



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS  
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASAS  
MEDIANTE GASIFICACIÓN CON BRIQUETAS DE TUSA DE  
MAÍZ Y CÁSCARA DE PAPA**

**Trabajo de Titulación**

**Tipo:** Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA:**

**MARJORIE JESENIA GONZÁLEZ CHAVARREA**

Riobamba – Ecuador

2024



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

**APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASAS**  
**MEDIANTE GASIFICACIÓN CON BRIQUETAS DE TUSA DE**  
**MAÍZ Y CÁSCARA DE PAPA**

**Trabajo de Titulación**

**Tipo:** Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA:** MARJORIE JESENIA GONZÁLEZ CHAVARREA

**DIRECTORA:** ING. MABEL MARIELA PARADA RIVERA MSc.

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Marjorie Jesenia González Chavarrea

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, Marjorie Jesenia González Chavarrea, declaro que el presente Trabajo de Titulación 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 Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

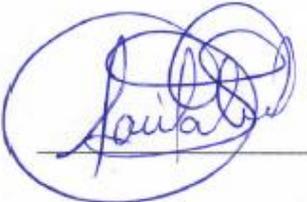
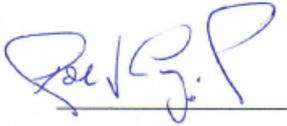
Riobamba, 12 de noviembre de 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Marjorie González", with a horizontal line drawn underneath the text.

.....  
**Marjorie Jesenia González Chavarrea**  
**060532531-5**

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

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, **APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASAS MEDIANTE GASIFICACIÓN CON BRIQUETAS DE TUSA DE MAÍZ Y CÁSCARA DE PAPA**, realizado por la señorita: **MARJORIE JESENIA GONZÁLEZ CHAVARREA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, 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. Paul Gustavo Palmay Paredes <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2024-05-07
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera <b>DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2024-05-07
Dr. Robert Alcides Cazar Ramírez <b>ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2024-05-07

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mis padres Julia Chavarrea y Carlos González por siempre ser un pilar y apoyo fundamental a lo largo de toda mi vida, por brindarme su amor incondicional y sus valiosos consejos, por ser mi guía día tras día, por motivarme y enseñarme a ser valiente, a seguir adelante, a no rendirme nunca y cumplir mis sueños sin importar cuán difícil sea y por todos los sacrificios que hicieron para que me forme como persona y como profesional. A mi hermana Diana que siempre ha sido mi ejemplo para seguir, siendo una mujer fuerte e inteligente, a mi hermano Mauricio quien ha sido un gran apoyo a lo largo de mi vida estudiantil y que a su vez me ha demostrado el significado de ser una responsable, gracias a todos por siempre confiar en mí. A mis amadas sobrinas, gracias por siempre creer en mí, por darme la fuerza para seguir adelante cuando he sentido que no se a dónde voy, A toda mi familia y amigos que jamás dejaron de creer y confiar en mí.

Marjorie

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme tener salud y fortaleza para poder cumplir con mi anhelado sueño de culminar mi etapa universitaria, luego agradezco a mis padres Carlos y Julia, a toda mi familia y amigos por su apoyo incondicional durante mi vida estudiantil. Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme sus puertas y permitirme ser parte de esta noble y prestigiosa institución, a sus docentes por impartirme todos sus conocimientos y formar una excelente profesional con buenos principios éticos y morales. Mi más grato agradecimiento a la Ing. Mabel Mariela Parada Rivera, directora de tesis por su tiempo, conocimientos, el constante apoyo y guía para la elaboración y culminación de este trabajo de titulación. Al Grupo de Investigación de Materiales Avanzados de la ESPOCH (GIMA), especialmente a mi Asesor el Dr. Robert Cazar por toda la confianza, apoyo incondicional y ayuda prestada a lo largo de mi investigación. Al Ing. Paul Palmay, por el acompañamiento durante los análisis de las muestras y su gran paciencia. A mis amigos, que han sido parte fundamental de esta bonita experiencia

Marjorie

## ÍNDICE DE CONTENIDO

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

### CAPÍTULO I

<b>1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Limitaciones y delimitaciones .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1. Limitaciones .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2. Delimitaciones .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Problema general de investigación .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Problemas específicos de la investigación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.5. Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5.1. Objetivo general .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>4</b>
<b>1.6. Hipótesis .....</b>	<b>4</b>
<b>1.6.1. Hipótesis general.....</b>	<b>4</b>
<b>1.6.2. Hipótesis específica .....</b>	<b>4</b>
<b>1.7. Justificación.....</b>	<b>5</b>

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Antecedentes de investigación .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Referencias teóricas .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.1. Biomasa.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2. Briqueta.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.3. Características energéticas de la biomasa .....</b>	<b>10</b>

2.2.3.1.	<i>Contenido de humedad</i>	10
2.2.3.2.	<i>Composición química</i>	11
2.2.3.3.	<i>Poder calorífico</i>	11
2.2.3.4.	<i>Densidad energética</i>	11
2.2.3.5.	<i>Eficiencia de conversión</i>	11
2.2.3.6.	<i>Estabilidad y almacenamiento</i>	12
2.2.4.	<b><i>Tipos de biomásas</i></b>	12
2.2.4.1.	<i>Biomasa forestal</i>	12
2.2.4.2.	<i>Biomasa residual agrícola</i>	12
2.2.4.3.	<i>Biomasa de cultivos energéticos</i>	12
2.2.4.4.	<i>Biomasa de residuos industriales</i>	12
2.2.4.5.	<i>Biomasa de algas y microorganismos</i>	13
2.2.5.	<b><i>Gasificador</i></b>	13
2.2.5.1.	<i>Tipos de gasificador</i>	14
2.2.6.	<b><i>Briqueta de tusa de maíz</i></b>	15
2.2.7.	<b><i>Briqueta de cáscara de papa</i></b>	15
2.2.8.	<b><i>Aplicación energética de la biomasa</i></b>	16
2.2.8.1.	<i>Biocombustibles</i>	16
2.2.8.2.	<i>Tipos de biocombustibles</i>	17
2.2.9.	<b><i>Residuos agroindustriales</i></b>	17

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	18
3.1.	<b>Enfoque de investigación</b>	18
3.1.1.	<i>Enfoque de investigación cualitativo</i>	18
3.1.2.	<i>Enfoque de investigación cuantitativo</i>	18
3.2.	<b>Alcance de la investigación</b>	18
3.2.1.	<i>Investigación descriptiva</i>	18
3.2.2.	<i>Investigación experimental</i>	18
3.3.	<b>Diseño de investigación</b>	19
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>	22
3.5.	<b>Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b>	22

3.5.1.	<i>Análisis de composición química de las briquetas</i>	22
3.5.2.	<i>Determinación del contenido de humedad</i>	23
3.5.3.	<i>Determinación del contenido de cenizas en los residuos</i>	24
3.5.4.	<i>Análisis elemental de hidrógeno y oxígeno a la biomasa de los residuos</i>	25
3.6.	<b>Elaboración de briquetas con 50% de cáscara de papa y 50% de tusa de maíz</b>	25
3.7.	<b>Descripción del gasificador de la facultad de ciencias</b>	25
3.8.	<b>Parámetros para el proceso de gasificación</b>	26
3.9.	<b>Procedimiento para gasificar</b>	28
3.9.1.	<i>Encendido del gasificador</i>	28
3.9.2.	<i>Encendido del gas</i>	28
3.9.3.	<i>Toma de muestra de gas</i>	28
3.9.4.	<i>Apagado del equipo</i>	29
3.9.5.	<i>Limpieza del equipo</i>	29
3.9.6.	<i>Parámetros de gasificación</i>	30
3.9.7.	<i>Proceso de gasificación</i>	30
3.9.8.	<i>Primera gasificación con cáscara de papa y tusa de maíz</i>	33
3.9.9.	<i>Segunda y tercera gasificación con briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz</i>	33
3.10.	<b>Análisis termodinámico de gasificación</b>	34
3.10.1.	<i>Cantidad estequiométrica de aire para una combustión completa</i>	34
3.10.2.	<i>Poder calorífico inferior</i>	35
3.10.3.	<i>Poder calorífico superior</i>	35
3.10.4.	<i>Coeficiente de aire en exceso</i>	36
3.10.4.1.	<i>Relación entre la ratio de equivalencia y coeficiente de aire en exceso</i>	36
3.10.5.	<i>Cantidad de aire para gasificar</i>	37
3.10.6.	<i>Balance de masa</i>	37
3.10.7.	<i>Cromatografía de gases</i>	39
3.10.7.1.	<i>Proceso de cromatografía</i>	39
3.11.	<b>Análisis FTIR (espectroscopía de infrarrojo por transformada de fourier)</b>	40
3.11.1.	<i>Preparación de la muestra</i>	41
3.11.2.	<i>Configuración del espectrómetro</i>	41
3.11.3.	<i>Obtención del espectro</i>	41
3.11.4.	<i>Transformada de Fourier</i>	41
3.11.5.	<i>Interpretación del espectro</i>	41
3.11.6.	<i>Análisis de Datos</i>	41
3.12.	<b>Análisis estadísticos</b>	42
3.12.1.	<i>Análisis ANOVA</i>	42

3.12.2. Prueba de Levene .....	43
--------------------------------	----

## CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	44
4.1. Resultados de Análisis proximales y físico químicos .....	44
4.2. Valoración energética de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz.....	45
4.2.1. Resultados del poder calorífico inferior y superior del gas de síntesis .....	52
4.3. Cálculo del balance de masa para briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz .	53
4.3.1. Resultados del balance de masa de la primera gasificación .....	53
4.3.2. Resultados del balance de masa de la segunda gasificación .....	56
4.3.3. Resultados del balance de masa de la tercera gasificación .....	59
4.4. Resultado del análisis cromatográfico del gas de síntesis de las briquetas de cascara de papa y tusa de maíz.....	64
4.4.1. Resultados de la composición elemental del gas de síntesis .....	67
4.5. Análisis FTIR .....	70
4.5.1. Resultados del análisis FTIR de las cenizas .....	70
4.5.2. Resultados del análisis FTIR del alquitrán .....	72
4.6. Resultados del análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa .....	73
4.6.1. Resultados del análisis estadístico ANOVA.....	74
4.6.2. Resultados de la prueba de rangos múltiples LSD .....	75
4.6.3. Resultados del análisis del supuesto de normalidad.....	77
4.6.3.1. Sesgo y curtosis estandarizada .....	77
4.6.4. Resultados de la prueba de Levene's .....	78
4.6.5. Comprobación de hipótesis .....	79
4.7. Discusión de resultados.....	80
CONCLUSIONES.....	82
RECOMENDACIONES.....	84
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Artículos de los estudios para el proyecto de investigación .....	8
<b>Tabla 3-1:</b> Diseño experimental de la muestra .....	21
<b>Tabla 3-2:</b> Parámetros del diseño experimental de la muestra.....	21
<b>Tabla 3-3:</b> Análisis de composición química.....	22
<b>Tabla 3-4:</b> Determinación del contenido de humedad .....	23
<b>Tabla 3-5:</b> Determinación del contenido de cenizas .....	24
<b>Tabla 3-6:</b> Análisis elemental de hidrógeno y oxígeno .....	25
<b>Tabla 3-7:</b> Especificaciones del Gasificador .....	26
<b>Tabla 3-8:</b> Parámetros de gasificación .....	30
<b>Tabla 3-9:</b> Pasos para realizar el proceso de gasificación.....	31
<b>Tabla 3-10:</b> Guía de la primera gasificación.....	33
<b>Tabla 3-11:</b> Guía de la segunda gasificación.....	33
<b>Tabla 3-12:</b> Guía de la tercera gasificación .....	34
<b>Tabla 3-13:</b> Coeficientes de exceso de aire por diferentes tipos de combustible .....	36
<b>Tabla 4-1:</b> Composición de la biomasa .....	44
<b>Tabla 4-2:</b> Composición de C H O N S.....	44
<b>Tabla 4-3:</b> Datos de la Gasificación de briquetas .....	45
<b>Tabla 4-4:</b> Resultados del coeficiente de aire en exceso para el proceso de gasificación .....	52
<b>Tabla 4-5:</b> Resultados del balance de masa de la primera gasificación .....	56
<b>Tabla 4-6:</b> Resultados del balance de masa de la segunda gasificación.....	59
<b>Tabla 4-7:</b> Resultados del balance de masa de la tercera gasificación .....	62
<b>Tabla 4-8:</b> Resultados finales de los balances de masa de cada gasificación.....	62
<b>Tabla 4-9:</b> Resultados de la fracción sólida de las gasificaciones.....	63
<b>Tabla 4-10:</b> Resultados de la fracción gaseosa de las gasificaciones .....	64
<b>Tabla 4-11:</b> Parámetros valorados en el análisis cromatográfico.....	64
<b>Tabla 4-12:</b> Composición del gas de síntesis de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz...65	65
<b>Tabla 4-13:</b> Propiedades del gas de síntesis de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz ....66	66
<b>Tabla 4-14:</b> Análisis Cromatográfico .....	68
<b>Tabla 4-15:</b> Poder calorífico superior e inferior de briquetas cáscara de papa y tusa de maíz ...69	69
<b>Tabla 4-16:</b> Datos de entrada y salida en el gasificador .....	73
<b>Tabla 4-17:</b> Resumen Estadístico para Flujo másico de la fracción sólida y fracción gaseosa ..74	74
<b>Tabla 4-18:</b> Análisis de varianza ANOVA para el flujo másico por Fracción sólida y gaseosa 74	74
<b>Tabla 4-19:</b> Prueba de rangos múltiples LSD.....	75

<b>Tabla 4-20:</b> Resultados de la prueba LSD.....	75
<b>Tabla 4-21:</b> Resumen Estadístico para residuos .....	77
<b>Tabla 4-22:</b> Prueba Levene's.....	79
<b>Tabla 4-23:</b> Comparación de la prueba de Levene's para las dos fracciones.....	79

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b> Estructura de un Gasificador .....	13
<b>Ilustración 2-2:</b> Tusa de maíz .....	15
<b>Ilustración 2-3:</b> Cáscara de papa.....	16
<b>Ilustración 3-2:</b> Diseño experimental para la investigación científica.....	20
<b>Ilustración 3-3:</b> Diagrama de balance de masa en el gasificador .....	38
<b>Ilustración 4-1:</b> Resultado del Balance de masa .....	63
<b>Ilustración 4-2:</b> Cromatograma del gas de síntesis .....	67
<b>Ilustración 4-3:</b> Composición del gas de síntesis .....	69
<b>Ilustración 4-4:</b> Resultado del poder calorífico del gas de síntesis.....	70
<b>Ilustración 4-5:</b> Primera espectroscopia infrarroja de las cenizas del proceso .....	70
<b>Ilustración 4-6:</b> Segunda espectroscopia infrarroja de las cenizas del proceso de gasificación.....	71
<b>Ilustración 4-7:</b> Tercera espectroscopia infrarroja de las cenizas del proceso de gasificación ..	72
<b>Ilustración 4-8:</b> Prueba Fisher LSD fracción sólida .....	75
<b>Ilustración 4-9:</b> Relación Fracción (1) sólida, (2) gaseosa; vs medias de flujo .....	76
<b>Ilustración 4-10:</b> Caja y bigotes para la media de la fracción sólida .....	76
<b>Ilustración 4-11:</b> Caja y bigotes para la media de la fracción gaseosa .....	77
<b>Ilustración 4-12:</b> Gráfico de residuos vs fracciones sólida y gaseosa .....	78

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS DE SÍNTESIS DE BRIQUETA

**ANEXO B:** NORMA ASTM 1945: RANGO DE COMPOSICIÓN

**ANEXO C:** ANÁLISIS FTIR DE MUESTRAS DE CENIZA DE BRIQUETAS

**ANEXO D:** ANÁLISIS FTIR DE MUESTRA DE ALQUITRÁN

**ANEXO E:** ASIGNACIÓN DEL NÚMERO DE ONDA PARA EL ANÁLISIS FTIR

## RESUMEN

En Ecuador, la producción agrícola genera considerables cantidades de residuos como la cáscara de papa y la tusa de maíz. Estos materiales, en su mayoría, no se aprovechan de forma eficiente, siendo utilizados como abono o quemados en las mismas plantaciones, lo que genera un impacto ambiental negativo, en este contexto, surge la necesidad de aprovechar estos residuos como fuente de energía alternativa mediante la gasificación de briquetas, el objetivo principal de esta investigación es analizar energéticamente el proceso de gasificación de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz para determinar su viabilidad como fuente de energía alternativa, la metodología empleada adoptó un enfoque combinado de investigación cualitativa y cuantitativa al llevar a cabo pruebas en condiciones controladas. Estas pruebas se diseñaron con el propósito de medir las propiedades químicas tanto de las briquetas como del gas de síntesis resultante, se utilizó un diseño de investigación factorial con el fin de analizar las interacciones entre diversas variables y determinar su influencia en el rendimiento energético. Además, se llevaron a cabo pruebas directas en el gasificador para optimizar su operación y facilitar la obtención de gas, mismo que fue analizado por cromatografía, se obtuvo una composición de Hidrógeno de 5,26%; Monóxido de carbono 13,25%; Metano 1,72%; Dióxido de carbono 12,16%. Con la aplicación de esta tecnología se determinó el flujo másico del biocombustible que parte de las briquetas, en donde se determinó un valor de 71,703 kg/h, a su vez los residuos de cenizas y alquitrán fueron analizados de forma experimental por medio de análisis FTIR, para conocer su composición, el gas de síntesis obtenido, no se considera comercial, debido a los valores bajos de su composición en metano y etano, se concluye que la utilización de briquetas de estos residuos no es adecuado como fuente de energía alternativa.

