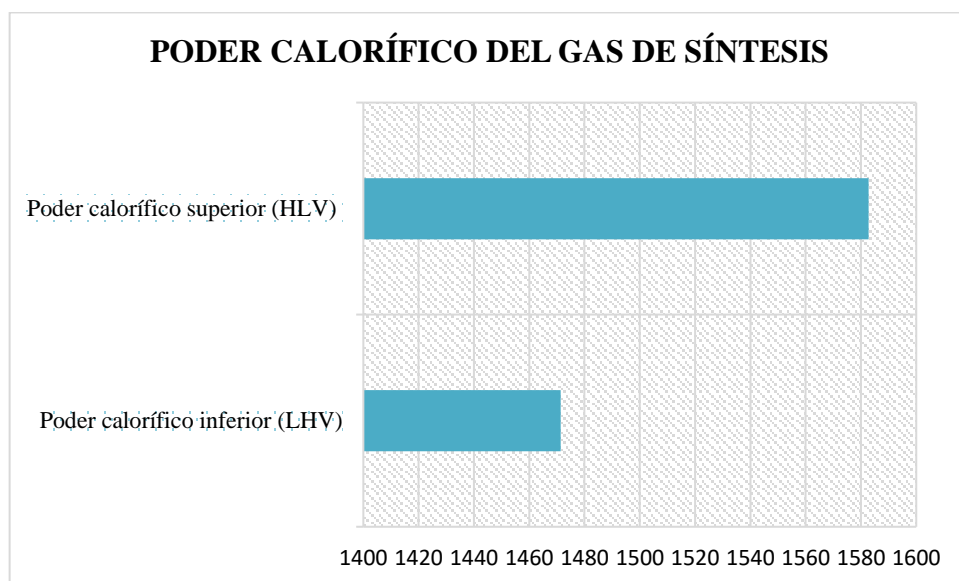
debido parte de calor producido por el quemado de la materia se gasta en vaporizar el agua formada. Según (Ahumada et al. 2016) el poder calorífico del gas de síntesis generado por la gasificación con el agente gasificante que es el aire es, evidentemente, inferior que la de oxígeno puro. Por tal se obtiene con la utilización de aire como agente gasificante el valor calorífico generalmente es inferior a los 6000 kJ/m<sup>3</sup>, lo que limita su uso en algunas zonas industriales.

**Tabla 4-10:** Poder calorífico superior e inferior de las briquetas

<b>PODER CALORÍFICO DEL GAS DE SÍNTESIS</b>			
<b>Biomasa</b>	<b>Poder calorífico superior (HLV)</b>	<b>Poder calorífico inferior (LHV)</b>	<b>Unidad</b>
Briquetas cascarilla de arroz y cáscara de coco	1582,78	1471,36	kJ/m <sup>3</sup>

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Según (Ahumada et al. 2016) dice que la velocidad del aire, el contenido de biomasa son unas de las variables que tienen efecto en el resultado del poder calorífico del gas de síntesis a partir de la gasificación de biomasa, de esta manera varía entre 250 – 4940 kJ/m<sup>3</sup> independientemente del tipo de biomasa que se utiliza. Además, el contenido de la humedad es otro factor que está relacionado al resultado del poder calorífico, al igual que la composición elemental de la biomasa es directamente proporcional al resultado del poder calorífico inferior por la cantidad de C, H y O de la biomasa. A su vez el poder calorífico está directamente relacionado con la cantidad de energía liberada al quemar el combustible (briquetas), si el gas de síntesis tiene una baja concentración de monóxido de carbono e hidrógeno por ende su poder calorífico será menor.



**Ilustración 4-3:** Resultado del poder calorífico del gas de síntesis

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.



#### 4.4. Cálculo del balance de masa para las briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco

Mediante los datos obtenidos durante la gasificación se procede a efectuar un balance de masa para conseguir los flujos másicos tanto de entrada al reactor como de salida. Cabe decir que se realizó tres pruebas de gasificación, a continuación, se muestra los datos y el cálculo respectivo.

##### - Primera gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco

**Tabla 4-11:** Guía durante la primera gasificación

Descripción	Briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco
Kg de briquetas utilizada	3 kg
Kg de arranque (carbón)	1 kg
Tamaño de materia	3 cm diámetro y 4,5 cm largo
Tiempo de gasificación (tiempo de llama)	3 min
tiempo total del proceso de gasificación	1 hora
Kg cenizas	0,34 kg
Alquitrán	10 ml
Temperatura ambiente	22,7 °C
Humedad relativa	38,6%

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Se realiza el balance de masa con la siguiente ecuación (11):

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{alquitrán} + \dot{m}_{cenizas}$$

##### Entradas:

$\dot{m}_{biomasa}$  = Flujo másico de briquetas (cascarilla de arroz y cáscara de coco)

$$\dot{m}_{biomasa} = \frac{3 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{biomasa} = 3 \text{ kg/h}$$

$\dot{m}_{aire}$  = flujo másico de aire para gasificar

Mediante el uso del anemómetro se logró obtener los siguientes datos:

- Velocidad del aire en la entrada de la tubería del gasificador = 9,7 m/s
- Velocidad del aire a la salida de la tubería del gasificador = 6,8 m/s
- Velocidad del aire total que ingresa a la cámara de combustión:

velocidad de aire total que ingresa = 9,7 m/s – 6,8 m/s

velocidad de aire total que ingresa = **2,9 m/s**

Luego calculamos el caudal del aire que ingresa a la cámara de combustión para realizar la gasificación, para ello utilizamos la siguiente ecuación (12) donde se da la velocidad del aire y la sección por donde pasa el aire.

$$Q = V \times S \quad (12)$$

$$Q = V \times \pi \times r^2$$

$$Q = 2,9 \text{ m/s} \times \pi \times (0,0508 \text{ m})^2$$

$$Q = 0,02351 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \mathbf{84,64 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Y por ende calculamos el flujo másico del aire para gasificar mediante la ecuación (13) donde interviene densidad del aire por el caudal del aire.

$$\dot{m}_{\text{aire}} = \rho \times Q \quad (13)$$

$$\dot{m}_{\text{aire}} = 0,84 \text{ kg/m}^3 \times 84,64 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{\text{aire}} = \mathbf{71,097 \text{ kg/h}}$$

### Salidas

$\dot{m}_{\text{alquitrán}}$  = flujo másico del alquitrán

$$\dot{m}_{\text{alquitrán}} = \frac{0,010 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{\text{alquitrán}} = \mathbf{0,010 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{\text{cenizas}}$  = flujo másico de las cenizas

$$\dot{m}_{\text{cenizas}} = \frac{0,30 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{\text{cenizas}} = \mathbf{0,30 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{\text{gas}}$  = flujo másico del gas de salida, se obtiene con la siguiente ecuación (11):

$$\dot{m}_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} = \dot{m}_{\text{gas}} + \dot{m}_{\text{alquitrán}} + \dot{m}_{\text{cenizas}}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = \dot{m}_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} - \dot{m}_{\text{alquitrán}} - \dot{m}_{\text{cenizas}}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = (3 + 71,097 - 0,010 - 0,30) \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = \mathbf{73,787 \text{ kg/h}}$$