**Palabras clave:** <GASIFICACIÓN>, <CÁSCARA DE PAPA>, <TUSA DE MAÍZ>, <BRIQUETAS>, <GAS DE SÍNTESIS>, <PODER CALORÍFICO>, <FLUJO DE GAS>, <CROMATOGRAFIA>

0483-DBRA-UPT-2024



## ABSTRACT

In Ecuador, agricultural production generates considerable amounts of waste such as potato peel and corncob. Most of these materials are not used efficiently, they are used as fertilizers or burned in the same crops, which generates a negative environmental impact, in this context, the need arises to take advantage of these wastes as an alternative energy source through the gasification of briquettes. The main objective of this research is to energetically analyze the process of gasification of potato peel and corncob briquettes to determine its viability as an alternative energy source, the methodology used adopted a combined approach of qualitative and quantitative research by carrying out tests under controlled conditions. These tests were designed with the purpose of measuring the chemical properties of both the briquettes and the resulting synthesis gas, a factorial research design was used in order to analyze the interactions between various variables and determine their influence on energy yield. In addition, direct tests were carried out in the gasifier to optimize its operation and facilitate obtaining gas, which was analyzed by chromatography. The composition of hydrogen was 5.26%; carbon monoxide 13.25%; methane 1.72%; carbon dioxide 12.16%. With the application of this technology, the mass flow of the biofuel that comes from the briquettes was determined, where a value of 71,703 kg/h was determined, at the same time the ash and tar residues were analyzed experimentally by FTIR analysis, to know its composition, the synthesis gas obtained, is not considered commercial, due to the low values of its composition in methane and ethane, it is concluded that the use of briquettes of these residues is not suitable as an alternative energy source.

**Key words:** <GASIFICATION>, <POTATO PEEL>, <CORNCOB>, <BRIQUETTES>, <SYNTHESIS GAS>, <CALORIFIC POWER>, <GAS FLOW>, <CHROMATOGRAPHY>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

## **INTRODUCCIÓN**

La biomasa está conformada por materiales orgánicos, que en ocasiones son renovables, ha causado gran impacto e interés como fuente energética gracias a la habilidad que posee para mitigar el impacto ambiental de los combustibles fósiles. La tusa de maíz y las cáscaras de papa son desechados, aunque son considerados subproductos agrícolas abundantes, por lo cual ofrecen una oportunidad excepcional de utilización a través de la gasificación.

La gasificación convierte la biomasa sólida en un gas combustible, que puede utilizarse para la generación de electricidad, calefacción o como materia prima para la producción de biocombustibles, la transformación de la tusa de maíz y la cáscara de papa en briquetas, compactando estos residuos de manera eficiente, facilita su manipulación y almacenamiento, al tiempo que mejora su eficiencia energética durante el proceso de gasificación.

Las briquetas son una solución inteligente para incrementar el uso de recursos naturales y disminuir los desechos agrícolas, al aplicar la idea de gasificación de biomasa con briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa, es posible contribuir doblemente a la sostenibilidad ambiental, pues se reduce la dependencia de los combustibles fósiles, a su vez mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero y al mismo tiempo aminora el cambio climático, por parte de los residuos agrícolas, estos se aprovechan de forma óptima, reduciendo la contaminación ambiental por su eliminación inadecuada.

Aprovechar la energía de biomasa mediante gasificación con briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa simboliza una estrategia valiosa para combatir los problemas energéticos y medioambientales, a la vez que fomenta el desarrollo sostenible.

## CAPÍTULO I

### 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del problema

Los sistemas energéticos no son nuevos, y de manera constante se buscan otras opciones de fuentes de energía renovable, con el fin de aprovechar los restos de materia orgánica como la madera, la paja o varios residuos agrícolas para la obtención de energía más amigable con el medioambiente que los combustibles fósiles, la biomasa resulta beneficiosa para la zona rural pues sirve muchas veces para mantener limpios los bosques. (Álamo, 2018, pág. 20).

En la actualidad, en el Ecuador, aparte de los costes adicionales que implica la implantación de las plantas, extracción, consumo, transporte y el depósito de la biomasa hay costes añadidos a los cuales hay que atender antes de la generación de electricidad, debido a que para poder obtener una fuente de energía sostenible se deben realizar análisis y pruebas que indiquen si la economía puede mejorar por medio de este tipo de aprovechamiento ya que los elevados precios de los combustibles fósiles obligan a investigar nuevas fuentes de energía amigables. (Álamo, 2018, pág. 20)

A pesar de que la biomasa suele ser más cara que otras energías renovables, las más costosas continúan siendo iguales o incluso más baratas en comparación con los combustibles fósiles, la bioenergía no necesita perforar la tierra, lo cual es muy importante en los costos, tanto desde una perspectiva financiera como medioambiental. (Caballo, 2022, pág. 140)

Es cierto que en nuestro país no se ha aprovechado mucho los beneficios de las biomásas para la generación de energía muchas veces por la falta de información con respecto a los insumos con los que se cuentan o por falta de análisis para verificar si es o no viable la utilización de biomásas, por medio de las briquetas respectivas, es por esto por lo que se propone el tema de titulación “Aprovechamiento energético de biomásas mediante gasificación con briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa” el cual nace del proyecto de investigación del Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (GIMA), mismo que se enfoca en la búsqueda de nuevas alternativas de biocombustibles a partir de biomásas de residuos agroindustriales, para posteriormente analizar energéticamente si su uso es factible y no provoca inconvenientes no deseados para el medio ambiente.

## **1.2. Limitaciones y delimitaciones**

### **1.2.1. Limitaciones**

- La cantidad de cáscara de papa y tusa de maíz que se requiere para el proceso de gasificación.
- El proceso de secado, ya que se necesita de tiempo para alcanzar una humedad menor al 10 %.

### **1.2.2. Delimitaciones**

- El estudio se realiza con residuos agroindustriales de cáscara de papa y tusa de maíz, ya que van a formar parte de la investigación.
- El equipo con el que se trabaja para el aprovechamiento energético es un gasificador.

## **1.3. Problema general de investigación**

- ¿Como influye el uso de biomasas en forma de briquetas, en el aprovechamiento energético por medio de un gasificador?

## **1.4. Problemas específicos de la investigación**

- ¿Cuáles son las principales características de la cáscara de papa y tusa de maíz?
- ¿Cómo influye en la obtención del gas el tiempo de gasificación?
- ¿De qué manera influye un gasificador en el aprovechamiento energético?

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo general***

- Analizar el aprovechamiento energético del proceso de gasificación de las briquetas de la tusa de maíz y cáscara de papa.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- Caracterizar las briquetas de la tusa de maíz y cáscara de papa a través de pruebas fisicoquímicas y un análisis proximal.
- Determinar las condiciones de operación del proceso de gasificación, tales como presión, temperatura y otras variables.
- Realizar un balance de masa del proceso de gasificación.
- Determinar el gas de síntesis obtenido de las biomásas en forma de briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa.
- Efectuar un análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa obtenida de la gasificación.

## **1.6. Hipótesis**

### ***1.6.1. Hipótesis general***

- La gasificación de briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa es una fuente eficiente y sostenible de energía.

### ***1.6.2. Hipótesis específica***

- Las briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa podrían mejorar la eficiencia energética de la gasificación debido a su composición fibrosa y estructura porosa.
- La gasificación podría ser una alternativa viable para la generación de calor en áreas rurales, ya que la disponibilidad local de estos materiales podría reducir los costos de adquisición de combustibles.

## **1.7. Justificación**

La escasez de los combustibles fósiles, la preocupación que genera su agotamiento, el cuidado ambiental y la dependencia de energía de países con bajos recursos energéticos impulsan el desarrollo de nuevas energías renovables. (Romanelli, 2016, pág. 12).

La transformación de biomasa ofrece la ventaja de ser empleada sin la necesidad de realizar alteraciones sustanciales en los sistemas energéticos previamente diseñados para productos

derivados de combustibles fósiles, puede usarse en lugar de carbón mineral en diversos tipos de instalaciones térmicas, paliando así el impacto ambiental de este combustible fósil, además se designa a un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza y composición, que puede emplearse para obtener energía, esta fuente energética se basa en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o en los productos derivados de esta. (Villasur, 2018, pág. 42)

En consecuencia, toda la materia orgánica presente en las aguas residuales, así como los lodos provenientes de plantas de tratamiento y la fracción orgánica biodegradable de varios residuos sólidos urbanos se puede incluir en la categoría de biomasa, aunque debido a la propia naturaleza de estos residuos suelen ser considerados como un grupo aparte. (Romanelli, 2016 pág. 12).

El potencial de biomasa en el país es sumamente importante por toda su historia en la agricultura, y también en la ganadería, muchas situaciones provocan la generación de desechos que pueden tener un gran valor, para involucrarse en el aprovechamiento energético., la inserción de las energías renovables cada vez tiene un rol más importante. (Adelawe y Alabi, 2019, pág. 110).

Este tema de titulación proviene del Grupo de Investigación de Materiales Avanzados (GIMA) constituido por un grupo de docentes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con el propósito “Examinar materiales y nanomateriales por medio de investigaciones de laboratorio con la finalidad de encontrar aplicaciones en el ámbito energético que faciliten soluciones alternativas y sostenibles.”

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

La biomasa cumple un papel importante en reducir la concentración de CO<sub>2</sub> y lo hace de dos formas: como reservorio de carbón, absorbiendo CO<sub>2</sub>, ya que secuestra carbono y libera oxígeno en su propio desarrollo, y como sustituto de combustibles fósiles al ser utilizada como fuente de energía. (Pérez, 2021, pág. 501). Para considerarse un aprovechamiento considerable de residuos, la producción y extracción de estos, debe mantenerse de forma continua, es decir, que, para conseguir más residuos, se continua con plantaciones para evitar los gases de efecto invernadero.

Actualmente, las investigaciones asociadas con la generación de biomasa en el territorio ecuatoriano se concentran principalmente en las zonas rurales, enfocándose en el potencial energético de diversos cultivos agrícolas como el banano, arroz, cacao, caña de azúcar, maíz, palma africana, piña, café, palmito y plátano, así como en tres áreas de cría de ganado (aves, cerdos y bovinos), además del sector forestal. Algunos estudios se dedican a analizar los biocombustibles como una diferente opción al uso del diésel derivado del petróleo, sin embargo, las preocupaciones de Ecuador no se limitan únicamente al consumo de gasolina. (Álvarez, 2016, pág. 179).

Un aspecto que ha cobrado relevancia en los últimos años es el aumento en el uso de combustibles fósiles, lo cual ha tenido un impacto negativo en la economía del país.

Ecuador posee una abundante reserva de biomasa y además se pasa por alto la existencia de otra categoría de biomasa residual originada por la actividad humana, que consiste en los desechos orgánicos urbanos, al examinar estas desventajas desde la perspectiva de la valoración energética y la utilización de los recursos de biomasa residual para generar energía renovable, con la finalidad de sustituir gradualmente los combustibles fósiles, estaríamos reduciendo de manera progresiva los efectos ambientales adversos y el consumo de gas GLP. (Ferronato, 2016, pág. 220)

De acuerdo con los residuos que genera la población, se aplican métodos para su correcta recolección, manejo, solicitud local y regional de materiales y suministros derivados de la gestión de desechos sólidos. Las metodologías más comunes reportadas para el aprovechamiento de residuos sólidos municipales son: compostaje y lombricultura, son los mecanismos de explotación

más comúnmente empleados por los gobiernos autónomos municipales descentralizados (GADM).

En Ecuador, en los años 2015 y 2018, se pudo observar un aumento en la utilización de métodos destinados a la explotación de residuos orgánicos, contando con la participación de 221 municipios que aplicaron las técnicas como el compostaje, sin embargo, la viabilidad de la tecnología anaeróbica parece estar en cuestión. Aparentemente, el problema radica en la disponibilidad de recursos y en la falta de interés por parte de las autoridades en llevar a cabo investigaciones relacionadas con esta tecnología, con el objetivo de implementar instalaciones para la generación de biogás a partir de biorresiduos orgánicos (BSU).

(Adelawe y Alabi, 2019, pág. 110), determinan que, hasta la actualidad, en Ecuador, no se ha llevado a cabo ninguna investigación sobre los residuos orgánicos urbanos (RSU) provenientes de las zonas marginales de las principales ciudades metropolitanas. Estos desechos son recolectados y posteriormente depositados en los vertederos sanitarios de varias ciudades en todo el país, sin que se aplique ningún método para su aprovechamiento o recuperación de energía.

**Tabla 2-1:** Artículos de los estudios para el proyecto de investigación

<b>TEMA</b>	<b>AUTOR</b>	<b>FECHA</b>	<b>ENLACE</b>
La biomasa y su aporte para reducir las emisiones de dióxido de carbono.	- Bernardo Angela - Booher Andrea	2018	<a href="https://blogthinkbig.com/la-biomasa-ayuda-reducir-las-emisiones-de-dioxido-de-carbono">https://blogthinkbig.com/la-biomasa-ayuda-reducir-las-emisiones-de-dioxido-de-carbono</a> .
Análisis del efecto sobre el crecimiento económico del incremento de la producción de energía renovable en el Ecuador.	- Simba Nataly - Pucachaqui Simba	2019	<a href="https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20485">https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20485</a>
Aprovechamiento de energía de la biomasa: caso de estudio de los restos de comida de familias de estudiantes de la Universidad de Guayaquil, para producción de biogás.	- Coello Magdalena - Benigno Antonio - González Yomar - Hidalgo José	2021	<a href="https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/3251">https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/3251</a>
Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles.	- Romero Arturo - Valverde Rodrigo	2010	<a href="https://www.asociacionchelonias.org/premios-mares-circulares-es">https://www.asociacionchelonias.org/premios-mares-circulares-es</a>
Aprovechamiento de la biomasa para uso energético.	- Borja Velásquez Martí	2018	<a href="https://blog.gruponovel.ec.com/blog/sistemas-aprovechamiento-la-biomasa/">https://blog.gruponovel.ec.com/blog/sistemas-aprovechamiento-la-biomasa/</a>
La biomasa como fuente heterogénea y sus generalidades.	- Zabala Ronny - Benavides Carla	2017	<a href="https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biomasa/index.cshtml">https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biomasa/index.cshtml</a>

El futuro de los combustibles en el medio ambiente. (Ramírez, 2016)	- Ramírez Alejandra - Cabrera Romina	2016	<a href="https://www.primagas.es/blog/biocombustibles">https://www.primagas.es/blog/biocombustibles</a>
Gasificadores de Biomasa de obtención de energía térmica y mecánica.	- Quintana German - Gaviria Andrea - González Rafael	2014	<a href="https://www.eafit.edu.co/innovacion/transferecia/Paginas/gasificador-de-biomasa.aspx">https://www.eafit.edu.co/innovacion/transferecia/Paginas/gasificador-de-biomasa.aspx</a>
Centrales de Biomasa y sus tipos.	- Bayas Alondra - Almendariz Cesar	2020	<a href="https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-de-biomasa">https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-de-biomasa</a>
Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa.	- Castelo 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>

Realizado por: González M., 2024.

## 2.2. Referencias teóricas

### 2.2.1. Biomasa

Es la materia orgánica de origen biológico que puede utilizarse como fuente de energía o para diversos fines industriales y biotecnológicos, esto incluye una amplia variedad de materiales biológicos, como plantas, árboles, residuos agrícolas, desechos forestales, excrementos de animales y otros materiales biodegradables. La biomasa puede ser transformada a través de procesos como la combustión, la gasificación o la fermentación para generar calor, electricidad, biocombustibles, además de ser una fuente renovable de energía, desempeña un papel importante en la mitigación del cambio climático al capturar y almacenar carbono de la atmósfera.