**Tabla 4-12:** Resultados del balance de masa de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco de la primera gasificación

ENTRADAS		
Variables		cantidad (kg/h)
$\dot{m}_{biomasa}$	Flujo másico de biomasa	3
$\dot{m}_{aire}$	flujo másico de aire	71,097
<b>Total</b>		74,097
SALIDAS		
Variables		cantidad (kg/h)
$\dot{m}_{alquitrán}$	Flujo másico del alquitrán	0,010
$\dot{m}_{cenizas}$	flujo másico de cenizas	0,30
$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico del gas	73,787
<b>Total</b>		74,097

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Estos son todas las corrientes de entrada y salida del balance de masa de la primera gasificación, y se observa que no hay pérdida ni ganancia de materia en el sistema, es decir, que se cumple el principio de conservación de masa, lo que significa que la cantidad total de masa en el sistema se mantiene constante.

- **Segunda gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco**

**Tabla 4-13:** Guía durante la segunda gasificación

Descripción	Briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco
Kg de briquetas utilizada	4 kg
Kg de arranque (carbón)	1,1 kg
Tamaño de materia	3 cm diámetro y 4,5 cm largo
Tiempo de gasificación (tiempo de llama)	3 min
tiempo total del proceso de gasificación	1 hora
Kg cenizas	0,36 kg
Alquitrán	10,2 ml
Temperatura ambiente	22 °C
Humedad relativa	36,5 %

Realizado por: Quilumbaqui L.,2023

Se realiza el balance de masa con la siguiente ecuación (11):

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{alquitrán} + \dot{m}_{cenizas}$$

**Entradas:**

$\dot{m}_{biomasa}$  = Flujo másico de briquetas (cascarilla de arroz y cáscara de coco)

$$\dot{m}_{biomasa} = \frac{4 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{biomasa} = \mathbf{4 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{aire}$  = flujo másico de aire para gasificar

Mediante el uso del anemómetro se logró obtener los siguientes datos:

- Velocidad del aire en la entrada de la tubería del gasificador = 9,7 m/s
- Velocidad del aire a la salida de la tubería del gasificador = 6,8 m/s
- Velocidad del aire total que ingresa a la cámara de combustión:

velocidad de aire total que ingresa = 9,7 m/s – 6,8 m/s

velocidad de aire total que ingresa = **2,9 m/s**

Luego calculamos el caudal del aire que ingresa a la cámara de combustión para realizar la gasificación, para ello utilizamos la siguiente ecuación (12) donde se la velocidad del aire y la sección por donde pasa el aire.

$$Q = V \times S$$

$$Q = V \times \pi \times r^2$$

$$Q = 2,9 \text{ m/s} \times \pi \times (0,0508 \text{ m})^2$$

$$Q = 0,02351 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \mathbf{84,64 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Por consiguiente, calculamos el flujo másico del aire para gasificar mediante la ecuación (13) donde interviene densidad del aire por el caudal del aire.

$$\dot{m}_{aire} = \rho \times Q$$

$$\dot{m}_{aire} = 0,84 \text{ kg/m}^3 \times 84,64 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{aire} = \mathbf{71,097 \text{ kg/h}}$$

### Salidas

$\dot{m}_{alquitrán}$  = flujo másico del alquitrán

$$\dot{m}_{alquitrán} = \frac{0,0102 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{alquitrán} = \mathbf{0,0102 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{cenizas}$  = flujo másico de las cenizas

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{0,36 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = \mathbf{0,36 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{gas}$  = flujo másico del gas de salida, se obtiene con la siguiente ecuación (11):

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{alquitrán} + \dot{m}_{cenizas}$$

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} - \dot{m}_{alquitrán} - \dot{m}_{cenizas}$$

$$\dot{m}_{gas} = (4 + 71,097 - 0,0102 - 0,36)kg/h$$

$$\dot{m}_{gas} = 74,726 kg/h$$

**Tabla 4-14:** Resultados del balance de masa de briquetas de cascarilla de arroz y cascara de coco de la segunda gasificación

ENTRADAS		
Variables		cantidad (kg/h)
$\dot{m}_{biomasa}$	Flujo másico de biomasa	4
$\dot{m}_{aire}$	flujo másico de aire	71,097
<b>Total</b>		75,097
SALIDAS		
Variables		cantidad (kg/h)
$\dot{m}_{alquitrán}$	Flujo másico del alquitrán	0,0102
$\dot{m}_{cenizas}$	flujo másico de cenizas	0,36
$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico del gas	74,726
<b>Total</b>		75,097

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Estos son todas las corrientes de entrada y salida del balance de masa de la segunda gasificación, y se observa que no hay pérdida ni ganancia de materia en el sistema, es decir, que se cumple el principio de conservación de masa, lo que significa que la cantidad total de masa en el sistema se mantiene constante.

- **Tercera gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco**

**Tabla 4-15:** Guía durante la tercera gasificación

Descripción	Briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco
Kg de briquetas utilizada	5 kg
Kg de arranque (carbón)	1,2 kg
Tamaño de materia	3 cm diámetro y 4,5 cm largo
Tiempo de gasificación (tiempo de llama)	3 min
tiempo total del proceso de gasificación	1 hora
Kg cenizas	0,49 kg
Alquitrán	9 ml
Temperatura ambiente	22 °C
Humedad relativa	36,5%

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Se realiza el balance de masa con la siguiente ecuación (11):

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{alquitran} + \dot{m}_{cenizas}$$

### Entradas:

$\dot{m}_{biomasa}$  = Flujo másico de briquetas (cascarilla de arroz y cáscara de coco)

$$\dot{m}_{biomasa} = \frac{5 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{biomasa} = \mathbf{5 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{aire}$  = flujo másico de aire para gasificar

Mediante el uso del anemómetro se logró obtener los siguientes datos:

- Velocidad del aire en la entrada de la tubería del gasificador = 9,7 m/s
- Velocidad del aire a la salida de la tubería del gasificador = 6,8 m/s
- Velocidad del aire total que ingresa a la cámara de combustión:

velocidad de aire total que ingresa = 9,7 m/s – 6,8 m/s

velocidad de aire total que ingresa = **2,9 m/s**

Luego calculamos el caudal del aire que ingresa a la cámara de combustión para realizar la gasificación, para ello utilizamos la siguiente ecuación (12) donde se la velocidad del aire y la sección por donde pasa el aire.