Según (Ahumada,2016) se define a la biomasa como la porción biodegradable de los productos, restos y desechos derivados de actividades agrícolas, que abarcan tanto componentes de origen vegetal como animal, así como los provenientes de la silvicultura y sectores relacionados como la pesca y acuicultura.(pág. 45)

Basándose en las definiciones previamente proporcionadas, es posible inferir que la energía contenida en la biomasa es esencialmente energía solar, la cual se almacena a través de la fotosíntesis, un procedimiento en el cual los seres vivos emplean la luz solar para convertir compuestos inorgánicos en compuestos orgánicos conocidos como carbohidratos.

(Mishra, 2021, págs. 329-332).

### **2.2.2. Briqueta**

Son bloques compactos y densos que se crean al comprimir diversos materiales en forma de polvo, partículas finas o fragmentos, utilizando presión y en algunos casos aglutinantes naturales o químicos, estas unidades compactas suelen tener formas y tamaños definidos, lo que facilita su manipulación, transporte y almacenamiento. Las briquetas se utilizan comúnmente como combustible en procesos industriales, sistemas de calefacción y generación de energía, reemplazando a fuentes de energía convencionales como el carbón o la madera, son una forma eficiente de utilizar diversos tipos de materiales residuales y subproductos, contribuyendo a la gestión sostenible de recursos y la reducción de residuos. (Mishra, 2021, págs. 329-332)

### **2.2.3. Características energéticas de la biomasa**

Las características energéticas de la biomasa se determinan a través de la relación de conversión de la biomasa en energía, considerando esto aparecen parámetros y condiciones dependientes del tipo de biomasa utilizada no obstante las generales son:

#### **2.2.3.1. Contenido de humedad**

Es la cantidad de agua que se puede encontrar en el material biológico, expresado como porcentaje del peso total del material, es una característica fundamental porque afecta directamente a la eficiencia de la combustión y procesos de conversión de biomasa en energía. (Ferronato,2016, pág. .224)

El contenido de humedad afecta la eficiencia de la combustión, ya que una mayor cantidad de agua en la biomasa fresca requiere más energía para evaporar antes de que la materia orgánica comience a quemarse.

#### *2.2.3.2. Composición química*

La composición química de la biomasa varía ampliamente según su origen biológico y su estado de frescura, está principalmente compuesta por carbono, hidrógeno y oxígeno. Sus componentes fundamentales incluyen carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, cada uno desempeñando roles cruciales en la estructura y función celular, la biomasa fresca a menudo contiene una cantidad significativa de agua, lo que afecta su contenido químico y su utilidad para la generación de energía y la producción de biocombustibles. (Álvarez, 2016, pág. 98)

#### *2.2.3.3. Poder calorífico*

Es la cantidad de calor producido por la combustión completa de un determinado volumen o peso de biomasa, se expresa en unidades como mega-julios por kilogramo (MJ/kg) o mega calorías por kilogramo (Mcal/kg), cuanto mayor sea el poder calorífico, más energía se puede obtener de la biomasa durante la combustión, es el aspecto que determina la energía disponible en la biomasa. (Márquez, 2019, p. 195)

#### *2.2.3.4. Densidad energética*

Influye en aspectos como el almacenamiento, el transporte y la eficiencia de la conversión energética, una biomasa más densa energéticamente permite un almacenamiento más eficiente y una mayor cantidad de energía transportada en un espacio reducido. Sin embargo, la densidad energética también puede verse afectada por la humedad y otros factores, lo que influye en la eficiencia de la combustión o la conversión en biocombustibles. (Álamo, 2018, pág. 76)

#### *2.2.3.5. Eficiencia de conversión*

La eficiencia se refiere a la capacidad de transformar la energía contenida en la biomasa en una forma utilizable, como calor, electricidad, biocombustibles u otros productos derivados, puede variar según los procesos de conversión utilizados y los tipos de biomasa involucrados.

#### *2.2.3.6. Estabilidad y almacenamiento*

Algunas formas de biomasa, como las briquetas, las cuales son formas más densas de biomasa, creadas al compactar y procesar los materiales, se consideran más estables y fáciles de almacenar y transportar, lo que facilita su uso en sistemas de calefacción y generación de energía. (Romanelli, 2016, pág .30).

#### **2.2.4. Tipos de biomosas**

##### *2.2.4.1. Biomasa forestal*

Según (Londoño,2019) abarca restos de árboles y desechos de la industria maderera, como ramas, hojas, cortezas y aserrín, estos materiales son una fuente valiosa para la generación de energía y la producción de biocombustibles sólidos, como pellets y briquetas, por otro lado, la biomasa forestal también incluye la madera proveniente de bosques gestionados de manera sostenible, promoviendo un enfoque responsable en la obtención de recursos renovables.

##### *2.2.4.2. Biomasa residual agrícola*

La biomasa residual agrícola, incluye los subproductos y restos de cultivos como cáscaras de cereales, tallos de plantas, hojas y otros materiales que no son capaces de ser utilizados en la producción alimentaria, a su vez estos desechos pueden ser transformados en energía por medio de procesos de conversión, aminorando la cantidad de residuos y brindando una fuente adicional de ingresos para los agricultores. (Callejo, 2017, pág.10)

##### *2.2.4.3. Biomasa de cultivos energéticos*

Los cultivos energéticos son plantas cultivadas específicamente para la producción de biomasa, entre ellos se puede mencionar al maíz, la caña de azúcar, que son utilizados para generar biocombustibles de tipo líquido como el etanol, además estos cultivos pueden ser una fuente renovable de combustibles y ayudan a menorar la dependencia de los combustibles fósiles. (Galindo, 2019, pág. 30).

##### *2.2.4.4. Biomasa de residuos industriales*

Según (Carrasco, 2019) los subproductos de la industria alimentaria, papelera y otras industrias

también pueden ser considerados biomasa, entre estos residuos se puede considerar a las cáscaras de frutas, bagazo de caña de azúcar y pulpa de papel, pueden ser aprovechados para la generación de energía y la producción de biocombustibles y productos químicos.

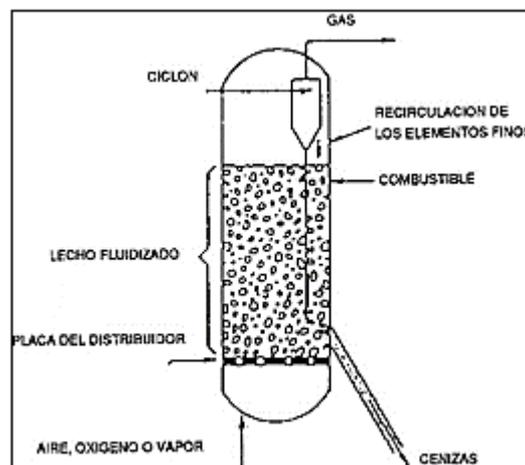
#### 2.2.4.5. Biomasa de algas y microorganismos

Las algas y microorganismos acuáticos pueden ser cultivados para producir biomasa rica en aceites y carbohidratos, que luego se convierten en biocombustibles como el biodiésel y el bioetanol, estos microorganismos pueden cultivarse de manera controlada y sostenible, ofreciendo una fuente potencial de energía y productos químicos renovables.

Un gasificador es un dispositivo diseñado para convertir materiales compuestos por carbono, como biomasa, carbón, residuos sólidos urbanos u otros combustibles sólidos, en un gas llamado "gas de síntesis", este proceso se lleva a cabo a través de la gasificación, implica reacciones químicas en las que el material se descompone en presencia de un agente gaseoso, en un ambiente controlado de baja cantidad de oxígeno.

#### 2.2.5. Gasificador

Un gasificador funciona a temperaturas elevadas con poca entrada de oxígeno para la síntesis de gases, principalmente monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y otros como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y nitrógeno, la síntesis de este gas es útil para muchos fines, como la producción de energía eléctrica, calefacción, generación de biocombustibles sintéticos y síntesis química por medio de materia prima química. (Mishra, 2021, págs. 329-332)



**Ilustración 2-1:** Estructura de un Gasificador

Fuente: (Márquez, 2019, p .199).

### 2.2.5.1. Tipos de gasificador

- **Gasificador de lecho fijo**

El gasificador de lecho fijo implica colocar la biomasa en un lecho estacionario, donde se lleva a cabo la gasificación al introducir un agente oxidante, como aire, oxígeno o vapor. Este tipo de gasificador puede tener un diseño de lecho ascendente o descendente, y la eficiencia del proceso puede variar según la aplicación específica, son conocidos por su simplicidad y durabilidad, siendo utilizados en diversas aplicaciones, desde la generación de electricidad hasta la producción de calor para procesos industriales. (Pérez, 2021, pág. 501)

- **Gasificador de lecho fluidizado**

En el gasificador de lecho fluidizado, la biomasa es suspendida en un lecho de partículas inertes mediante la introducción de aire o vapor que son agentes fluidizantes. Este diseño tiene la ventaja de que favorece una mayor transferencia de calor y una temperatura más homogénea si se compara con los gasificadores de lecho fijo, son particularmente eficientes en la conversión de biomasa y tienen un gran papel en aplicaciones que van desde la producción de electricidad hasta la generación de calor para procesos industriales. (Pérez, 2021, pág. 501)

- **Gasificador de Downdraft**

Este gasificador tiene un funcionamiento que se basa en colocar la biomasa en su parte superior, sitio donde la gasificación ocurre descendientemente hasta llegar al fondo, es aquí donde se puede extraer el gas de síntesis, su diseño contribuye a la producción de un gas de mayor calidad y con menos alquitrán, son muy eficaces en la descomposición de materiales orgánicos y se emplean en diversas aplicaciones, que van desde sistemas de calefacción hasta la generación de energía en comunidades rurales. (Pérez, 2021, pág. 501)

- **Gasificador de Flujo de Arrastre**

Se caracteriza por la dirección del flujo del gas y la biomasa en la misma dirección, es decir, ambas corrientes se desplazan en el mismo sentido, la biomasa y el agente gasificante, generalmente aire o vapor, ingresan en la parte superior del gasificador y fluyen en la misma dirección a través de la cámara de gasificación. (Galindo, 2019, pág. 80)

### **2.2.6. Briqueeta de tusa de maíz**

Según (Brito,2015) esta briqueeta dispone de energía almacenada en forma de lignocelulosa, por lo cual se convierte en una potencial fuente de calor y energía. Cuando se utiliza la tusa de maíz, se puede reducir el número de residuos agrícolas y fomentar el uso más sostenible de los subproductos, para reemplazar los combustibles fósiles, se pueden usar estas briqueetas, y disminuir las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes. Como subproducto agrícola, generalmente está disponible a bajo costo hasta es gratis en ciertas regiones, haciendo que la producción de briqueetas sea viable hablando económicamente.

Son bloques compactos producidos a partir de la tusa, que es la parte fibrosa y leñosa del maíz que rodea los granos, la tusa es un subproducto agrícola que no se utiliza y se descarta, pero puede ser una fuente valiosa de biomasa para la producción de energía y otros fines, las briqueetas se crean mediante un proceso de compactación en el que la tusa se tritura y luego se aglomera en forma de briqueetas utilizando presión mecánica o calor. (Callejo, 2017, pág .45).



**Ilustración 2-2:** Tusa de maíz

**Fuente:** (Callejo, 2017, pág .45).

### **2.2.7. Briqueeta de cáscara de papa**

Se definen como bloques compactos que se crean a partir de la cáscara de papa, un subproducto agrícola que generalmente se descarta después de la preparación y el procesamiento de alimentos. Además, son una forma de aprovechar de manera sostenible este material y convertirlo en una fuente útil de energía, el proceso de fabricación de briqueetas de cáscara de papa es similar al de otras briqueetas de biomasa.

El uso de briquetas ayuda a reducir la cantidad de residuos orgánicos que terminan en vertederos, lo que contribuye a la gestión más eficiente de los desechos.



**Ilustración 2-3:** Cáscara de papa

**Fuente:** (Callejo, 2017, pág. .45).

### ***2.2.8. Aplicación energética de la biomasa***

Representa un enfoque clave en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y renovables, la biomasa que abarca desde residuos agrícolas hasta cultivos energéticos específicamente cultivados, se utiliza para generar electricidad, calor y biocombustibles. A través de tecnologías como la gasificación y la combustión, la biomasa se convierte en gas de síntesis o se quema directamente para producir energía térmica, lo cual permite su aplicación en diversos sectores, desde la generación de electricidad en plantas de biomasa hasta la calefacción residencial y la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, la aplicación de biomasa contribuye a la gestión sostenible de residuos, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero.

#### ***2.2.8.1. Biocombustibles***

Los combustibles que más se conocen incluyen los derivados del petróleo, como la gasolina y el diésel, así como el gas natural y biocombustibles, estos recursos energéticos son fundamentales para propulsar la movilidad y alimentar la infraestructura industrial, a pesar de esto, su explotación y consumo también están relacionados con desafíos medioambientales, como las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de uso de fuentes no renovables, como solución a estos problemas, la investigación de combustibles más renovables

y sostenibles, como el hidrógeno verde y los biocombustibles avanzados, está ganando fuerza, la mudanza hacia opciones más limpias destaca la importancia de equilibrar la demanda energética con la obligación de mitigar los impactos ambientales. (Londoño, 2019, pág. .31)

#### 2.2.8.2. *Tipos de biocombustibles*

- **Biocombustibles de primera generación**

Los biocombustibles de primera generación, como el etanol y el biodiésel, provienen de cultivos alimentarios y aceites vegetales, el etanol se obtiene de la fermentación de azúcares en plantas como la caña de azúcar o el maíz, mientras que el procedimiento llamado transesterificación de aceites vegetales es necesario para obtener el biodiésel (Londoño, 2019, pág .31)

- **Biocombustibles de segunda generación**

Los materiales no alimentarios como residuos agrícolas y maderas son a partir del cual se forman estos combustibles, utilizando procedimientos avanzados de conversión bioquímica o termoquímica, buscan superar la adversidad de los de primera generación, con la producción de alimentos y aprovechando fuentes de biomasa más diversas.

- **Biocombustibles de tercera generación**

Se centran en organismos que han sido modificados genéticamente, como las algas, para aumentar la eficiencia en la producción de biomasa, estas son ricas en lípidos y carbohidratos, pueden cultivarse en entornos no agrícolas, como estanques o reactores minimizando la competencia con la producción de alimentos y tierras agrícolas. (Londoño, 2019, pág .31)

#### 2.2.9. *Residuos agroindustriales*

Son subproductos, de los procesos de producción en la industria agrícola y alimentaria, estos residuos involucran una gran variedad de materiales, como cáscaras de frutas, tallos, hojas, huesos, pulpas y otros materiales orgánicos que son el resultado de la transformación de materias primas agrícolas, una gestión adecuada de estos residuos es muy necesaria, debido a que su mala disposición es capaz de generar impactos ambientales negativos.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Enfoque de investigación

El presente trabajo de titulación tiene un enfoque de investigativo mixto ya que abarca desde la preparación de las briquetas hasta la gasificación y el análisis de los resultados, con el objetivo de comprender cómo la combinación de estos elementos puede contribuir al aprovechamiento eficiente y sostenible de la biomasa para la generación de energía.

##### *3.1.1. Enfoque de investigación cualitativo*

En este enfoque se realizará el método cualitativo, ya que se llevarán a cabo investigaciones exploratorias para comprender las características de la biomasa, los procesos de fabricación de briquetas y el funcionamiento de gasificación.

##### *3.1.2. Enfoque de investigación cuantitativo*

Se desarrollará un enfoque cuantitativo ya que se realizará pruebas en condiciones controladas para medir las propiedades físicas y químicas de las briquetas y el gas de síntesis resultante, 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 la investigación

##### *3.2.1. Investigación descriptiva*

El alcance de tema de titulación puede ser considerado descriptivo debido a que se van a describir a detalle los procesos que forman parte del desarrollo de la gasificación y además todas las características de las briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa con fines de aprovechar esta biomasa como un beneficio energético.

##### *3.2.2. Investigación experimental*

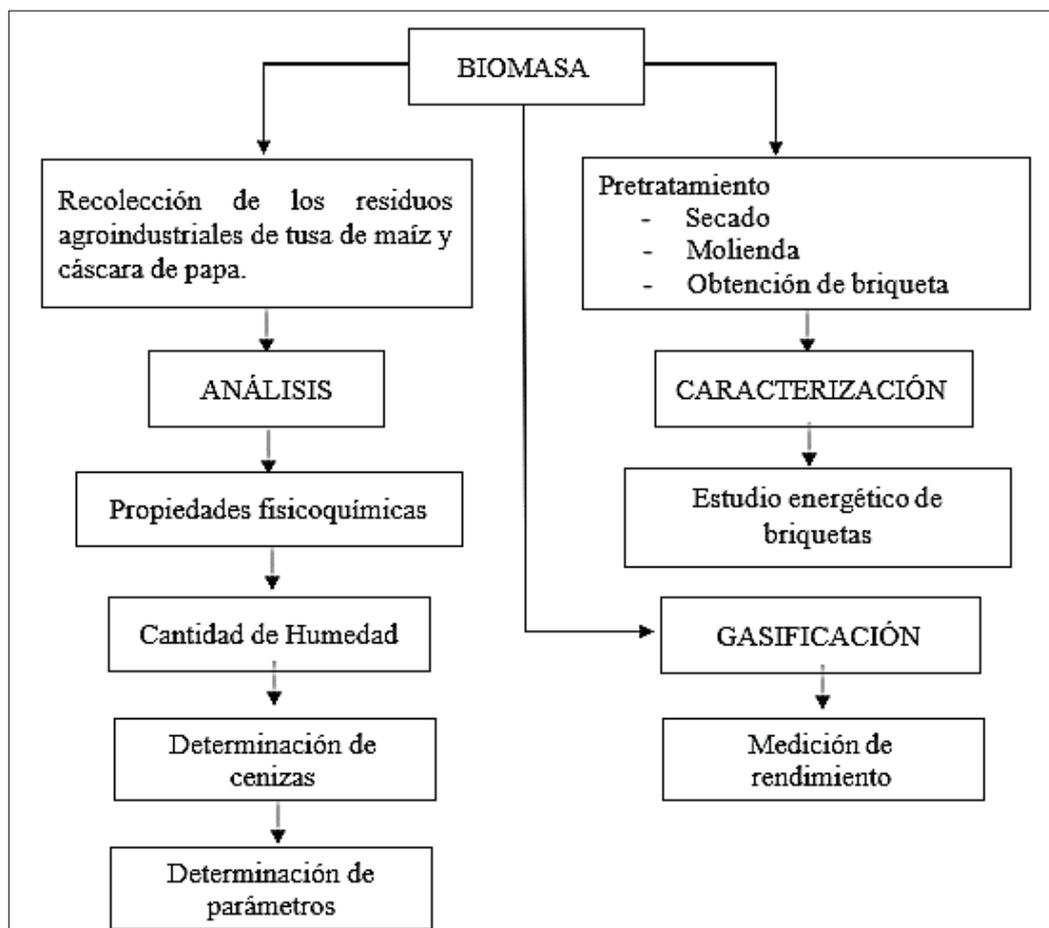
Es una investigación experimental debido a la naturaleza práctica y a la necesidad de realizar

pruebas de gasificación y mediciones en condiciones controladas para evaluar la viabilidad y eficacia del proceso con estas briquetas, además se realizarán pruebas piloto en el gasificador, para un mejor manejo del mismo y finalmente obtener el gas de síntesis para ser analizado en un laboratorio de cromatografía.

### 3.3. Diseño de investigación

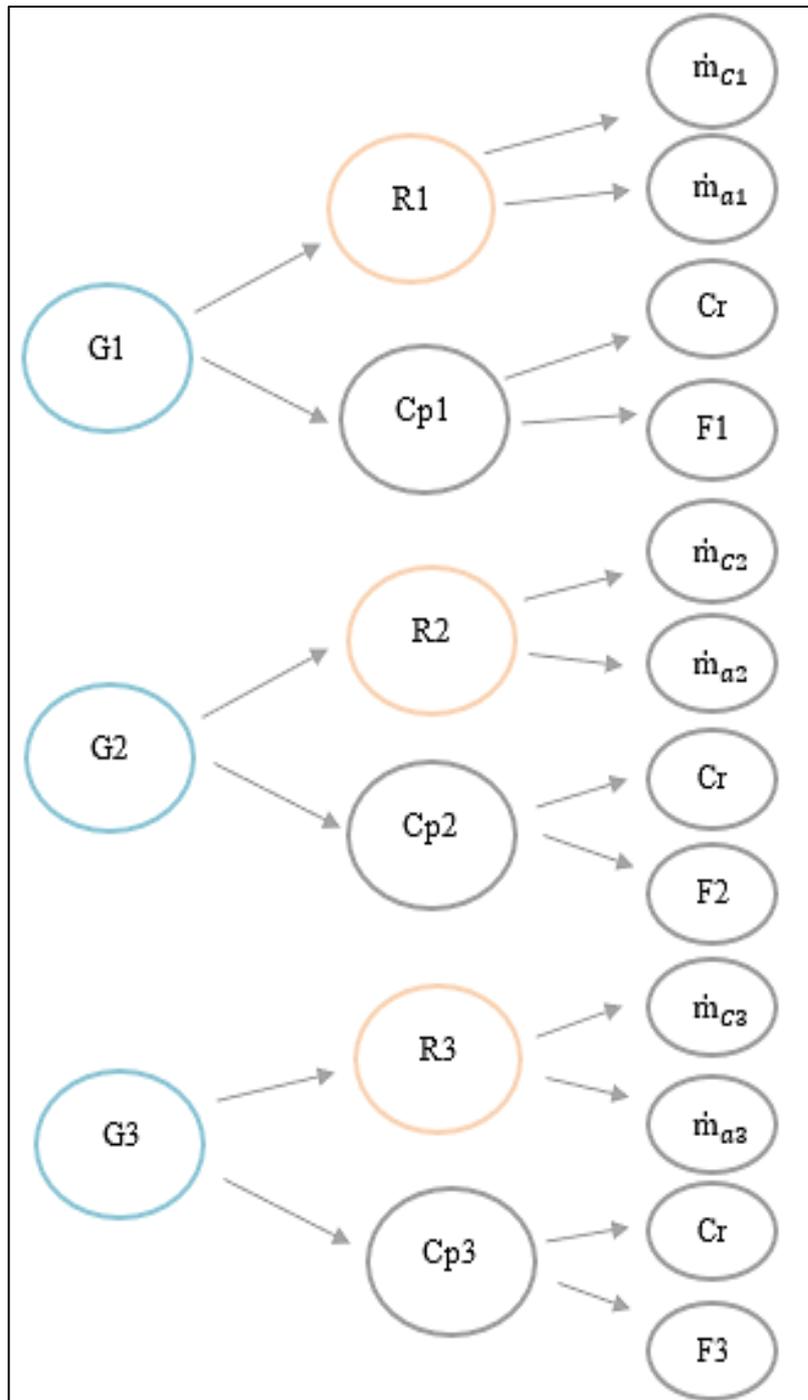
El tipo de diseño propuesto en el trabajo de investigación es aleatorio, ya que permite explorar las relaciones entre múltiples variables y cómo afectan el proceso de gasificación y el rendimiento energético, dado que también se busca analizar correlaciones entre diferentes factores, un enfoque correlacional puede ser incorporado en el diseño factorial para los análisis que se requieren.

Para el diseño de este tipo se consideran dos factores fundamentales y los más adecuados para establecer una relación de variables.



**Ilustración 3-1:** Diagrama de flujo del diseño experimental

Realizado por: González M., 2024.



**Ilustración 3-2:** Diseño experimental para la investigación científica

**Realizado por:** González M.,2024.

Para obtener el gas de síntesis adecuado, con un margen de error mínimo, se realizarán 3 pruebas de gasificación a nivel de laboratorio como se muestra a continuación.

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

	<b>Primera Gasificación</b>	<b>Segunda Gasificación</b>	<b>Tercera Gasificación</b>
<b>Variabes</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>
Temperatura	$T_1$	$T_2$	$T_3$
Flujo de aire	$\dot{m}_{aire1}$	$\dot{m}_{aire2}$	$\dot{m}_{aire3}$
Flujo de biomasa	$\dot{m}_{biomasa1}$	$\dot{m}_{biomasa2}$	$\dot{m}_{biomasa3}$
Flujo de agua	$\dot{m}_{agua1}$	$\dot{m}_{agua2}$	$\dot{m}_{biomasa3}$

Realizado por: González M.,2024.

**Tabla 3-2:** Parámetros del diseño experimental de la muestra

	<b>Primera Gasificación</b>	<b>Segunda Gasificación</b>	<b>Tercera Gasificación</b>
<b>Variabes</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>
Temperatura	502,6 °C	538,7 °C	556,9 °C
Flujo de aire	68,903 kg/h	68,903 kg/h	68,903 kg/h
Flujo de biomasa	3 kg/h	4 kg/h	5 kg/h
Flujo de agua	10 L	10 L	12 L

Realizado por: González M.,2024.

En donde:

*Temperatura* →  $T$  (°C)

*Flujo de aire* →  $Fa$  (kg/h)

*Flujo de biomasa* →  $Fb$  (kg/h)

*Cenizas* →  $C$  (kg)

### 3.3.1. Identificación de variables

#### 3.3.1.1. Variables independientes

- Tipo de biomasa
- Gasificación

#### 3.3.1.2. Variables dependientes

- Cantidad de residuo de biomasa

- Calidad y composición del gas de síntesis

### 3.4. Tipo de estudio

El trabajo de titulación es de tipo documental ya que antes de llevar a cabo pruebas experimentales, es esencial tener un sólido entendimiento del estado actual del conocimiento en el campo de la gasificación de biomasa y la utilización de briquetas, además se realizará en los laboratorios de la facultad de ciencias.

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

Se llevan a cabo pruebas experimentales en un laboratorio lo cual permite la manipulación de las variables independientes como el contenido de humedad, análisis de la composición química de las briquetas, entre otros. (Callejo, 2017, pág. 21)

#### 3.5.1. Análisis de composición química de las briquetas

**Tabla 3-3:** Análisis de composición química

Proceso de análisis	Materiales	Sustancias y Reactivos
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Toma de muestra del compuesto en un crisol.</li> <li>2. Colocación en una bandeja, para el ingreso al equipo.</li> <li>3. Encendido de equipo.</li> <li>4. Obtención de datos finales.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Crisoles</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Guantes</li> <li>• Mascarilla</li> <li>• Analizador elemental orgánico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Briqueta de tusa de maíz.</li> <li>• Briqueta de cáscara de papa.</li> </ul>

Realizado por: González M., 2024.

### 3.5.2. Determinación del contenido de humedad

**Tabla 3-4:** Determinación del contenido de humedad

Proceso de Análisis	Materiales	Sustancias y Reactivos
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Selección de la muestra representativa de briquea</li> <li>2. Pesaje y secado de la muestra</li> <li>3. Dejar la muestra en el horno durante un periodo de tiempo</li> <li>4. Restar el peso de la muestra seca del peso inicial para obtener la masa de agua evaporada</li> <li>5. Dividir la masa de agua evaporada por el peso inicial de la muestra y multiplica por 100 para obtener el porcentaje de humedad</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estufa de secado</li> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Guantes</li> <li>• Mascarillas</li> <li>• Bandejas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Briquea de tusa de maíz</li> <li>• Briquea de cáscara de papas</li> </ul>
<b>Cálculo de la Humedad</b>		
$\% \text{ Humedad} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1}$		
<p>En donde:</p> <p><math>W_1</math> → Peso inicial de la muestra en gramos</p> <p><math>W_2</math> → Peso de la muestra seca en gramos (Peso del recipiente con la muestra – Peso del Recipiente)</p>		

Realizado por: González M.,2024.

### 3.5.3. Determinación del contenido de cenizas en los residuos

**Tabla 3-5:** Determinación del contenido de cenizas

Proceso de análisis	Materiales	Sustancias y Reactivos
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Selección de la muestra debriqueta.</li> <li>2. Pesaje de lamuestra en balanzaanalítica.</li> <li>3. Colocación de lamuestra en un horno precalentado a una temperatura alta (generalmente alrededor de 500 °Ca 600 °C</li> <li>4. Después de la quema, retirar la muestra y dejar que se enfríe en un desecador.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Secador</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Guantes</li> <li>• Mascarilla</li> <li>• Bandeja.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Briqueta de tusa de maíz.</li> <li>• Briqueta de cáscarade papa.</li> </ul>
<b>Cálculo del contenido de cenizas</b>		
$\% \text{ Cenizas} = \frac{(A \times 100)}{B}$		
<p>En donde:</p> <p>A → peso de la ceniza en gramos</p> <p>B → <i>peso de la muestra inicial en gramos</i></p>		

Realizado por: González M.,2024.

### 3.5.4. Análisis elemental de hidrógeno y oxígeno a la biomasa de los residuos

**Tabla 3-6:** Análisis elemental de hidrógeno y oxígeno

<b>Determinación del contenido de H y O</b>	
<b>Materiales y Equipos</b>	<b>Sustancias y Reactivos</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Balanza analítica</li><li>• Crisoles</li><li>• Pinzas</li><li>• Guantes</li><li>• Analizador DUMAS</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cáscara de papa</li><li>• Tusa de maíz</li></ul>
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Pesar la biomasa</li><li>2. Tomar muestras y colocarlas en los crisoles y cerrar con pinzas</li><li>3. Colocar los crisoles sobre la bandeja del equipo</li><li>4. Encender el equipo</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>5. Esperar el tiempo determinado</li><li>6. El equipo arroja los datos luego de ser analizados</li></ol>

Realizado por: González M., 2024.

### 3.6. Elaboración de las briquetas con 50% de cáscara de papa y 50% de tusa de maíz

En la elaboración de las briquetas fueron utilizados 2,5 kg de cáscara de papa y 2,5 kg de tusa de maíz que al inicio fueron trituradas para reducir el tamaño de las partículas para que la biomasa se vuelva totalmente uniforme (Guevara 2023, pág. 43). Cabe decir que según la bibliografía antes mencionada toma como resultado que la combinación del 50% de cáscara de papa con el 50% de tusa de maíz es la más apta para mezclar ya que esta combinación tiene mayor poder calorífico que otras combinaciones.

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

El gasificador se encuentra ubicado en la facultad de mecánica, forma parte de un proyecto, 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 3-7:** Especificaciones del Gasificador

<b>Gasificador</b>	
Tipo	Down draft
Material	Acero A36 de 4mm
Aislante térmico	Fibra de vidrio
Capacidad	12,5 kg
Agente Gasificante	aire
Voltaje	220 V
Diámetro de garganta	27,8 cm
Altura cámara de reducción	86,7 cm
<b>Biomasa</b>	
Humedad	< 15%
Tamaño promedio de partículas	< 3cm
Relación aire-combustible	1,5 kg/kg combustible
Carga al gasificador	Manual

Fuente: (Noteno & Zapata, 2022).

Realizado por: González M., 2024.

### 3.8. Parámetros para el proceso de gasificación

Los parámetros de funcionamiento son aquellos que se determinan de acuerdo a la descripción del gasificador con el cual se trabaja y dependiendo de 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 4 kg de briquetas, 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.

- **Presión Atmosférica**

$$P_{atm} = 101325 * \left( \frac{T_{amb} - 0,0065 * z}{T_{amb}} \right)^{5,256} \quad (1)$$

En donde:

$P_{atm}$  → Presion atmosférica

$T_{atm}$  → Temperatura ambiente

$z$  = Metros sobre el nivel del mar

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

$$P_{atm} = 72928 Pa$$

- **Densidad del aire**

A partir de la ecuación de los gases se determina el valor de densidad del aire, siempre en consideración de que R va a ser la constante de gases, trabajando en aire seco.

$$P_{aire} = \frac{P_{atm}}{R * T_{amb}} \quad (2)$$

En donde:

R → Constante de los gases para aire seco

T → Temperatura promedio

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

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

### **3.9. Procedimiento para gasificar**

#### **3.9.1. Encendido del gasificador**

- Realizar una limpieza y revisión de todo el equipo de gasificación
- Colocar la manguera por donde sale el gas
- Conectar el equipo a una toma eléctrica de 220V y esperar hasta que el regulador faculte su encendido para alzar el breque del papel de control.
- Encender el carbón, luego 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.
- Colocar una cantidad ideal de carbón en la garganta del gasificador.
- 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.
- Cerrar el acceso a la cámara de combustión, verificar que todo esté funcionando correctamente para poder ir tomando datos.
- Comprobar que el gasificador esté produciendo gas de síntesis.

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

Para encender el gas, en el interior, el equipo debe alcanzar temperaturas de combustión entre 500 °C y 600°C, la generación de calor crucial para la fase de reducción proviene de la etapa de combustión, dado que esta última fase es fundamental para obtener una mayor cantidad de gases inflamables, es imperativo monitorear regularmente las lecturas de temperatura, el equipo experimenta el proceso de gasificación en un lapso de 20 a 25 minutos, y más allá de este período, es posible observar la producción de gas de baja calidad.

Cualquier implemento que genere una llama, como un mechero, una fosforera o fósforos, puede ser utilizado para iniciar la ignición del gas, si se observa una reducción en el flujo de gas, se puede emplear el agitador del equipo para mezclar la biomasa de manera homogénea y así mejorar la producción de gas. (Adelawe y Alabi 2019, págs. 110-117).