$$Q = V \times S$$

$$Q = V \times \pi \times r^2$$

$$Q = 2,9 \text{ m/s} \times \pi \times (0,0508 \text{ m})^2$$

$$Q = 0,02351 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \mathbf{84,64 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Por consiguiente, calculamos el flujo másico del aire para gasificar mediante la ecuación (13) donde interviene densidad del aire por el caudal del aire.

$$\dot{m}_{aire} = \rho \times Q$$

$$\dot{m}_{aire} = 0,84 \text{ kg/m}^3 \times 84,64 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{aire} = \mathbf{71,097 \text{ kg/h}}$$

### Salidas

$\dot{m}_{alquitran}$  = flujo másico del alquitran

$$\dot{m}_{alquitran} = \frac{0,009 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{alquitran} = \mathbf{0,009 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{cenizas}$  = flujo másico de las cenizas

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{0,49 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = \mathbf{0,49 \text{ kg/h}}$$

$\dot{m}_{gas}$  = flujo másico del gas de salida, se obtiene con la siguiente ecuación (11):

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{alquitrán} + \dot{m}_{cenizas}$$

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} - \dot{m}_{alquitrán} - \dot{m}_{cenizas}$$

$$\dot{m}_{gas} = (5 + 71,097 - 0,009 - 0,49)kg/h$$

$$\dot{m}_{gas} = 75,598 \text{ kg/h}$$

**Tabla 4-16:** Resultados del balance de masa de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco de la tercera gasificación

ENTRADAS		
Variables		cantidad (kg/h)
$\dot{m}_{biomasa}$	Flujo másico de biomasa	5
$\dot{m}_{aire}$	flujo másico de aire	71,097
<b>Total</b>		76,097
SALIDAS		
Variables		cantidad (kg/h)
$\dot{m}_{alquitrán}$	Flujo másico del alquitrán	0,009
$\dot{m}_{cenizas}$	flujo másico de cenizas	0,49
$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico del gas	75,598
<b>Total</b>		76,097

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Estos son todas las corrientes de entrada y salida del balance de masa de la tercera gasificación, y se observa que no hay pérdida ni ganancia de materia en el sistema, es decir, que se cumple el principio de conservación de masa, lo que significa que la cantidad total de masa en el sistema se mantiene constante.

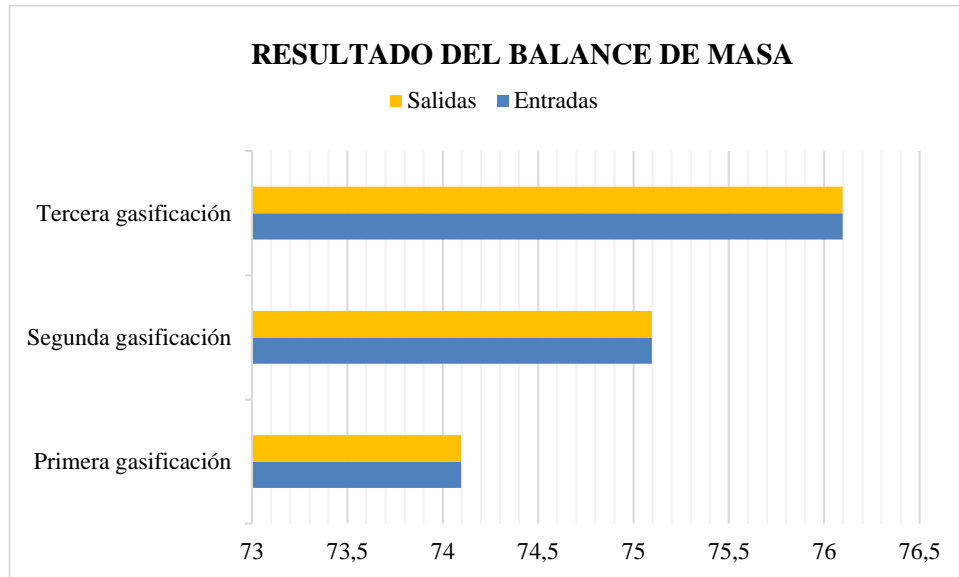
**Tabla 4-17:** Resultados del balance de masa

Balance de masa				
Balance	Primera gasificación	Segunda gasificación	Tercera gasificación	Unidades
Entradas	74,097	75,097	76,097	kg/h
Salidas	74,097	75,097	76,097	kg/h

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

El funcionamiento del gasificador se efectuó alimentando con carbón y posteriormente briquetas por la compuerta superior, al mismo tiempo que se encendió el equipo y se suministró una corriente de aire, posteriormente se obtuvo el flujo másico de gas, el residuo líquido y sólido respectivamente. Entonces para el flujo másico del combustible es decir de las briquetas y el de las cenizas y del alquitrán fueron evaluados de forma experimental para cada gasificación. El flujo másico del aire se determinó midiendo la velocidad del aire mediante un anemómetro y

posterior este valor convertirlo en flujo másico. Y con respecto al flujo másico del gas se aplicó la ecuación (11) de balance de masa y se determinó el valor correspondiente flujo másico del gas que se obtuvo en las tres gasificaciones, los resultados se recogen en la Ilustración 4-4:



**Ilustración 4-4:** Resultado del balance de masa

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

**Tabla 4-18:** Resultados de la fracción sólida y gaseosa de las tres gasificaciones

FRACCIÓN SÓLIDA			
Proceso de gasificación	Variable		Cantidad (Kg/h)
Primera gasificación	$\dot{m}_{biomasa}$	Flujo másico de biomasa	3
Segunda gasificación	$\dot{m}_{biomasa}$	Flujo másico de biomasa	4
Tercera gasificación	$\dot{m}_{biomasa}$	Flujo másico de biomasa	5
FRACCIÓN GASEOSA			
Proceso de gasificación	Variable		Cantidad (kg/h)
Primera gasificación	$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico del gas	73,787
Segunda gasificación	$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico del gas	74,726
Tercera gasificación	$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico del gas	75,598

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

A continuación, la Tabla 4-18, presenta los valores tanto de la fracción sólida (flujo másico de la biomasa) que se refiere a la cantidad de biomasa que se alimenta en el reactor de gasificación por unidad de tiempo y la fracción gaseosa (flujo másico del gas) que es la cantidad de gas de síntesis que se produce por unidad tiempo, los cuales son importantes para comprender cómo se maneja la entrada y salida de materiales en el proceso de gasificación. Estos dos flujos deben ajustarse adecuadamente para controlar la eficiencia y el rendimiento del proceso de gasificación.



#### 4.5. Análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa obtenidos de la gasificación

En definitiva, con respecto a la hipótesis planteada anteriormente es verdad que existe una relación directa entre la cantidad de briquetas utilizadas y la cantidad del gas producido ya que a medida que se incrementa la cantidad de briquetas, hay un mínimo de ascenso de gas de síntesis pero no se podría llamar de un gas calidad ya que el gas obtenido no tiene un contenido energético alto o idóneo como para que éste gas sea utilizado en otro estudio o como materia prima para producción de compuestos químicos. Y la cantidad de briquetas utilizadas es muy poco como para hacer varias prácticas y conseguir un gas de calidad.

Mediante un análisis estadístico se busca identificar si hay una diferencia significativa entre las tres prácticas realizadas. En este proceso de gasificación se manipularon variables independientes para examinar su efecto en la variable dependiente, es decir, se busca demostrar si un factor en particular tiene un impacto significativo en los resultados. Para tal análisis estadístico se empleó el anova el cual es usualmente usado para este tipo de estudio. Para ello se utilizó la Tabla 4-19, que indica las variables dependientes como es el flujo de la biomasa y el flujo de aire; variables independientes como son el flujo del alquitrán, la fracción sólida y fracción gaseosa.

**Tabla 4-19:** Datos de las entradas y salidas del gasificador

	Gasificación 1	Gasificación 2	Gasificación 3
<b>Variables de entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>
Temperatura de gasificación (°C)	562	567	576
Flujo de biomasa (kg/h)	3	4	5
Flujo de aire (kg/h)	71,097	71,097	71,097
<b>Variables de salida</b>	<b>Salida</b>	<b>Salida</b>	<b>Salida</b>
Flujo de alquitrán (kg/h)	0,01	0,0102	0,009
Flujo de cenizas (kg/h)	0,30	0,36	0,46
Flujo de gas (kg/h)	73,787	74,726	75,628

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

##### 4.5.1. Análisis estadístico Anova

A partir de los datos obtenidos del análisis de la fase sólida (flujo de ceniza) y la fase gaseosa (flujo de gas) se realizó el análisis estadístico mediante una comparación de muestras, donde se comparó tanto la fase sólida como la fase la gaseosa en las 3 gasificaciones, obteniendo el siguiente resumen estadístico:

**Tabla 4-20:** Resumen estadístico de la fase sólida y la fase gaseosa para las 3 gasificaciones

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
<b>FASE SÓLIDA</b>	3	0,373333	0,080829	21,6506%	0,3	0,46	0,16	0,510608	
<b>FASE GASEOSA</b>	3	74,7037	0,905707	1,2124%	73,787	75,598	1,811	-0,078415	
<b>Total</b>	6	37,5385	40,7165	108,466% <sup>7</sup>	0,3	75,598	75,298	0,00080625	-1,6655

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

Donde, se muestra el promedio de las 3 gasificaciones analizadas en la fase sólida, obteniendo un promedio de 0,3733 kg/h de flujo de ceniza y en la fase gaseosa fue de 74,7037 kg/h de flujo de gas.

**- Prueba de Levene's**

Para verificar el análisis de varianza se realizó la prueba de Levene's, donde los resultados evalúan la igualdad de las varianzas para una variable calculada para dos o más grupos.

La prueba de hipótesis es la siguiente:

$$H_0: \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$

$$H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$$

**- Verificación de Varianza**

	Prueba	Valor-P
<b>Levene's</b>	3,28055	0,144341

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Fase sólida / Fase gaseosa	0,080829	0,905707	0,00796452	0,0158

Los estadísticos mostrados en esta tabla evalúan la hipótesis nula ( $H_0$ ), donde las desviaciones estándar dentro de cada una de las gasificaciones en cada fase son iguales. De particular interés es el valor-P. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza.

- **Sesgo estandarizado:**

De particular interés es el sesgo estandarizado que puede usarse para comparar si las muestras provienen de distribuciones normales. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones estándar. En este caso, ambos valores de sesgo estandarizado se encuentran dentro del rango esperado.

	<b>Sesgo Estandarizado</b>
<b>Fase sólida</b>	0,510608
<b>Fase gaseosa</b>	-0,078415

**Tabla 4-21:** Análisis de varianza (ANOVA) entre la fase sólida y la fase gaseosa

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
Entre grupos	8287,5	1	8287,5	20046,25	0,0000
Intra grupos	1,65368	4	0,413419		
Total (Corr.)	8289,15	5			

**Realizado por:** Quilumbaqui Luz., 2023.

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 20046,3, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la fase sólida y la fase gaseosa con un nivel del 95,0% de confianza. Por lo tanto, la fase gaseosa presentó mayor flujo de gas en las tres gasificaciones con un promedio de 74,7037 kg/h.

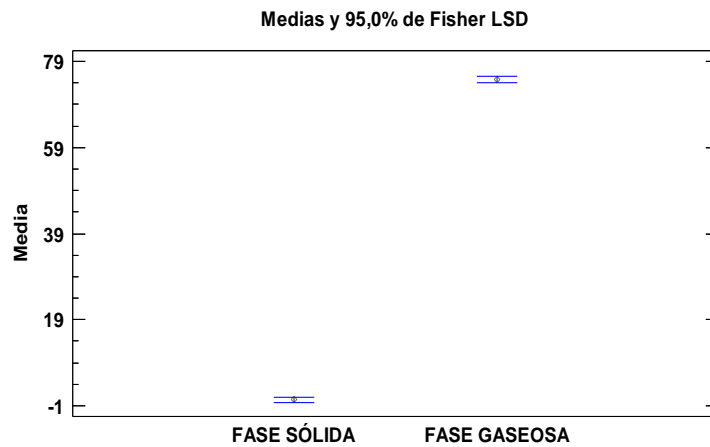
**Prueba de rangos múltiples:** Método 95,0 porcentaje LSD

**Tabla 4-22:** Fases

	<b>Casos</b>	<b>Media</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
<b>FASE SÓLIDA</b>	3	0,373333	X

FASE GASEOSA	3	74,7037	X
--------------	---	---------	---

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

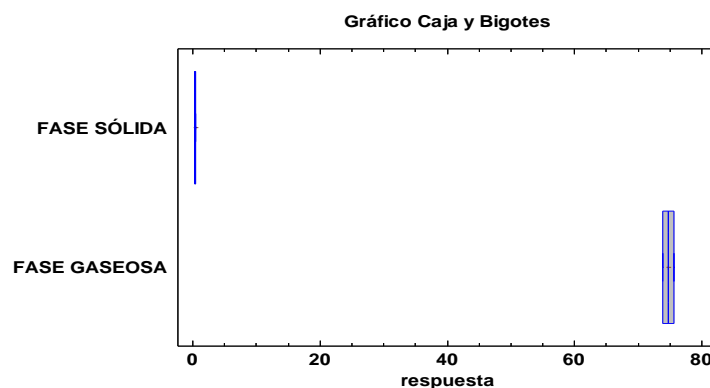


**Ilustración 4-5: Fisher LSD**

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

La tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's, columnas que corresponde a fase sólida y fase gaseosa.