#### **3.9.3. Toma de muestra de gas**

Una vez confirmada la estabilidad del flujo de la llama, se inicia el proceso de muestreo del gas

de síntesis en la bolsa de fluoruro de polivinilo (Tedlar), siguiendo rigurosamente los pasos detallados en el procedimiento proporcionado por el analista del Laboratorio de Análisis Instrumental de la EPN. Estos pasos son los siguientes:

- Posicionar la válvula de la bolsa Tedlar en el lugar designado para el muestreo.
- Activar la válvula de la bolsa Tedlar.
- Abrir la válvula de salida de la muestra.
- Imposibilitar el flujo hacia la bolsa Tedlar al alcanzar las tres cuartas partes de su capacidad, cerrando la válvula de salida de la muestra.
- Por último, retirar la bolsa Tedlar del punto de muestreo.

#### **3.9.4. Apagado del equipo**

Cuando la cantidad de gas disminuye, indica que el aire caliente empieza a escapar, lo que implica que la biomasa dentro del equipo ha sido totalmente agotada, al concluir el procedimiento es necesario llevar a cabo las siguientes acciones:

- Desactivar el ventilador.
- Bajar el freno presente en el panel de control.
- Desconectar el equipo de la toma de corriente eléctrica.
- Desenroscar las tapas de las compuertas de alimentación y la compuerta de ceniza con el objetivo de reducir la temperatura. (Adelawe y Alabi 2019, págs. 110-117).

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

Después de completar el proceso de gasificación es necesario aguardar entre una hora y hora y media, o hasta que el equipo se enfríe por completo, antes de realizar cualquier otra acción.

- Es crucial verificar que no quede biomasa en las cámaras de combustión, reducción y acceso lateral.
- Si se llega a detectar biomasa, es necesario retirar los seguros de la parrilla y bajarla, trasladándola desde la cámara de combustión hacia la cámara de cenizas, para facilitar una mejor limpieza (Gani,2018, págs. 198-200).

### 3.9.6. *Parámetros de gasificación*

Se logra identificar los factores que deben considerarse al llevar a cabo el proceso de gasificación, con el objetivo de optimizar su ejecución, estos factores proporcionaron información sobre el funcionamiento del equipo, la selección del agente gasificante para realizar pruebas, la cantidad recomendada de biomasa a introducir en el gasificador, la presión atmosférica y temperatura ambiente durante el proceso, así como la densidad del aire.

**Tabla 3-8:** Parámetros de gasificación

<b>Parámetros de Gasificación</b>	
Tipo de Gasificador	Downdraft
Agente Gasificante	Aire
Densidad del aire	0,86 kg/m <sup>3</sup>
Cantidad de Biomasa	3kg de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz
Tipo de materia para el arranque	Carbón
Cantidad de arranque	1 kg
Temperatura ambiente	22, 7 °C
Presión atmosférica	72928 Pa

Realizado por: González M., 2024.

### 3.9.7. *Proceso de gasificación*

A continuación, se presenta de manera concisa el procedimiento realizado para llevar a cabo la gasificación de briquetas.

**Tabla 3-9:** Pasos para realizar el proceso de gasificación

<b>Pasos para realizar el proceso de gasificación</b>	
Llevar a cabo la medición de la muestra	
Encender el material inicial	
Preparar las adecuaciones en el equipo	
Colocar las briquetas en el gasificador, y cerrar las compuertas	

<p>Verificar la presencia de gas usando una fosforera y una hornilla adecuada</p>	
<p>Tomar la muestra de gas en la funda tedlar</p>	
<p>Almacenar en un recipiente que brinde seguridad a la muestra</p>	
<p>Una vez terminado el procedimiento, recolectar las cenizas y el alquitrán en casos de existir residuos</p>	

Realizado por: González M., 2024.

### 3.9.8. *Primera gasificación con cáscara de papa y tusa de maíz*

**Tabla 3-10:** Guía de la primera gasificación

<b>Descripción</b>	<b>Cáscara de papa y tusa de maíz</b>
Kg de biomasa utilizada	3 kg
Kg de arranque de carbón	1 kg
Tamaño de materia	3 cm de diámetro 4,5 cm de largo
Tiempo de gasificación	30 min
Tiempo total del proceso de gasificación	1 hora
Kg de cenizas	0,42 kg
Alquitrán	1,15 L
Temperatura ambiente	22,7 °C
Humedad relativa	38,6 %
Cantidad de agua	10 L

Realizado por: González M., 2024.

### 3.9.9. *Segunda y tercera gasificación con briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz*

**Tabla 3-11:** Guía de la segunda gasificación

<b>Descripción</b>	<b>Cáscara de papa y tusa de maíz</b>
Kg de biomasa utilizada	4 kg
Kg de arranque de carbón	1,5 kg
Tamaño de materia	3 cm de diámetro 4,5 cm de largo
Tiempo de gasificación	35 min
Tiempo total del proceso de gasificación	1 hora
Kg de cenizas	0,65 kg
Alquitrán	1,2 L
Temperatura ambiente	22,7 °C
Humedad relativa	38,6 %
Cantidad de agua	10 L

Realizado por: González M., 2024.

**Tabla 3-12:** Guía de la tercera gasificación

<b>Descripción</b>	<b>Briquetas de cáscara papa y tusa de maíz</b>
Kg de biomasa utilizada	5 kg
Kg de arranque de carbón	2 kg
Tamaño de materia	3 cm de diámetro 4,5 cm de largo
Tiempo de gasificación	40 min
Tiempo total del proceso de gasificación	1 hora
Kg de cenizas	0,70 kg
Alquitrán	1, 5 L
Temperatura ambiente	22,7 °C
Humedad relativa	38,6 %
Cantidad de agua	12 L

Realizado por: González M., 2024.

### **3.10. Análisis termodinámico de gasificación**

Considerando los criterios de la gasificación, la evaluación termodinámica se lleva a cabo en la zona de gasificación, donde tanto las entradas como las salidas se han definido cuantitativamente con el objetivo de obtener gas de síntesis, para lograr esto, es esencial tener en cuenta factores como la cantidad de aire estequiométrico, el poder calorífico inferior, el poder calorífico superior, el coeficiente de exceso de aire, la cantidad de aire necesaria para la gasificación y los resultados de los análisis cromatográficos. A continuación, se proporciona un detalle de los parámetros mencionados.

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

Dado que la mezcla del aire consiste en un 21% de oxígeno, un 78% de nitrógeno y otros gases menos prevalentes, se necesita aire seco para lograr una combustión completa por unidad de masa de hidrocarburo. A continuación, se presenta la siguiente ecuación que permite calcular la cantidad de aire estequiométrico.

$$m_{at} = 0,1153 \times C + 0,3434 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 0,0434 \times S \quad (3)$$

En donde:

$m_{at}$  → masa de aire estequiométrico kg aire/kg de combustible  
 C; H; O; S → porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre en base seca

Así, con el objetivo de determinar los coeficientes estequiométricos a través de un análisis estequiométrico de la composición química, se utilizan los valores porcentuales de la composición elemental de los dos tipos de biomasa indicados en la tabla, mediante la siguiente ecuación.

$$G_{xi} = \frac{i}{100} \quad (4)$$

En donde:

$G_{xi}$  → fracción gravimétrica en kg  
 i → composición de los elementos en %

### 3.10.2. Poder calorífico inferior

Es la suma completa de calor liberado durante la combustión total de un combustible. El PCI tiene en cuenta que el vapor de agua presente en los gases no experimenta condensación. Se determina el poder calorífico inferior de la biomasa seca utilizando la fórmula de Dulong, la cual se presenta a continuación.

$$PCI = 8,140 \times C + 29,000 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,220 \times S \quad (5)$$

Al emplear la ecuación con los valores ponderados correspondientes a la biomasa seca, se calcula el poder calorífico para ambas, tanto la cáscara de papas como la tusa de maíz

### 3.10.3. Poder calorífico superior

La relevancia del poder calorífico superior en el proceso de gasificación radica en su capacidad para establecer la cantidad de energía que puede liberarse y aprovecharse a partir del combustible durante dicho proceso, un poder calorífico superior más elevado implica una mayor cantidad de

energía disponible en el gas de síntesis generado. Es crucial considerar que puede variar según el tipo de combustible empleado y las condiciones específicas de la gasificación.

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

Mediante la aplicación de la ecuación 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 es una medida de la cantidad de aire que se mezcla con el combustible en un proceso de combustión, es la relación entre la cantidad de aire real que se encuentra junto con la cantidad de aire teórico necesaria para que se quemé todo el biocombustible.

$$EA = \frac{m_{ar}}{m_{at}} \quad (6)$$

**EA** → Coeficiente de aire en exceso

**m<sub>ar</sub>** → Masa de aire real o actual  $kg \frac{aire}{kg}$  de combustible

**m<sub>at</sub>** → Masa de aire teórico o estequiométrico  $kg \frac{aire}{kg}$  de combustible

**Tabla 3-13:** Coeficientes de exceso de aire por diferentes tipos de combustible

Combustibles	Valores de aire en exceso
Líquidos	1,1-1,2
Sólidos	1,5-2,0
Gaseosos	1,0-1,1

Fuente: Orozco, 2017.

Realizado por: González M., 2024.

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

La relación entre el índice de equivalencia y el factor de exceso de aire es directamente proporcional, lo que indica que a medida que se incrementa el factor de exceso de aire, también

aumenta el índice de equivalencia, esto se da ya que al introducir mayores cantidades de aire en exceso durante la combustión, se diluyen los gases, disminuyendo la concentración de oxígeno alrededor del combustible, lo que hace que se requiera gran cantidad de combustible para consumir todo el oxígeno disponible y mantener una combustión completa.

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

$$ER(< 1, 0)_{gasificación} = \frac{\text{aire actual}}{\text{aire estequiométrico}} = EA(> 1,0)_{combustión} \quad (7)$$

En donde:

*ER = Ratio de equivalencia (ER < 1,0) → quiere decir 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 necesaria para llevar a cabo la gasificación dependerá del análisis elemental de la materia orgánica y de la relación estequiométrica deseada, es esencial realizar un análisis teniendo en cuenta las condiciones necesarias de la gasificación a fin de establecer la cantidad ideal de aire.

$$m_{ag} = m_{at} \times ER \quad (8)$$

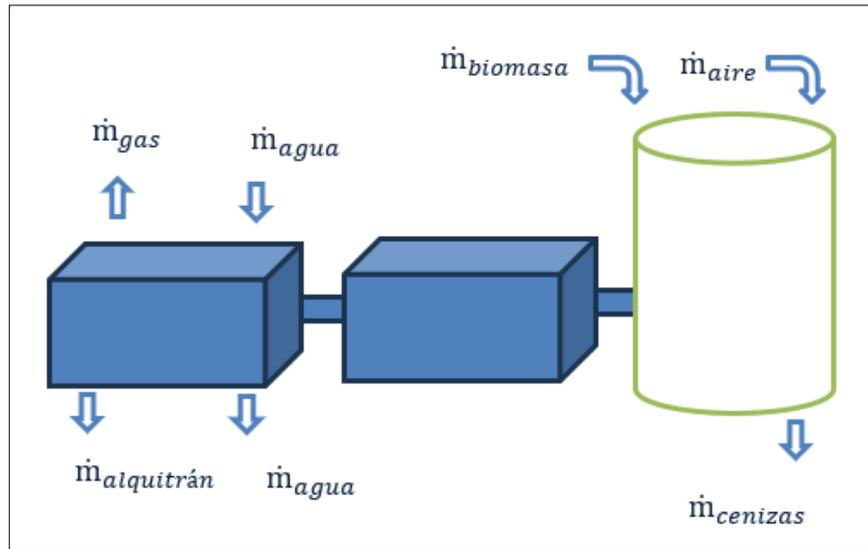
*m<sub>ag</sub> = masa de aire requerido para la gasificación en kg aire/kg combustible*

*ER → Relación de equivalencia*

Se considera que los valores adecuados para la relación de equivalencia oscilan entre 0,2 y 0,25.

### 3.10.6. Balance de masa

Se efectúa una evaluación de masa con el propósito de calcular la cantidad de briquetas que ingresa al gasificador y la cantidad de gas de síntesis que se produce o emana. En este balance de masa, se emplean los valores de flujo másico de biomasa, aire y gas obtenidos durante la prueba de gasificación.



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

Realizado por: González M., 2024.

**ENTRADA = SALIDA**

$$B + A = G + R$$

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{agua} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{cenizas} + \dot{m}_{alquitrán} + \dot{m}_{agua} \quad (9)$$

En 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)

$\dot{m}_{agua}$  → Flujo másico de agua (l)

$\dot{m}_{alquitrán}$  → Flujo másico de alquitrán (kg/h)

### **3.10.7. Cromatografía de gases**

En el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, se llevó a cabo la cromatografía del gas de síntesis de briquetas con el propósito de identificar y cuantificar distintos compuestos, así como caracterizar su composición química. Este proceso se efectuó siguiendo la normativa ASTM D 1945, titulada "Método de ensayo estándar para el análisis de hidrocarburos por cromatografía de gases". Esta norma describe los equipos necesarios, las condiciones operativas y los parámetros de calibración que deben seguirse para obtener resultados precisos. Asimismo, establece criterios para validar los resultados y proporciona directrices para la interpretación de los cromatogramas. Es relevante subrayar que la norma ASTM D 1945 es ampliamente reconocida a nivel internacional como una guía para el análisis de hidrocarburos mediante cromatografía de gases. Cumplir con esta normativa asegura la calidad y consistencia de los resultados obtenidos en el análisis de muestras de hidrocarburos.

#### **3.10.7.1. Proceso de cromatografía**

La cromatografía de gases es una técnica analítica utilizada para separar y analizar compuestos volátiles en una muestra, a continuación, se describe de manera general cómo se lleva a cabo este proceso. (Gani,2018, págs. 198-200).

- ***Preparación de la Muestra***

La muestra para analizar debe ser volátil o convertida en una forma volátil mediante técnicas como la derivatización, se introduce una pequeña cantidad de muestra en el sistema de inyección.

- ***Inyección en el Cromatógrafo de Gases***

La muestra se inyecta en el sistema de cromatografía de gases, generalmente en forma de vapor, gas o líquido volátil, el inyector convierte la muestra en una corriente gaseosa que se introduce en la columna cromatográfica. (Londoño,2019, pág. 60)

- ***Columna Cromatográfica***

La columna cromatográfica es un tubo largo y delgado que posee rellenos con materiales estacionarios, la muestra se desplaza a través de toda la columna, y los componentes se separan en función de sus interacciones con la fase móvil y su estado estacionario.

- ***Detector***

Luego de que el proceso se realice en la columna, los componentes empiezan a salir, pasan por un detector que registra la cantidad y el tiempo de llegada de cada uno, los detectores comunes incluyen el detector de ionización de llama (FID), el detector de captura de electrones (ECD), y el detector de espectrometría de masas (MS), los cuales ayudan a identificar cantidades exactas

- ***Registro de Datos***

La señal del detector se registra y se convierte en un cromatograma, que es una representación gráfica de la separación de los componentes a lo largo del tiempo, en donde se puede observar la variación y desviación estándar de los datos obtenidos.

- ***Identificación y Cuantificación***

Los picos en el cromatograma representan los diferentes componentes de la muestra, su identificación se realiza comparando los tiempos de retención y patrones de picos con estándares conocidos que se pueden apreciar en el cromatograma, la cuantificación se realiza midiendo la altura o área de los picos. (Peña y Castillo, 2015, págs. 29-42).

### **3.11. Análisis FTIR (espectroscopía de infrarrojo por transformada de fourier)**

Es una técnica espectroscópica utilizada para estudiar las interacciones moleculares en una muestra a través de la absorción de la radiación infrarroja. Esta técnica proporciona información valiosa sobre la composición química y las estructuras moleculares de los compuestos presentes en una muestra, tiene parámetros como se observa en el **ANEXO E**.

El principio básico de la espectroscopía FTIR implica la irradiación de una muestra con radiación infrarroja y la medición de la cantidad de luz absorbida en función de la longitud de onda. La muestra absorbe la energía en frecuencias específicas correspondientes a las vibraciones moleculares. Cada tipo de enlace químico (como los enlaces C-H, O-H, N-H) y funcionalidades químicas (como los grupos funcionales de alcoholes, ésteres, aminas, etc.) tiene su propia firma espectral en el rango infrarrojo. La transformada de Fourier es una técnica específica en matemática que convierte una señal de interferencia obtenida de la radiación infrarroja absorbida en un espectro. (Peña y Castillo, 2015, págs. 29-42).

### ***3.11.1. Preparación de la muestra***

La muestra debe prepararse de manera que sea compatible con la técnica FTIR, pueden presentarse en los tres estados de la materia, es especial en estado sólido.

Para muestras sólidas, se puede realizar un análisis directo de la muestra o preparar una pastilla o película delgada con un agente de matriz compatible, las muestras líquidas pueden analizarse directamente o puede utilizarse celdas para facilitar el procedimiento.

### ***3.11.2. Configuración del espectrómetro***

Se coloca la muestra en el compartimento adecuado del espectrómetro FTIR y se ajustan las condiciones experimentales, como la resolución, el rango de frecuencia y el número de escaneos.