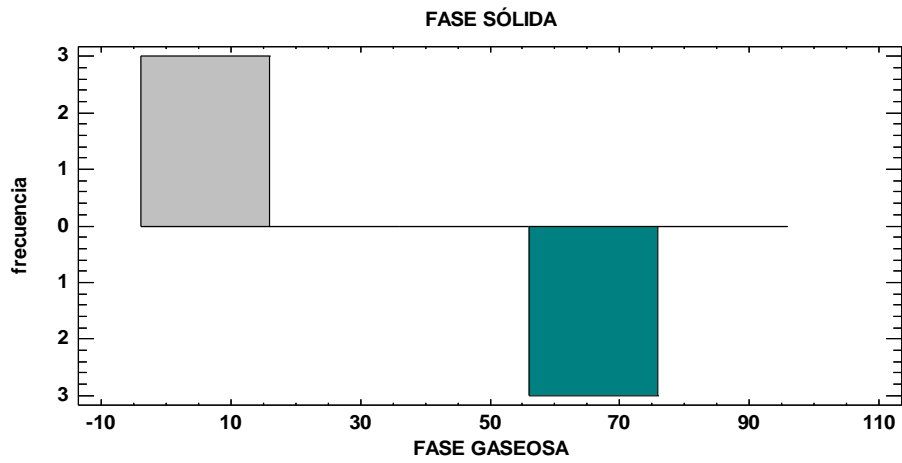
### Gráfico de caja y bigotes:



**Ilustración 4-6: Caja y bigotes**

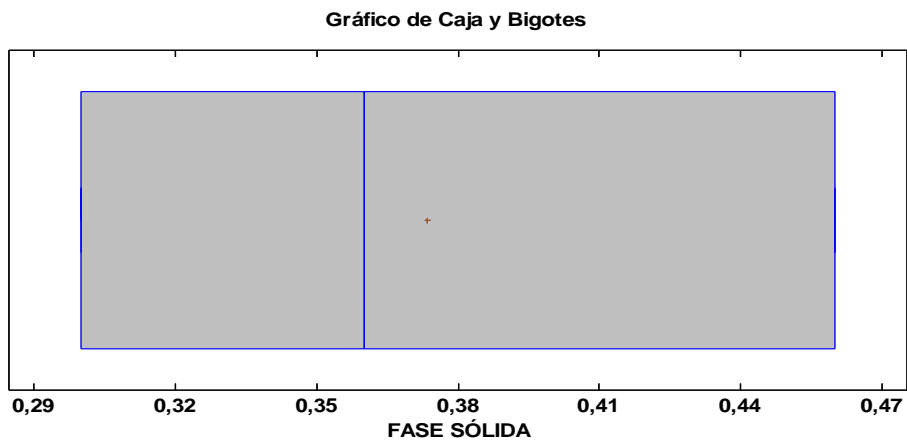
Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

### Gráfico de frecuencia:



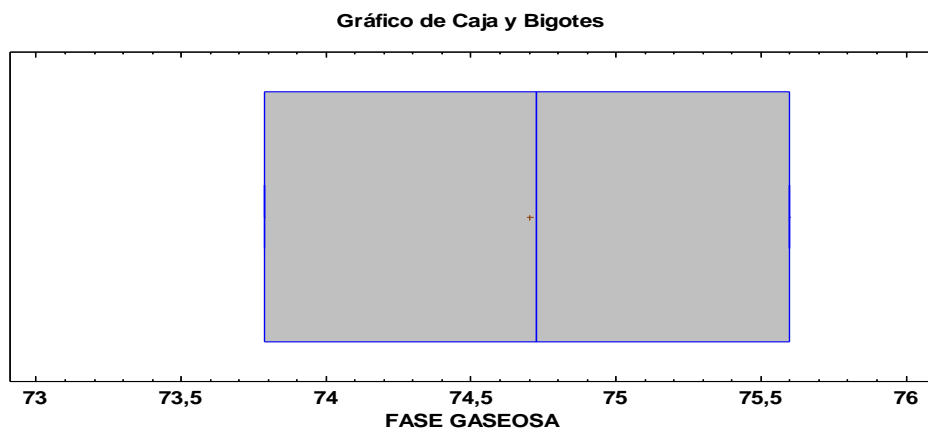
**Ilustración 4-7:** Frecuencia estadística

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.



**Ilustración 4-8:** Caja y bigotes de la fase sólida

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.



**Ilustración 4-9:** Caja y bigotes de la fase gaseosa

Realizado por: Quilumbaqui Luz., 2023.

#### 4.6. Discusión de resultados

En esta investigación se utilizaron briquetas fabricadas a partir de dos tipos de residuos agrícolas: cascarilla de arroz y cáscara de coco mediante el uso del gasificador downdraft ubicado en centro de acopio de la Facultad de Ciencias donde la eficiencia energética del proceso de gasificación no fue la adecuada ya que presentó valores bajos de poder calorífico superior e inferior, a pesar de que se utilizó carbón como arranque para elevar la temperatura del reactor, pero presentando un descenso de alquitranes como dice (José et al. 2014) que se ha demostrado que la mezcla carbón biomasa mejora la hidrodinámica del lecho y tiene marcada influencia sobre los subproductos de la gasificación disminuyendo la generación de alquitranes.

Cuando la biomasa contiene demasiada humedad, afecta negativamente en rendimiento de la gasificación, en este caso las briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco estuvieron entre un rango de (13,74 -20,53) % siendo la cáscara de coco la más húmeda con el 23%, según (IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) 2007) los valores del 10 % al 15% son los más adecuados para la gasificación, secar más la biomasa presenta dos inconvenientes. El primero es que, a medida que se seca más, es más costoso en términos energéticos y económicos. En segundo lugar, una biomasa secada más allá de su punto de equilibrio recupera la humedad al entrar en contacto con el aire ambiente. en general, la humedad facilita la formación de hidrógeno, pero reduce la eficiencia térmica. En cambio, según (Badilla 2019) las biomásas en muchos casos presentan un alto contenido de humedad, por lo tanto, se necesita realizar una etapa de pre secado para eliminar la mayor cantidad de humedad externa o superficial de la biomasa antes de alimentar el gasificador. Para producir un gas de síntesis con un poder calorífico razonablemente alto, la mayoría de los sistemas de gasificación utilizan biomasa seca con un contenido de humedad entre 10 % y 20 %. Con respecto al contenido de las cenizas según (Ortiz, et al 2020) si la biomasa presenta un contenido cenizas menor del 2% es aceptable para el aprovechamiento de calor y para esta investigación el contenido de cenizas que presentó la biomasa fue de cascarilla de arroz 2,795% y cáscara de coco de 4,2891% de cenizas lo que quiere decir que si presenta una cierta cantidad de cenizas que no está muy lejos de lo adecuado y no perjudica al aprovechamiento del calor. Además, al estudiar los efectos de los parámetros operativos, encontramos que la temperatura y el flujo de gas de arrastre tuvieron un efecto considerable en la eficiencia de la gasificación. A temperaturas más altas, se observó una mayor producción de gas y una reducción en la formación de alquitranes.

Entonces se concluye que no resulta al gasificar una mezcla de briquetas, a pesar que sus análisis físico-químicas fueron óptimas para obtener un gas de calidad, pero al realizar la gasificación no se obtuvo lo esperado. Esto implica evaluar qué porcentaje de la energía contenida en las briquetas

se convierte en gas combustible. Este proceso de gasificación de la mezcla de biomasa no ha sido capaz de aprovechar de manera efectiva el potencial energético de estos residuos agrícolas, por ende, las características del gas producido como su poder calorífico fue muy bajo en comparación con otras investigaciones, al igual que su composición molar donde el hidrógeno, metano y monóxido de carbono resultaron con valores inferiores a lo que indica la norma ASTM 1975: cromatografía. Por consiguiente, estos factores determinaron que, al utilizar esta cantidad de mezcla de biomasa, no se obtuvo un gas de calidad, por tanto, no es útil como fuente de energía. Otro aspecto importante para discutir es la comparación entre la gasificación de la cascarilla de arroz y la cáscara de coco. Se evaluó que la cascarilla de coco es más manejable en la cámara de combustión para obtener el gas en cambio el realizar la gasificación solo con la cascarilla de arroz resultó ser un poco más complicada ya que esta necesita ser removida constantemente ya que puede llegar a ahogarse el equipo, pero en términos de eficiencia energética se pudo observar que al gasificar la cascarilla de arroz resultó más cantidad de gas de síntesis a menor tiempo al contrario que con la cáscara de coco.

## CONCLUSIONES

Se analizó energéticamente el proceso de gasificación de briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco mediante el uso del gasificador downdraft, considerando que la gasificación de briquetas es una alternativa energética sostenible, en esta investigación se verificó que efectivamente el poder calorífico puede variar según el tipo de biomasa empleada, su composición exacta del gas de síntesis y las condiciones de gasificación utilizada en el proceso. Entonces se concluye que al utilizar una mezcla de biomásas compactadas en forma de briquetas no fue la mejor opción para obtener un gas efectivo para la aplicación posterior en otras prácticas.

Se caracterizó la biomasa de cascarilla de arroz y cáscara de coco mediante los análisis proximales, los cuales consistieron en la determinación del análisis de humedad y porcentaje de cenizas, alcanzando un promedio de humedad para la cascarilla de arroz de 13,74% y de cenizas 2,79% y para la cáscara de coco 20,53% y 4,28% respectivamente, verificando de esta manera que ninguna de las dos biomásas está cumpliendo con el valor inferior al 10% de humedad para obtener un gas de síntesis óptimo. Además, se determinó las pruebas físico-químicas de las dos biomásas en donde el porcentaje de carbono resultó ser el más alto, siendo este elemento principal para obtener un poder calorífico alto, pero así también se indica un porcentaje de hidrógeno menor por ende también influye potencialmente el en poder calorífico del gas resultante.

Se determinó las condiciones del proceso de gasificación los cuales se tomaron en cuenta detalles como condiciones operacionales, condiciones ambientales, el diseño del equipo, así como también la composición química de las briquetas y no menos importante las condiciones termodinámicas. El proceso de gasificación se ejecutó con el agente gasificante el aire, con una temperatura de 500 °C como energía de activación, una densidad del aire de 0,84 kg/m<sup>3</sup> y presión atmosférica de 0,704 atm.

Se caracterizó el gas de síntesis obtenido mediante la cromatografía de gases realizados dentro de la norma ASTM 1945, que se obtuvo gas de síntesis compuesto por bajas concentraciones de hidrógeno (1,40 %), monóxido de carbono (5,63 %), metano (1,55 %); los cuales deberían haber resultado más altos para considerarse un gas de calidad, pero por condiciones de operación y de las reacciones que se dan en el proceso para forman hidrocarburos alifáticos como etano (0,09 %) y propano (0,09 %), no se reflejan estos valores moderadamente altos como tal.

Se efectuó un balance de masa del proceso de gasificación, teniendo en cuenta que las entradas al gasificador fueron el flujo másico de biomasa, el flujo másico del aire; y salidas como flujo másico de gas y residuos como el flujo másico de cenizas y de alquitrán, entonces el balance efectuado



permitió estudiar los subproductos y residuos generados durante el proceso, importante para comprender la formación de subproductos no deseados como alquitranes (0,01; 0,01; 0,009 kg/h respectivamente de las tres gasificaciones) o gases nocivos y tomar medidas para minimizar su producción.

Se realizó un análisis estadístico anova tanto para la fracción sólida como para la parte gaseosa para identificar si hay diferencias significativas entre los tres grupos de gasificación, entonces se evaluó la hipótesis nula ( $H_0$ ), donde las desviaciones estándar dentro de cada una de las gasificaciones en cada fase fueron iguales ya que el valor-P es mayor o igual que 0,05, por consiguiente no hubo una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza, lo que se considera que la prueba es repetible.

## **RECOMENDACIONES**

En primer lugar, se recomienda que la humedad de la biomasa a utilizarse en el proceso de gasificación debe estar entre el estándar establecido para obtener un gas de síntesis óptimo, es decir debe tener una humedad menor o igual al 10%, entre menos humedad mayor será el poder calorífico lo que mejora la calidad de gas.

Es recomendable utilizar un solo tipo de biomasa para gasificar ya que al usar una mezcla de biomasa no resulta el proceso y no se obtiene gas de calidad.

Es importante que las compuertas tanto inferior como superior se mantengan bien cerradas ya que una vez alimentada la cámara de combustión no debe existir fugas de gases y no afecte al proceso y no sea un problema al momento de tomar la muestra de gas.

Se recomienda tener una correcta adaptación a la salida de la tubería de gas facilitando de mejor manera la toma del gas de síntesis en la funda tedlar, envase adecuado para este tipo de compuesto.

Otra parte importante al momento de tomar la muestra de gas de síntesis es verificar que la fuente que genera el flujo de aire hacia el gasificador no suministre aire en su totalidad ya que podría alterar la muestra obtenida.

Y por último es de suma importancia tener las herramientas adecuadas para trabajar y tener la protección individual ya que se trabaja con fuego y gases nocivos. Cabe decir que se recomienda mejorar el diseño del equipo para extraer los gases nocivos al principio del proceso, cuando comienza la combustión.

## GLOSARIO

**Análisis cromatográfico de gases:** es una técnica utilizada frecuentemente en ingeniería química para determinar la composición de una muestra gaseosa. La cromatografía de gases se basa en la separación de los componentes de una mezcla en función de las diferencias en su atracción por una fase móvil (gas) y una fase estacionaria (columna cromatográfica).