### ***3.11.3. Obtención del espectro***

Se realiza la adquisición del espectro mediante la irradiación de la muestra con radiación infrarroja a través de un rango específico de frecuencias, se utiliza un interferómetro para obtener la interferencia de la radiación transmitida a través de la muestra.

### ***3.11.4. Transformada de Fourier***

La señal de interferometría que es emitida por el equipo se somete a una transformada de Fourier, que convierte la información temporal en un espectro de frecuencias, en donde se pueden observar picos, y bandas que ayudan a identificar que compuestos se encuentran presentes en el espectro.

### ***3.11.5. Interpretación del espectro***

El espectro resultante muestra picos de absorción en función de la frecuencia. Cada pico está asociado con vibraciones moleculares específicas, luego se identifican los picos característicos correspondientes a los enlaces químicos y grupos funcionales presentes en la muestra.

### ***3.11.6. Análisis de Datos***

Se realizan comparaciones con bibliotecas de espectros para identificar componentes específicos, se cuantifican las concentraciones de los compuestos presentes, en caso de ser necesario.

### **3.12. Análisis estadísticos**

El análisis estadístico desempeña un papel fundamental en la interpretación y comprensión de datos en una variedad de grupos de procedimientos. En una investigación científica, proporciona herramientas esenciales para validar o rechazar hipótesis, además permite determinar patrones en experimentos y determinar la significancia de los resultados observados, el análisis estadístico ayuda a optimizar la toma de decisiones al proporcionar una comprensión objetiva de datos complejos, ya sea en el control de calidad de productos, en la planificación estratégica basada en tendencias pasadas, o en la evaluación de la eficacia de intervenciones médicas, el análisis estadístico permite extraer conclusiones significativas a partir de conjuntos de datos, y se representa por medio de gráficas para realizar comparaciones.

Otra aspecto del análisis estadístico destaca por la habilidad para analizar estudios de muestras a poblaciones más extensas, se pueden utilizar técnicas como la inferencia estadística, los investigadores pueden plantear afirmaciones con respecto a una población en su totalidad o también de forma particular. Este enfoque es esencial tanto en la investigación científica como en la toma de decisiones empresariales, al ofrecer una forma efectiva de estimar parámetros y comprender fenómenos que trascienden los datos observados directamente.

#### **3.12.1. Análisis ANOVA**

El ANOVA, o también conocido como análisis estadístico de varianza, es un método que sirve para evaluar el nivel de significancia entre las medias de uno o más grupos que pueden ser independientes, permite determinar si de acuerdo a la hipótesis se puede descomponer la variabilidad total en los datos en dos componentes clave, la variabilidad entre los grupos y la variabilidad que puede existir internamente, al comparar estas fuentes de variación, se obtiene una medida de la significancia estadística de las diferencias observadas, para identificar validez de resultados, el análisis de varianza es muy utilizado en experimentos científicos y proyectos de investigación tecnológica, hasta investigaciones de mercado, ya que permite demostrar e interpretar los resultados en estudios que involucran múltiples grupos, lo cual facilita la comprobación de suposiciones, que pueden influir en los resultados de una investigación.

### ***3.12.2. Prueba de Levene***

La prueba de Levene constituye una herramienta estadística empleada para evaluar la uniformidad de las varianzas en dos o más grupos dentro de un conjunto de datos, se llama así en honor al estadístico Howard Levene, esta prueba se utiliza acompañada de un análisis de varianza, uno de los objetivos que cumple es determinar si las dispersiones de los datos muestran homogeneidad entre los grupos en cuestión, para la interpretación precisa de ciertas pruebas estadísticas también evalúa la comparación las varianzas muestrales entre los distintos grupos, basándose en la hipótesis nula de que las varianzas son iguales en todos los grupos cuando se tiene un valor p asociado con la prueba sea inferior a un nivel de significancia predefinido, se tiene la opción de rechazar la hipótesis nula, señalando la existencia de diferencias significativas en las varianzas entre los grupos, el desarrollo de esta prueba, permite garantizar la validez de los resultados en análisis estadísticos que asumen homogeneidad de varianza, a su vez sirve en la comprobación de datos. (Gani, 2018, págs. 198-200).

## CAPÍTULO IV

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

El propósito de esta sección es presentar los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, es importante señalar que el tipo de gas obtenido del proceso de gasificación de briquetas está condicionado por factores, como temperatura, diseño de equipo, propiedades químicas y físicas de la biomasa, y el agente gasificante que en este caso es el aire

#### 4.1. Resultados de Análisis proximales y físico químicos

Se llevaron a cabo las mediciones de la composición elemental de la biomasa de cáscara de papa y tusa de maíz en el laboratorio de análisis de la Facultad de Ciencias.

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

BIOMASA	Residuos Agroindustriales	
	Cáscara de papa(g)	Tusa de maíz(g)
<b>B1</b>	1,40	0,60
<b>B2</b>	1,0	1,0
<b>B3</b>	0,60	1,40

Realizado por: González M., 2024.

En donde:

**B1** → Primera muestra de biomasa

**B2** → Segunda muestra de biomasa

**B3** → Tercera muestra de biomasa

**Tabla 4-2:** Resultados de composición de C H O N S

Muestra	Método	Resultados				Unidad
		Carbono	Nitrógeno	Azufre	Humedad	
Cáscara de papa	Oxidación completa por combustión	40,535	1,314	-	7,726	%
Tusa de Maíz		44,839	0,954	-	10,727	%

Realizado por: González M., 2024.

La Tabla 4-2 proporciona los porcentajes de la composición elemental de los dos tipos de biomasa. Los valores resultantes de las técnicas explicadas en el capítulo anterior revelan que la tusa de maíz presenta una mayor proporción de carbono en comparación con la cáscara de papa, lo que la convierte en el residuo más adecuado para llevar a cabo una combustión completa, es importante señalar que la tusa de maíz también exhibe un contenido de humedad superior al de la cáscara de papa. Este aspecto es relevante ya que, el contenido de humedad no debería superar el 10% para garantizar un proceso eficiente de gasificación, caso contrario, la gasificación no sería completamente eficaz, dando como resultado un gas de baja calidad y dificultando la combustión de las briquetas.

#### 4.2. Valoración energética de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz

Se registró datos de temperatura cada minuto durante aproximadamente 1 h con 15 min al introducir el carbón en el gasificador, el propósito era determinar con precisión el momento en que se generaba gas y la duración de la llama.

**Tabla 4-3:** Datos de la Gasificación de briquetas

Temperatura	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
$t_0$	0	88
$t_1$	1	108,4
$t_2$	2	112,9
$t_3$	3	136,9
$t_4$	4	147,9
$t_5$	5	150,5
$t_6$	6	152,0
$t_7$	7	160,3
$t_8$	8	165,3
$t_9$	9	189,3
$t_{10}$	10	192,4
$t_{11}$	11	202,6
$t_{12}$	12	215,3
$t_{13}$	13	226,7
$t_{14}$	14	230,4
$t_{15}$	15	234,2
$t_{16}$	16	249,8

$t_{17}$	17	252,0
$t_{18}$	18	257,2
$t_{19}$	19	271,4
$t_{20}$	20	265,9
$t_{21}$	21	269,6
$t_{22}$	22	273,9
$t_{23}$	23	287,9
$t_{24}$	24	315,6
$t_{25}$	25	340,1
$t_{26}$	26	355,1
$t_{27}$	27	257,1
$t_{28}$	28	362,0
$t_{29}$	29	379,4
$t_{30}$	30	383,5
$t_{31}$	31	395,1
$t_{32}$	32	402,7
$t_{33}$	33	422,5
$t_{34}$	34	435,2
$t_{35}$	35	369,4
$t_{36}$	36	351,5
$t_{37}$	37	320,9
$t_{38}$	38	295,4
$t_{39}$	39	250,8
$t_{40}$	40	244,7
$t_{41}$	41	175,8
$t_{42}$	42	180,4
$t_{43}$	43	168,3
$t_{44}$	44	199,3
$t_{45}$	45	205,7
$t_{46}$	46	220,9
$t_{47}$	47	269,1
$t_{48}$	48	283,0
$t_{49}$	49	299,4
$t_{50}$	50	308,7

$t_{51}$	51	329,4
$t_{52}$	52	353,8
$t_{53}$	53	371,0
$t_{54}$	54	388,3
$t_{55}$	55	395,1
$t_{56}$	56	399,0
$t_{57}$	57	406,7
$t_{58}$	58	463,5
$t_{59}$	59	489,8
$t_{60}$	60	501,6
$t_{61}$	61	528,7
$t_{62}$	62	581,10
$t_{63}$	63	658,4
$t_{64}$	64	695,4
$t_{65}$	65	704,7
$t_{66}$	66	722,3
$t_{67}$	67	722,6
$t_{68}$	68	733,4
$t_{69}$	69	742,8
$t_{70}$	70	753,5
$t_{71}$	71	749,1

Realizado por: González M., 2024.

Anteriormente se obtuvieron los resultados del análisis elemental que detalla la composición química de la biomasa en estado seco, como se indicó previamente, se realizará la conversión de los valores porcentuales de la composición química de la biomasa de la Tabla 4-2, a fracciones gravimétricas.

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

- **Cáscara de papa**

$$G_{xc} = \frac{40,535}{100} = 0,40535 \text{ kg}$$

$$G_{xN} = \frac{1,314}{100} = 0,01314 \text{ kg}$$

Después de determinar las fracciones gravimétricas, se emplea la ecuación (3) para calcular la masa de aire estequiométrico o teórico.

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

$$m_{at} = (0,1153 \times 0,40535) + 0,3434 \left( 0 - \frac{0}{8} \right) + (0,0434 \times 0)$$

$$m_{at} = 0,0467 \text{ kg/kg}$$

Con el coeficiente de exceso de aire (EA) establecido en 1,5 para combustibles sólidos y la masa de aire teórica o estequiométrica, se calcula la masa de aire real mediante la ecuación siguiente.

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

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

$$m_{ar} = 1,5 \times m_{at}$$

$$m_{ar} = 1,5 \times 0,0467$$

$$m_{ar} = 0,070 \text{ kg/kg}$$

Para establecer una relación entre la ratio de equivalencia (ER) y el coeficiente de aire en exceso (EA), se describe en la ecuación (7).

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

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

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

$$ER(< 1, 0)_{gasificación} = \frac{0,070}{0,0467} = EA(> 1,0)_{combustión}$$

$$ER(< 1, 0)_{gasificación} = 1,49 = EA(> 1,0)_{combustión}$$

Una vez establecida la relación del índice de equivalencia (ER) en el rango de valores de 0.2 a 0.25, considerados apropiados para una gasificación de tipo Downdraft, y teniendo la masa de aire estequiométrica, se procede a calcular la cantidad de aire requerida para llevar a cabo el proceso de gasificación utilizando la ecuación correspondiente.

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

$$m_{ag} = 0,0467 \times 0,2$$

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

- **Tusa de maíz**

Igualmente, se toman los datos del análisis elemental de la Tabla 4-2, con el fin de calcular sus fracciones gravimétricas utilizando la ecuación (4), se obtiene el valor de la masa de aire estequiométrico.

$$G_{xc} = \frac{44,839}{100} = 0,44839 \text{ kg}$$

$$G_{xN} = \frac{0,954}{100} = 0,00954 \text{ kg}$$

Después de determinar las fracciones gravimétricas, se emplea la ecuación (3) para calcular la masa de aire estequiométrico o teórico.

$$m_{at} = (0,1153 \times 0,44839) + 0,3434 \left(0 - \frac{0}{8}\right) + (0,0434 \times 0)$$

$$m_{at} = 0,0516 \text{ kg/kg}$$

Se emplea un factor de equivalencia de aire (ER) de 1,5 para combustibles sólidos, tal como se encuentra en la Tabla 3-13. Luego, se realiza el cálculo del aire real utilizado en la combustión completa mediante la aplicación de la ecuación correspondiente.

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

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

$$m_{ar} = 1,5 \times 0,0516$$

$$m_{ar} = 0,0774 \text{ kg/kg}$$

Para evaluar la eficiencia del gas, se establece una relación entre la masa real de aire y la masa teórica de aire mediante el uso de la ecuación (7). Esto permite cuantificar la eficacia del proceso al contrastar la cantidad real de aire empleada con la cantidad de aire que teóricamente sería necesaria.

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

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

$$ER(< 1, 0)_{\text{gasificación}} = \frac{0,0774}{0,0516} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

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

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

Respecto a la cantidad de aire requerida para llevar a cabo la gasificación, se consideran los valores de 0,2 a 0,25 para el índice de equivalencia (ER) con el objetivo de optimizar el rendimiento, se opta por utilizar un valor específico, en este caso, 0,2.

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

$$m_{ag} = 0,0516 \times 0,2$$

$$m_{ag} = 0,0103 \text{ kg/kg}$$

- Cantidad de aire estequiométrico que se utiliza para la mezcla de las dos biomásas (briqueta de cáscara de papa y tusa de maíz)

$$m_{at} = \frac{0,0467 + 0,0516}{2}$$

$$m_{at} = 0,0491 \text{ kg/kg}$$

- Cantidad de aire real que se utiliza para la mezcla de las dos biomásas (briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz)

$$m_{ar} = \frac{0,070 + 0,0774}{2}$$

$$m_{ar} = 0,0737 \text{ kg/kg}$$

- Cantidad de aire real que se utiliza para realizar la gasificación de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz

$$m_{ag} = \frac{0,0093 + 0,0103}{2}$$

$$m_{ag} = 0,0098 \text{ kg/kg}$$

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

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

$$\lambda = \frac{1,49 + 1,5}{2}$$

$$\lambda = 1,495$$

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

Parámetros	Cáscara de papa	Tusa de maíz	Briquetas	Unidades
$m_{at}$	0,0467	0,0516	0,0491	kg/kg
$m_{ar}$	0,070	0,0774	0,0737	kg/kg
$m_{ag}$	0,0093	0,0103	0,0098	kg/kg
Coeficiente de aire en exceso	1,49	1,5	1,495	

Realizado por: González M., 2024.

En la Tabla 4-4, se detallan los resultados obtenidos durante el proceso de gasificación. En esta investigación, que se centró en la utilización de una combinación de biomásas, transformadas a briquetas, se llevaron a cabo análisis individuales de los parámetros para luego determinar la aproximación de la mezcla, se destaca que el coeficiente de exceso de aire en la gasificación de las briquetas tiene un valor mayor a 1, lo que indica la obtención de una mezcla de gas con un poder calorífico no tan reducido. Esta relación ilustra la proporción entre la cantidad real de aire presente y la necesaria para lograr una combustión precisa. Un valor de  $\lambda$  inferior a 1 indica una combustión con déficit de aire, mientras que un valor superior a 1 sugiere una combustión con exceso.

#### 4.2.1. Resultados del poder calorífico inferior y superior del gas de síntesis

En la Tabla, se presentan los datos del poder calorífico superior (HLV) y del poder calorífico inferior (LHV), se observa una ligera variación, se puede concluir que el HLV es superior al LHV.

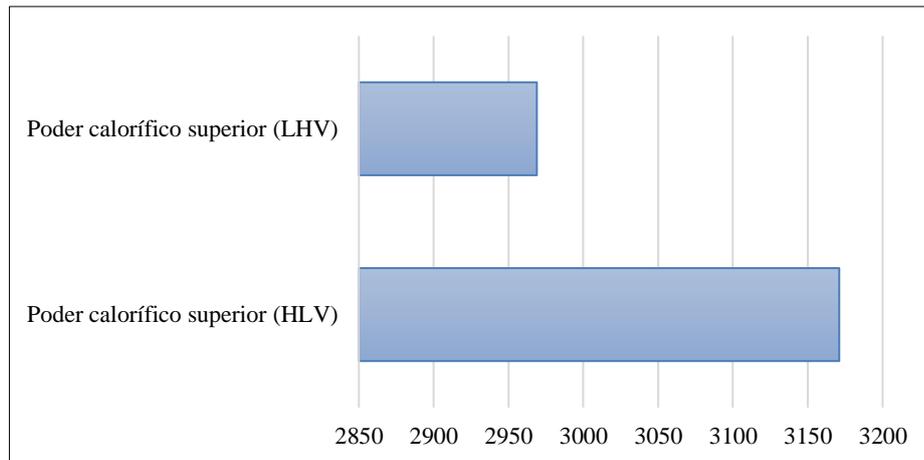
**Tabla 5:** Resultados del poder calorífico superior e inferior del gas de síntesis

PODER CALORÍFICO DEL GAS DE SINTESIS			
Biomasa	Poder calorífico superior (HLV)	Poder calorífico inferior (LHV)	Unidad
Briqueta de tusa de maíz y cáscara de papa	3171,01	2968,94	$kJ/m^3$

Realizado por: González M., 2024.