**Briqueta:** es un tipo de combustible sólido formado a partir de materiales orgánicos compactados. Por lo general, se utilizan residuos de biomasa, como serrín, virutas de madera, cáscaras de arroz, residuos agrícolas y otros materiales similares. La fabricación de briquetas generalmente implica compactar los materiales de biomasa con alta presión, sin necesidad de aditivos químicos adicionales. Esto crea bloques o cilindros sólidos con una densidad más alta que los materiales originales, lo que facilita su almacenamiento, transporte y manejo.

**Flujo másico:** conocido como caudal másico, se refiere a la cantidad de masa de una sustancia que atraviesa una sección determinada en un determinado tiempo. Es decir, representa la cantidad de masa de una sustancia que fluye por unidad de tiempo. En la ingeniería química, el flujo másico es un parámetro clave para diseñar y operar procesos industriales. Permite conocer la cantidad de materia prima que ingresa a una unidad de proceso, calcular balances de masa, dimensionar equipos y determinar la eficiencia de un proceso.

**Gasificación:** es un proceso en el que se convierte un material sólido, líquido o gaseoso en gas de síntesis o gas de combustión. Durante la gasificación, la materia prima se descompone térmicamente en un ambiente controlado de alta temperatura y presión, generalmente en presencia de vapor de agua, oxígeno o ambos.

**Gas de síntesis:** es una mezcla de gases compuesta principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). Se produce a través de una reacción química llamada gasificación, que generalmente implica la oxidación parcial de materiales carbonosos, como carbón, biomasa o gas natural. La gasificación se lleva a cabo a altas temperaturas y en presencia limitada de oxígeno. Esto permite la producción de monóxido de carbono y, si hay suficiente vapor de agua presente, también se produce hidrógeno. El gas de síntesis resultante tiene diversas aplicaciones en la industria química y energética.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGUIRRE, L. A.**, departamento de ciencias de la energía y mecánica carrera de ingeniería mecánica trabajo de titulación, previo a la obtención del título de ingeniero mecánico. . S.l.:

**AHUMADA, L. M., VERDEZA, A., BULA, A.J. & LOMBANA, J.**, Optimización de las Condiciones de Operación de la Microgasificación de Biomasa para Producción de Gas de Síntesis. *Información Tecnológica*, vol. 27, no. 3, ISSN 07180764. DOI 10.4067/S0718-07642016000300017.

**ALFREDO CEDEÑO-PALACIOS III, C., EDUARDO ALCÍVAR-CEDEÑO, et. al.** Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa Use of rice husk (*Oryza sativa*) for the production of cellulose fibres Uso de casca de arroz (*Oryza sativa*) para obtenção de fibras de celulose *Ciencias de naturales* Artículo de revisión. [En línea], vol. 6, DOI 10.23857/pc.v6i4.2572. Disponible en: <http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>.

**ARDILA BARRAGÁN, M.A., LÓPEZ DIAZ, A. & LOZANO GÓMEZ, L.F.**, *Gasificación de briquetas de carbón con biomasa: una alternativa energética sostenible* [en línea]. S.l.: Editorial UPTC. ISBN 9789586605182. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/espoch/titulos/219204>.

**BADILLA, Ó.E.**, Puesta en marcha de un gasificador de flujo concurrente para el aprovechamiento energético de residuos biomásicos. . S.l.:

**CASTELLO**, Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Química Y Biotecnología. . S.l.:

**CASTIBLANCO, O. & MILQUEZ, H.**, Estudio y simulación de un gasificador con captura de CO2 para la producción de hidrógeno azul partiendo de carbón colombiano. ,

**CHEJNE JANNA, F., LONDOÑO GIRALDO, C. & ARENAS CASTIBLANCO, E.**, Biomasa y carbón: Una alternativa energética para Colombia. . S.l.:

**FORERO, C., GUERRERO, C. & SIERRA, F.**, Dialnet-ProduccionYUsoDePelletsDeBiomasaParaLaGeneracionDe-4991583.

**GARCÍA, S.P.**, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil "Estudio de Factibilidad para la Industrialización de la fibra de coco. S.l.:

**GONZÁLEZ, R.**, Simulación del proceso de gasificación de biomasa. . S.l.:

**GROVER, P.D. & MISHRA, S.K.**, Regional wood energy development programme in asia gcp/ras/154/net food and agriculture organization of the united nations Bangkok, Biomass briquetting: technology and practices. [En línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.rwedp.org>.

**JAMA, V.**, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo Facultad De Ciencias Carrera Ingeniería Química determinación del poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de cascarilla de arroz (*oryza sativa*) y cáscara de coco (*cocos nucifera*) con nanocristales de celulosa como una nueva alternativa de energía. . S.l.:

**JOSÉ, R., NARANJO, M., JANNA, F.C., MONTOYA ARBELÁEZ, J.I. & LEAL, A.B.**, Gasification of sugarcane bagasse and coal at pilot plant scale. . S.l.:

**KONGTO, P., PALAMANIT, A., NINDUANGDEE, P., et. al.** Intensive exploration of the fuel characteristics of biomass and biochar from oil palm trunk and oil palm fronds for supporting increasing demand of solid biofuels in Thailand. *Energy Reports*, vol. 8, ISSN 23524847. DOI 10.1016/j.egy.2022.04.033.

**KUMAR, P., SUBBARAO, P.M.V., KALA, L.D. & VIJAY, V.K.**, Experimental assessment of producer gas generation using agricultural and forestry residues in a fixed bed downdraft gasifier. *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 13, ISSN 2666-8211. DOI 10.1016/J.CEJA.2022.100431.

**MAZÓN, G.**, Universidad Técnica De Ambato Facultad De Ingeniería Civil Y Mecánica Carrera De Ingeniería Mecánica Trabajo Experimental Previo A La Obtención Del Título De Ingeniero Mecánico. . S.l.:

**NOTENO, F. & ZAPATA, S.**, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo Facultad De Ciencias Carrera Ingeniería Química Ingeniero Químico Autores: Fabricio Arsenio Noteno Bautista. . S.l.:

**OROZCO, L. S.**, Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica levantamiento y análisis del potencial energético aprovechable de la biomasa forestal en el cantón riobamba y su viabilidad a través de gasificación tipo downdraft trabajo de titulación previo a la obtención del título de magíster en eficiencia energética. . S.l.:

**PAREDES, G.**, Universidad Central Del Ecuador Facultad De Ingeniería Química Carrera De Ingeniería Química. . S.l.

**PEÑA, J., MARTÍNEZ, P., CORTÉS, M., CHIRIVI, N. & MENDOZA GENEY, L.**, *Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación energetic Use of biomass throUgh gasification*. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://orcid.org/0000-0003-1343-509X>.

**RODRÍGUEZ, L. & TUMBACO, K.**, Escuela Politécnica Nacional Facultad de ingeniería mecánica diseño y construcción de un gasificador para producir gas de síntesis a partir de la combustión de cascarilla de arroz proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico luis iván rodríguez lugmaña. . S.l.:

**SÁNCHEZ, I., GALLARDO, A. & EDO, N.**, Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación.

**SERRANO, J., MEJÍA, W., ORTIZ, J., SÁNCHEZ, A. & ZALAMEA, S.**, Determination of the Potential Electric Generation from Biomass in Ecuador. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://data.worldbank.org>.



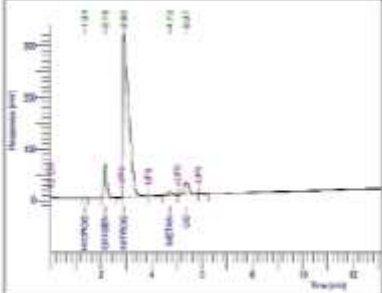
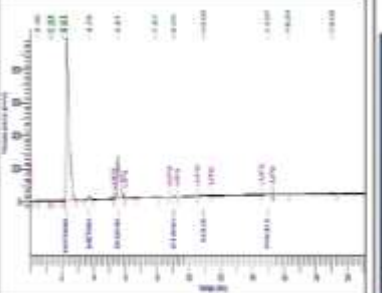



**TAMAYO, V.**, Escuela politécnica del ejército «ingeniería conceptual, básica y de detalle para la construcción y automatización de un gasificador tipo downdraft o flujo concurrente de 10 kw de potencia» proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico. . S.l.:

**VALIENTE, A.**, "Elaboración de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en. S.l.:

**VERA, A.**, Diseño de briquetas ecológicas para la generación de energía calórica y mejoramiento de ecosistemas en el corregimiento de Nabusimake, Municipio de pueblo Bello-Cesar. ,

ANEXOS

ANEXO C: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS DE SÍNTESIS DE BRIQUETAS DE CASCARILLA DE ARROZ Y CÁSCARA DE COCO

		INFORME DE RESULTADOS		Página: 1 de 1	
				FPT-7.8-02-04	
<b>INFORME No. I-LAI-023-33-01</b>					
Orden de Trabajo No. DQ-OT0097-2023					
<b>INFORMACION CLIENTE</b>					
Cliente / Empresa:	Quilumbaqui Guacacata Luz Clara	Persona de contacto:	Ing. Paúl Palmyr		
Dirección / Telf.:	Panamericana Sur km 1 1/2, Raobamba Ecuador / 0960535217	E-mail:	luz.quilumbaqui@esPOCH.edu.ec		
<b>PARAMETROS DE LA MUESTRA</b>					
Identificación:	M-LAI-023-33-01	Fecha de muestreo:	* 8/6/2023		
Tipo de muestra:	Gas de síntesis Briquetas de cascarilla de arroz y cáscara de coco	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente		
Tipo de contenedor:	Bolsa teflón	Fecha inicio del ensayo:	14/6/2023		
Fecha de recepción:	9/6/2023	Fecha entrega informe:	20/6/2023		
<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>					
Temperatura y %HR ambiente:	17.0 °C	47.0 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía	
Temperatura y Presión de muestra:	64.5 °F	0.7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01	
	18.1 °C	4895.3 Pa		PE-7.2-02	
<b>RESULTADOS</b>					
<b>COMPOSICIÓN</b>	<b>COMPONENTE</b>		<b>% Moles</b>	<b>Dev. Std</b>	
	Hidrógeno		1.40	0.017	
	Oxígeno		6.52	0.067	
	Nitrógeno		67.54	0.532	
	Monóxido de carbono		5.63	0.009	
	Metano		1.55	0.014	
	Dióxido de carbono		16.37	0.169	
	Etano		0.09	0.009	
	Agua		0.82	0.025	
	Propano		0.09	0.005	
<b>PROPIEDADES</b>	<b>Densidad relativa</b>		1.05		
	<b>Peso molecular promedio [g/mol]</b>		30.37		
	<b>Densidad de la muestra (g/L)</b>		1.28		
	<b>Poder calorífico superior [kJ/m<sup>3</sup>]</b>		1582.78		
	<b>Poder calorífico inferior [kJ/m<sup>3</sup>]</b>		1471.36		
	<b>Factor de compresibilidad (z)</b>		1.0000		
<b>CROMATOGRAMA</b>					<b>MUESTRA</b>
					
<b>Columna 13 X 45/60</b> (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)			<b>Columna Porapak Q 80/100</b> (Cuantificación de hidrocarburos)		
<b>DECLARATORIAS</b>	* Datos proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los items ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.				
<b>OBSERVACIONES</b>	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.				
Elaborado por:	 GABRIELA VARELA PEREZ QUIMICO ANALISTA			Revisado y aprobado por:  ANDRES GABRIEL CHICO FROIANO	
Ing. Gabriela Pérez ANALISTAS DE LABORATORIO			Ing. Andrés Chico, MSc. COORDINADOR DEL LABORATORIO		



## ANEXO D: PRUEBAS FÍSICO-QUÍMICAS



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.



h.

a. Trituración de la cascarilla de arroz.	e. Humedad de la cascarilla de arroz menor al 10%.
b. Trituración de la cáscara de coco.	f. Humedad de la cáscara de coco menor al 10%.
c. Tamizado de la cascarilla de arroz por la malla 60 de 250 micrones.	g. Peso de la muestra cascarilla de arroz menor al 2.5 gr.
d. Tamizado de la cáscara de coco por la malla 60 de 250 micrones.	h. Peso de la muestra de cáscara de coco menor al 2.5 gr.

Realizado por: Quilumbaqui L.,2023



**ANEXO E: NORMA ASTM 1945: RANGO DE COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL**

**Tabla 1\_ Componentes del gas natural y rango de composición**

<b>Componentes</b>	<b>Mol %</b>
Helio	0,01 a 10
Hidrógeno	0,01 a 10
Oxígeno	0,01 a 20
Nitrógeno	0,01 a 100
Dióxido de carbono	0,01 a 20
Metano	0,01 a 100
Etano	0,01 a 100
Sulfuro de Hidrógeno	0,3 a 30
Propano	0,01 a 100
Isobutano	0,01 a 10
n-butano	0,01 a 10
neopentano	0,01 a 2
isopentano	0,01 a 2
n-pentano	0,01 a 2
Isómeros de hexano	0,01 a 2
Mayores de C6	0,01 a 1



epoch

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 30/11/2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Luz Clara Quilumbaqui Gualacata
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título a optar:</b> Ingeniera Química
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

2102-DBRA-UPT-2023