Según (Ahumada et al. 2016), factores como la velocidad del aire y la cantidad de biomasa influyen en el resultado del poder calorífico del gas de síntesis obtenido a través de la gasificación de

biomasa, esta variabilidad se sitúa en un rango de 250 a 4940 kJ/m<sup>3</sup>, sin considerar el tipo específico de biomasa empleado. La presencia de humedad en la biomasa también se asocia con esta variación, la composición elemental de la biomasa, es decir, la cantidad de carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), guarda una relación directa con el poder calorífico inferior, este último parámetro está directamente vinculado con la cantidad de energía liberada al quemar las briquetas. En el caso del gas de síntesis generado, caracterizado por una concentración apreciable de monóxido de carbono e hidrógeno, se espera que su poder calorífico sea superior.



**Ilustración 4-1:** Resultado del poder calorífico del gas de síntesis

Realizado por: González M., 2024.

### 4.3. Cálculo del balance de masa para las briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz

Con base en la información recopilada durante el proceso de gasificación, se lleva a cabo un balance de masa para determinar los flujos másicos tanto en la entrada al reactor como en la salida. Es importante destacar que se llevaron a cabo tres pruebas de gasificación. A continuación, se realiza el balance, con los datos detallados en el capítulo III.

#### 4.3.1. Resultados del balance de masa de la primera gasificación

Se realiza un balance de masa con la siguiente ecuación:

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

El flujo de agua es un valor que se simplifica, porque en teoría es correcto decir que la cantidad de agua que entra va a ser la misma que se obtiene al final, en la primera gasificación se utilizaron

10 litros, y se recogieron los mismos al terminar la gasificación, así que es un término que no va a influir en el desarrollo del balance.

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

$$\dot{m}_{biomasa} = \text{Flujo másico de cáscara de papa y tusa de maíz}$$

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

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

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

Se utilizó un anemómetro en el proceso de gasificación para obtener los siguientes datos:

- Velocidad del aire en la entrada del gasificador = 14,5 m/s
- Velocidad del aire en la salida de la manguera del gasificador = 11,2 m/s
- Velocidad del aire total que ingresa en el equipo = 3,3 m/s

Se calculó el caudal del aire que ingresa a la cámara de combustión para realizar la gasificación, aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = V \times S$$

En donde:

$V \rightarrow$  velocidad del paso de fluido, a través de una sección  $S$

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

$$Q = 3,3 \text{ m/s} \times \pi \times (2,78\text{m})^2$$

$$Q = 80,12 \text{ m}^3/\text{h}$$

Determinamos el flujo másico del aire para la gasificación, en la cual se considera la multiplicación de la densidad del aire por el caudal del aire.

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

$$\dot{m}_{aire} = 0,86 \text{ kg/m}^3 \times 80,12 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{aire} = 68,903 \text{ kg/h}$$

**Salidas:**

$\dot{m}_{alquitrán} \rightarrow$  Flujo másico del alquitrán

$$\dot{m}_{alquitrán} = \frac{1,15 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{alquitrán} = 1,15 \text{ kg/h}$$

$\dot{m}_{alquitrán} \rightarrow$  Flujo másico de cenizas

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{0,42 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = 0,42 \text{ kg/h}$$

$\dot{m}_{gas} \rightarrow$  Flujo másico del gas de salida

- El gas de salida se puede calcular por medio de la siguiente ecuación

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

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

$$\dot{m}_{gas} = (3 + 68,903 - 1,15 - 0,42) \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{gas} = 70,333 \text{ kg/h}$$

**Tabla 4-6:** Resultados del balance de masa de la primera gasificación

<b>ENTRADAS DEL BALANCE DE MASA</b>	
Variables	Cantidad (kg/h)
Flujo másico de biomasa	3
Flujo másico de aire	68,903
<b>TOTAL</b>	<b>71,903</b>
<b>SALIDAS DEL BALANCE DE MASA</b>	
Flujo másico del alquitrán	1,15
Flujo másico de cenizas	0,42
Flujo másico del gas	70,333
<b>TOTAL</b>	<b>71,903</b>

Realizado por: González M., 2024.

Los valores detallados en la tabla representan todas las corrientes de entrada y salida en el balance de masa durante la primera gasificación, es evidente que no se produce pérdida ni ganancia de materia en el sistema, lo que confirma la adherencia al principio de conservación de masa, lo que quiere decir que la cantidad total de masa en el sistema permanece constante a lo largo del proceso.

#### 4.3.2. Resultados del balance de masa de la segunda gasificación

Se realiza un balance de masa con la siguiente ecuación:

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

El flujo de agua es un valor que se simplifica, porque en teoría es correcto decir que la cantidad de agua que entra va a ser la misma que se obtiene al final, en la segunda gasificación se utilizaron 10 litros, y se recogieron los mismos al terminar la gasificación.

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

$$\dot{m}_{biomasa} = \text{Flujo másico de cáscara de papa y tusa de maíz}$$

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

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

Se utilizó un anemómetro en el proceso de gasificación para obtener los siguientes datos:

- Velocidad del aire en la entrada del gasificador = 14,5 m/s
- Velocidad del aire en la salida de la manguera del gasificador = 11,2 m/s
- Velocidad del aire total que ingresa en el equipo = 3,3 m/s

Se calculó el caudal del aire que ingresa a la cámara de combustión para realizar la gasificación, aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = V \times S$$

En donde:

$V \rightarrow$  velocidad del paso de fluido, a través de una sección  $S$

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

$$Q = 3,3 \text{ m/s} \times \pi \times (2,78\text{m})^2$$

$$Q = 80,12 \text{ m}^3/\text{h}$$

Determinamos el flujo másico del aire para la gasificación, en la cual se considera la multiplicación de la densidad del aire por el caudal del aire.

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

$$\dot{m}_{aire} = 0,86 \text{ kg/m}^3 \times 80,12\text{kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{aire} = 68,903 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

**Salidas:**

$\dot{m}_{alquitrán} \rightarrow$  Flujo másico del alquitrán

$$\dot{m}_{alquitrán} = \frac{1,2 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{alquitrán} = 1,2 \text{ kg/h}$$

$\dot{m}_{alquitrán} \rightarrow$  Flujo másico de cenizas

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{0,65 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = 0,65 \text{ kg/h}$$

$\dot{m}_{gas} \rightarrow$  Flujo másico del gas de salida

- El gas de salida se puede calcular por medio de la siguiente ecuación.

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

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

$$\dot{m}_{gas} = (4 + 68,903 - 1,2 - 0,65) \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{gas} = 71,053 \text{ kg/h}$$

**Tabla 4-7:** Resultados del balance de masa de la segunda gasificación

<b>ENTRADAS DEL BALANCE DE MASA</b>	
Variables	Cantidad (kg/h)
Flujo másico de biomasa	4
Flujo másico de aire	68,903
<b>TOTAL</b>	<b>72,903</b>
<b>SALIDAS DEL BALANCE DE MASA</b>	
Flujo másico del alquitrán	1,2
Flujo másico de cenizas	0,65
Flujo másico del gas	71,053
<b>TOTAL</b>	<b>72,903</b>

Realizado por: González M., 2024.

Los valores detallados en la tabla representan todas las corrientes de entrada y salida en el balance de masa durante la segunda gasificación, es evidente que no se produce pérdida ni ganancia de materia en el sistema, quiere decir que la cantidad total de masa en el sistema permanece constante a lo largo del proceso.

#### 4.3.3. Resultados del balance de masa de la tercera gasificación

Se realiza un balance de masa con la siguiente ecuación:

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

El flujo de agua es un valor que se simplifica, porque en teoría es correcto decir que la cantidad de agua que entra va a ser la misma que se obtiene al final, para la extracción del gas de síntesis se utilizaron 12 litros, y se recogieron los mismos al terminar la gasificación, así que es un término que no va a influir en el desarrollo del balance.

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

**Entradas:**

$\dot{m}_{biomasa} = \text{Flujo másico de cáscara de papa y tusa de maíz}$

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

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

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

Se utilizó un anemómetro en el proceso de gasificación para obtener los siguientes datos:

- Velocidad del aire en la entrada del gasificador = 14,5 m/s
- Velocidad del aire en la salida de la manguera del gasificador = 11,2 m/s
- Velocidad del aire total que ingresa en el equipo = 3,3 m/s

Se calculó el caudal del aire que ingresa a la cámara de combustión para realizar la gasificación, aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = V \times S$$

En donde:

$V \rightarrow \text{velocidad del paso de fluido, a través de una sección } S$

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

$$Q = 3,3 \text{ m/s} \times \pi \times (2,78\text{m})^2$$

$$Q = 80,12 \text{ m}^3/h$$

Determinamos el flujo másico del aire para la gasificación utilizando la ecuación (), en la cual se considera la multiplicación de la densidad del aire por el caudal del aire.

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

$$\dot{m}_{aire} = 0,86 \text{ kg/m}^3 \times 80,12\text{kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{aire} = 68,903 \text{ kg/h}$$

**Salidas:**

$\dot{m}_{alquitran}$  → *Flujo másico del alquitran*

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

$$\dot{m}_{alquitran} = 1,5 \text{ kg/h}$$

$\dot{m}_{alquitran}$  → *Flujo másico de cenizas*

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{0,70 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = 0,70 \text{ kg/h}$$

$\dot{m}_{gas}$  → *Flujo másico del gas de salida*

- El gas de salida se puede calcular por medio de la siguiente ecuación.

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

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

$$\dot{m}_{gas} = (5 + 68,903 - 1,5 - 0,70) \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{gas} = 71,703 \text{ kg/h}$$

**Tabla 4-8:** Resultados del balance de masa de la tercera gasificación

<b>ENTRADAS DEL BALANCE DE MASA</b>	
Variables	Cantidad (kg/h)
Flujo másico de biomasa	5
Flujo másico de aire	68,903
<b>TOTAL</b>	<b>73,903</b>
<b>SALIDAS DEL BALANCE DE MASA</b>	
Flujo másico del alquitrán	1,5
Flujo másico de cenizas	0,70
Flujo másico del gas	71,703
<b>TOTAL</b>	<b>73,903</b>

Realizado por: González M., 2024.

En la tabla 4-6, se pueden observar todas las corrientes de entrada y salida en el balance de masa de la primera gasificación, se puede evidenciar la ausencia de pérdida o ganancia de materia en el sistema, lo que confirma la observancia del principio de conservación de masa.

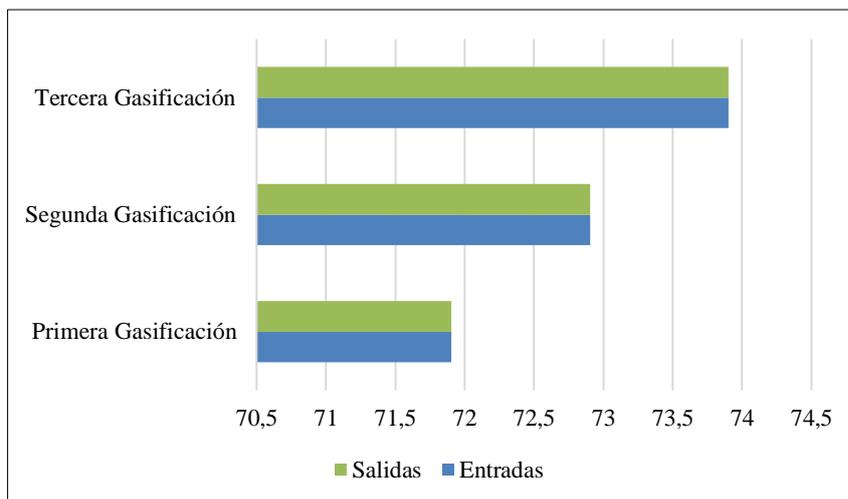
**Tabla 4-9:** Resultados finales de los balances de masa de cada gasificación

<b>CONDICIONES</b>	<b>Primera Gasificación</b>	<b>Segunda Gasificación</b>	<b>Tercera Gasificación</b>
<b>Entradas</b>	71,903 kg/h	72,903 kg/h	73,903 kg/h
<b>Salidas</b>	71,903 kg/h	72,903 kg/h	73,903 kg/h

Realizado por: González M., 2024.

El proceso de gasificación se llevó a cabo introduciendo carbón y posteriormente briquetas por la parte superior del gasificador, luego se encendió el equipo y se suministró una corriente de aire, se logró medir el flujo másico de gas, el residuo líquido y sólido respectivamente. Para evaluar experimentalmente el flujo másico del combustible, es decir, de las briquetas, así como el de las cenizas y del alquitrán, se realizaron mediciones específicas durante cada proceso de gasificación.

El flujo másico del aire se determinó midiendo la velocidad del aire con un anemómetro y luego transformando este valor en flujo másico. En cuanto al flujo másico del gas, se aplicó la ecuación del balance de masa, para obtener el valor correspondiente del flujo másico del gas, a continuación, se detallan los valores obtenidos en los balances de masa.



**Ilustración 4-2:** Resultado del Balance de masa

Realizado por: González M., 2024.

**Tabla 4-10:** Resultados de la fracción sólida de las gasificaciones

FRACCIÓN SÓLIDA		
Gasificación	Variable ( $\dot{m}_{biomasa}$ )	Valor (kg/h)
Primera Gasificación	Flujo másico de biomasa	3
Segunda Gasificación	Flujo másico de biomasa	4
Tercera Gasificación	Flujo másico de biomasa	5

Realizado por: González M., 2024.

La Tabla 4-8, demuestra los datos relacionados con la fracción sólida, que representa el flujo másico de las briquetas, este término se refiere a la cantidad de biomasa que ingresa al gasificador por unidad de tiempo de masa, es esencial resaltar que este flujo desempeña un papel crucial en la eficiencia del proceso de gasificación. La magnitud y la constancia de este flujo son factores determinantes para el rendimiento efectivo de la gasificación.

**Tabla 4-11:** Resultados de la fracción gaseosa de las gasificaciones

<b>FRACCIÓN GASEOSA</b>		
<b>Gasificación</b>	<b>Variable (<math>m_{biomasa}</math>)</b>	<b>Valor (kg/h)</b>
Primera Gasificación	Flujo másico del gas	70,333
Segunda Gasificación	Flujo másico del gas	71,053
Tercera Gasificación	Flujo másico del gas	71,703

Realizado por: González M., 2024.

La Tabla 4-9, presenta información detallada sobre la fracción gaseosa, específicamente el flujo másico que indica la cantidad de gas de síntesis generada por unidad de tiempo es importante destacar que este flujo desempeña una función fundamental en la eficiencia global del proceso de gasificación.

#### **4.4. Resultado del análisis cromatográfico del gas de síntesis de las briquetas de cascara de papa y tusa de maíz**

El análisis cromatográfico se llevó a cabo siguiendo las pautas establecidas por la norma ASTM 1095 en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional. El informe de resultados correspondiente se encuentra adjunto en la sección de anexos. (ANEXO A)

**Tabla 4-12:** Parámetros valorados en el análisis cromatográfico

<b>Condiciones de Trabajo</b>	
<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Temperatura Ambiente	20,2 °C
Temperatura de la muestra	64,5 °F → 18,1 °C
% HR ambiente	23,5 %
Presión de la muestra	0,7 psi → 4895,3 Pa
Norma de referencia	ASTM D 1945: Cromatografía
Procedimiento interno	PE-7.2-01 PE-7.2-02

Realizado por: González M., 2024.

El análisis cromatográfico se llevó a cabo siguiendo las pautas establecidas por la norma ASTM 1095 en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional. El informe de resultados correspondiente se encuentra adjunto en la sección de anexos. (ANEXO A).

Mediante los parámetros detallados en la tabla 4-10, la temperatura es uno de los parámetros más importantes ya que influye en la volatilidad de los componentes presentes en la muestra, incluso puede afectar a la estabilidad y eficiencia de la columna cromatográfica, se puede considerar otro factor relevante a la humedad relativa, debido a que es crucial que la cantidad de vapor de agua en el aire esté en sintonía con la capacidad máxima que el aire puede retener a una temperatura específica, la temperatura de la muestra también puede tener un impacto en la segregación de los elementos y en la eficacia del procedimiento, aplicar una presión más elevada puede potenciar la velocidad de separación y la resolución de los elementos en la columna cromatográfica, dependiendo del tipo específico de cromatografía que se emplea.

Asimismo, al comparar la respuesta de la muestra con la norma de referencia que se utilizó, es posible determinar la cantidad o concentración de los componentes presentes en la muestra, el procedimiento interno se refiere a una serie de pasos y técnicas empleadas para supervisar y asegurar la calidad y precisión de los resultados, abarcando aspectos como el uso de estándares internos, la calibración del equipo, la verificación exactitud de datos, y una adecuada información del procedimiento, estos parámetros representan solo algunos de los diversos factores que pueden incidir en los resultados de un análisis de cromatografía de gases, asegurando la integridad y autenticidad de los resultados.

**Tabla 4-13:** Resultados de la Composición del gas de síntesis

<b>Composición del Gas de síntesis</b>			
	<b>COMPONENTE</b>	<b>% Moles</b>	<b>Desv. Std</b>
<b>COMPOSICIÓN</b>	Hidrógeno	5,26	0,141
	Oxígeno	7,52	0,349
	Nitrógeno	58,94	0,443
	Monóxido de Carbono	13,25	0,102
	Metano	1,72	0,066
	Dióxido de Carbono	12,16	0,0442
	Etano	0,11	0,002
	Agua	0,85	0,006

Realizado por: González M., 2024.

El gas de síntesis está constituido de una combinación variable de hidrógeno y monóxido de carbono, en muchas ocasiones, este gas incluye trazas de dióxido de carbono, metano y propano.

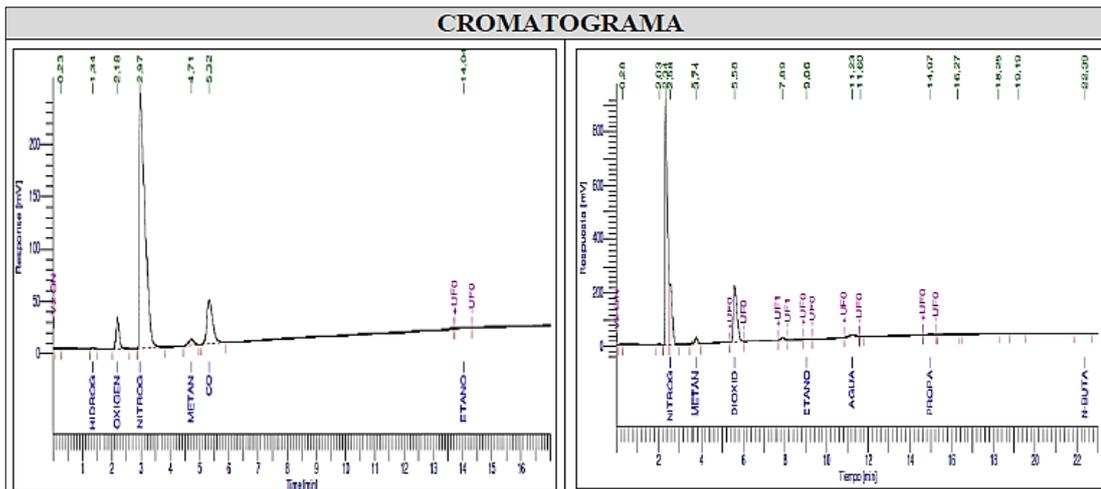
Según el análisis cromatográfico efectuado, se evidenció una predominancia de nitrógeno en un 58,94% molar, lo cual indica la presencia significativa de aire en la alimentación del gasificador. Esta observación indica que las briquetas utilizadas pueden no ser tan eficientes para la generación de gas, sin embargo, se registró la presencia de monóxido de carbono en un 13,25% molar, dado que el proceso de gasificación se lleva a cabo con biomasa, la presencia controlada de monóxido de carbono se puede considerar parte del diseño del sistema, además, se detectó un porcentaje de metano de 1,72%, un valor que se considera muy bajo, por lo mismo se considera que lo ideal sería no mezclar las biomásas.

**Tabla 4-14:** Resultados de las propiedades del gas de síntesis

<b>Propiedades del Gas de síntesis</b>			
	<b>COMPONENTE</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
<b>PROPIEDADES</b>	Densidad Relativa	1,00	
	Peso molecular promedio	28,72	(g/mol)
	Densidad de la muestra	1,21	(g/L)
	Poder calorífico superior	3171,01	(kJ/m <sup>3</sup> )
	Poder calorífico inferior	2968,94	(kJ/m <sup>3</sup> )
	Factor de compresibilidad	1,0000	(z)

Realizado por: González M., 2024.

La cromatografía es esencial en la caracterización y control de la calidad de un gas de síntesis, a su vez este procedimiento muestra el porcentaje molar de cada uno de los componentes que lo conforman, entre ellos ciertos hidrocarburos y otros elementos, este análisis se realizó 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 A**.



**Ilustración 4-3:** Cromatograma del gas de síntesis

**Realizado por:** González M., 2024.

En la representación visual, se pueden distinguir diferentes compuestos químicos presentes en la mezcla gaseosa generada a partir de la gasificación de briquetas, el propósito principal de la cromatografía de gases es cuantificar de una forma precisa los componentes del gas, para lograrlo, se lleva a cabo la separación de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, considerados volátiles y estables, en este contexto específico, se determinan las concentraciones de estos compuestos, ya sea en valores estándar o tasas específicas, mediante la aplicación de técnicas de cromatografía.

#### 4.4.1. Resultados de la composición elemental del gas de síntesis

La gasificación puede identificarse como un proceso termoquímico en donde el contenido de carbono que poseen las briquetas es expuesto a una serie de reacciones para transformarse en un gas de síntesis con poder calorífico no tan alto, los parámetros clave abordados incluyen la temperatura, el agente gasificante, dióxido de carbono, vapor de agua, y oxígeno

Durante el proceso de gasificación, las briquetas experimentan una transformación que resulta en la producción de gas de síntesis, mismo que, comprende componentes como hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, agua y algunos hidrocarburos como etano, este gas generado, tiene diversas aplicaciones, aprovechando la energía térmica generada en el proceso de gasificación, puede ser utilizado como materia prima o como agente intermedio para la obtención de diversos productos químicos.

El análisis cromatográfico desglosa los componentes que conforman el gas de síntesis, proporcionando resultados cuantitativos en términos de la concentración de cada componente, a continuación, se detallan los resultados.

**Tabla 4-15:** Resultados del análisis cromatográfico

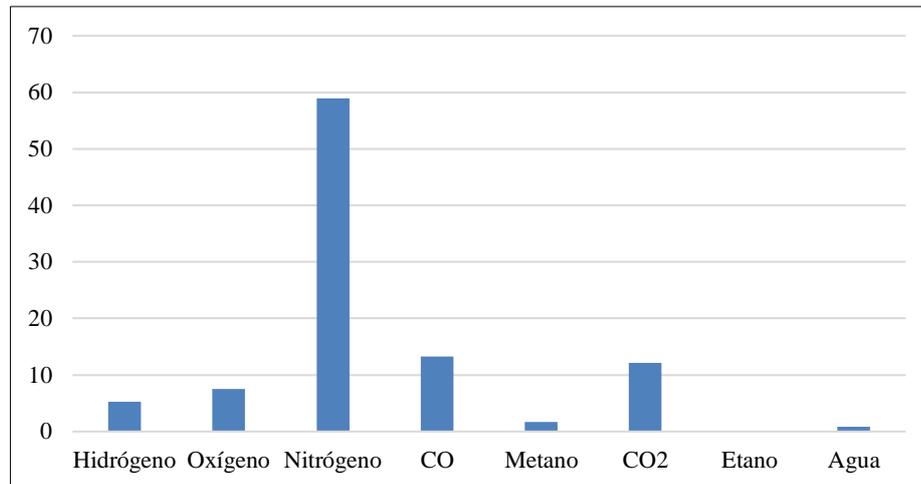
<b>COMPOSICIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS</b>			
	<b>COMPONENTE</b>	<b>% Moles</b>	<b>Desv. Std</b>
COMPOSICIÓN	Hidrógeno	5,26	0,141
	Oxígeno	7,52	0,349
	Nitrógeno	58,94	0,443
	Monóxido de Carbono	13,25	0,102
	Metano	1,72	0,066
	Dióxido de Carbono	12,16	0,0442
	Etano	0,11	0,002
	Agua	0,85	0,006
	<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>		
Temperatura (°C)	18,1	Norma de Referencia	ASTMD 1945: Cromatografía

Realizado por: González M., 2024.

La gasificación se realizó bajo las condiciones mencionadas en el capítulo III, las cuales pueden tener un impacto significativo en los resultados, pueden favorecer y perjudicar el proceso. Al observar la ilustración, se aprecian variaciones en los componentes, destacando una concentración de 5,26% de hidrógeno y 13,25% de monóxido de carbono. Estos dos elementos son especialmente significativos en la obtención de gas de síntesis, como indican (Forero, Guerrero y Sierra, 2012), dado que este gas está mayormente compuesto por H<sub>2</sub> y CO, lo que le confiere un alto poder calorífico, orientando su uso hacia sistemas de generación eléctrica o como intermediario en procesos de obtención de gas.

En la Ilustración, se evidencia que existe 12,16% de dióxido de carbono y 58,94% de nitrógeno son los componentes más representativos, esto indica que el flujo de aire de entrada al gasificador fue alto, el agente gasificante es el aire, compuesto principalmente por nitrógeno y oxígeno. En cuanto a la influencia de la temperatura, según la Tabla 4-14, se observa que a 249,8 °C ya se detectó la presencia de gas, aunque la llama era inicialmente baja debido al inicio de la quema de las briquetas, la llama persistió alrededor de 40 minutos, pero con el tiempo adquirió estabilidad,

alcanzando una producción de gas adecuada a 528,7 °C. A partir de esta temperatura, la producción de gas aumentó rápidamente y con mayor facilidad debido al calentamiento completo del equipo, la temperatura alcanzó su punto máximo a 749,10 °C, controlada mediante una termocupla, y se retiró cuando alcanzó el límite de la termocupla, tras retirarla y volver a colocarla, la temperatura descendió y se estabilizó, concluyendo así el procedimiento. A pesar de lograr una llama estable y duradera, la concentración de metano no fue significativamente alta, sugiriendo que las briquetas podrían no ser la opción más eficaz para este propósito.



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

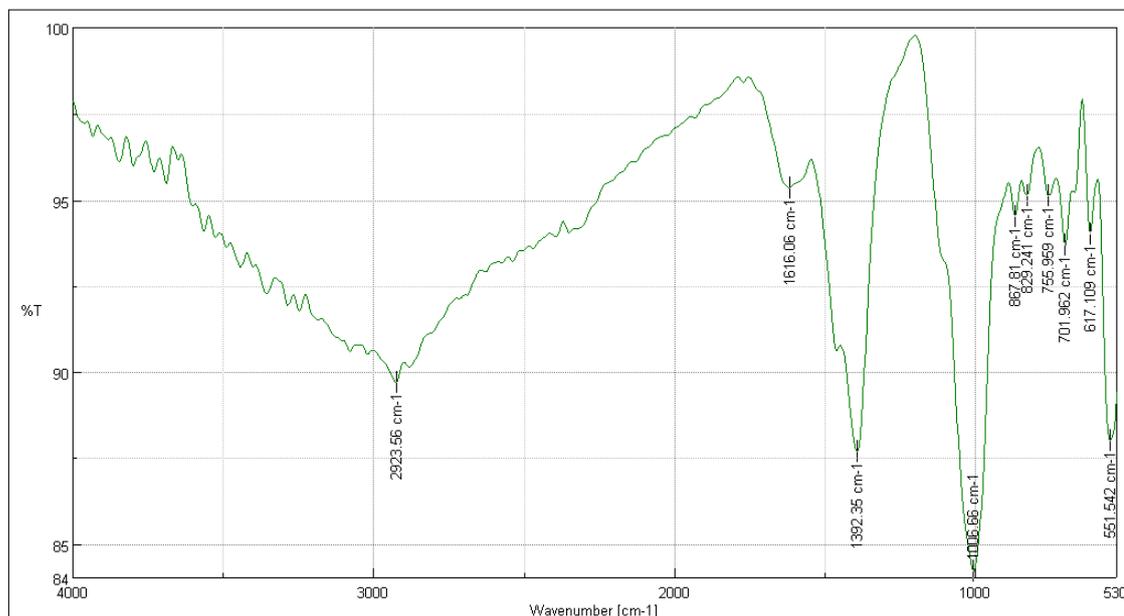
**Realizado por:** González M., 2024.

Al tratarse de un proceso de gasificación de una mezcla de biomásas transformadas a briquetas, se puede deducir que, si la materia prima no contiene los precursores necesarios para la formación de etano, es posible que este hidrocarburo no se genere en cantidades apreciables, en el caso del nitrógeno y su composición, esto indica que el gas contiene una cantidad alta de aire, cuando la biomasa se gasifica, el nitrógeno presente en el aire se incorpora al gas, con respecto al monóxido de carbono que no es una cantidad alta pero tampoco despreciable las condiciones específicas de temperatura, presión y relación aire/biomasa pueden influir en la proporción de CO generado durante la gasificación, un control adecuado de estas condiciones puede favorecer a su formación, además se aprecia que no hay una cantidad significativa de etano, lo que significa que puede existir un control eficaz del proceso para optimizar la producción de monóxido de carbono e hidrógeno.

## 4.5. Análisis FTIR

### 4.5.1. Resultados del análisis FTIR de las cenizas

Se realizó el análisis de espectroscopia infrarroja, en tres puntos de la muestra, mediante el método antes descrito se pudo obtener el resultado del espectro de las cenizas obtenidas de la gasificación de cáscara de papa y tusa de maíz, que se indica en la siguiente ilustración 4-5.



**Ilustración 4-5:** Primera espectroscopia infrarroja de las cenizas del proceso

**Realizado por:** González M., 2024.

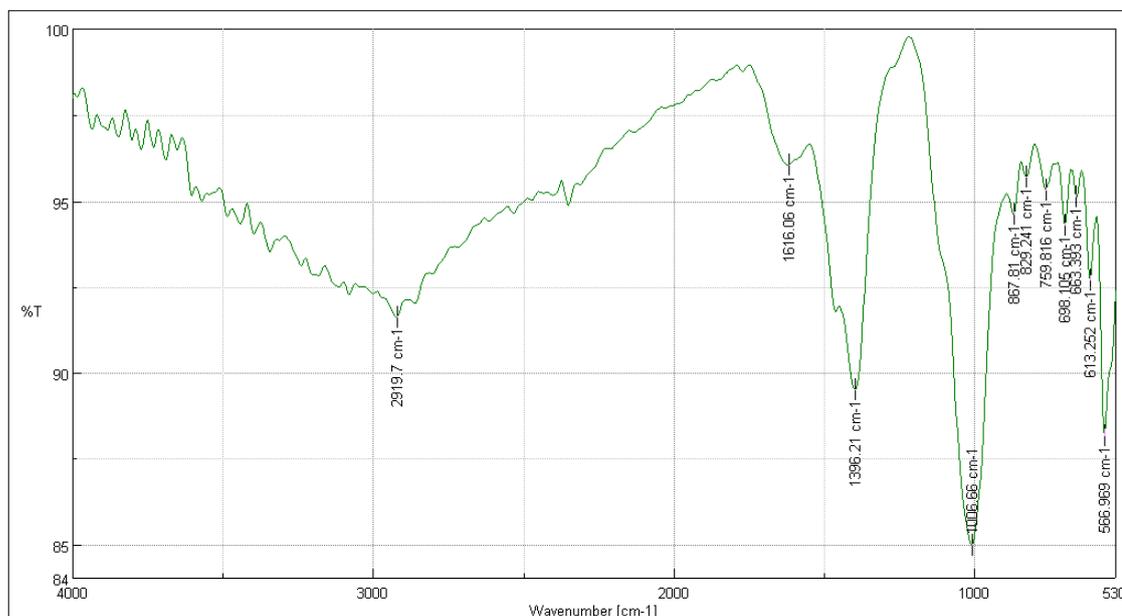
La presencia de bandas de absorción en la región 3000-2000  $\text{cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos C-H en los residuos de cenizas, esto puede ser debido a la presencia de aldehídos, cetonas o ácidos carboxílicos no quemados. La banda de absorción a 1616.06  $\text{cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos C=O. Esto puede ser debido a la presencia de ácidos carboxílicos, cetonas o amidas en las cenizas.

La banda de absorción a 1392.35  $\text{cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos C-O, debido a la presencia de alcoholes, fenoles o éteres en las cenizas. La banda de absorción a 1006.66  $\text{cm}^{-1}$  indica la presencia de silicatos en las cenizas, esto es de esperar, ya que la cáscara de papa y la tusa de maíz son ricas en sílice.

La banda de absorción a 867.81  $\text{cm}^{-1}$  indica la presencia de éteres o carbonatos en las cenizas y en la banda de absorción a 755.959  $\text{cm}^{-1}$  y 551.542  $\text{cm}^{-1}$  indican la presencia de silicatos en las

cenizas, una vibración de  $617.109\text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de aluminatos en las cenizas.

Los residuos de cenizas de la gasificación de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz contienen una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, los compuestos orgánicos incluyen aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, alcoholes, fenoles, éteres y carbonatos.



**Ilustración 4-6:** Segunda espectroscopia infrarroja de las cenizas del proceso de gasificación

**Realizado por:** González M., 2024.

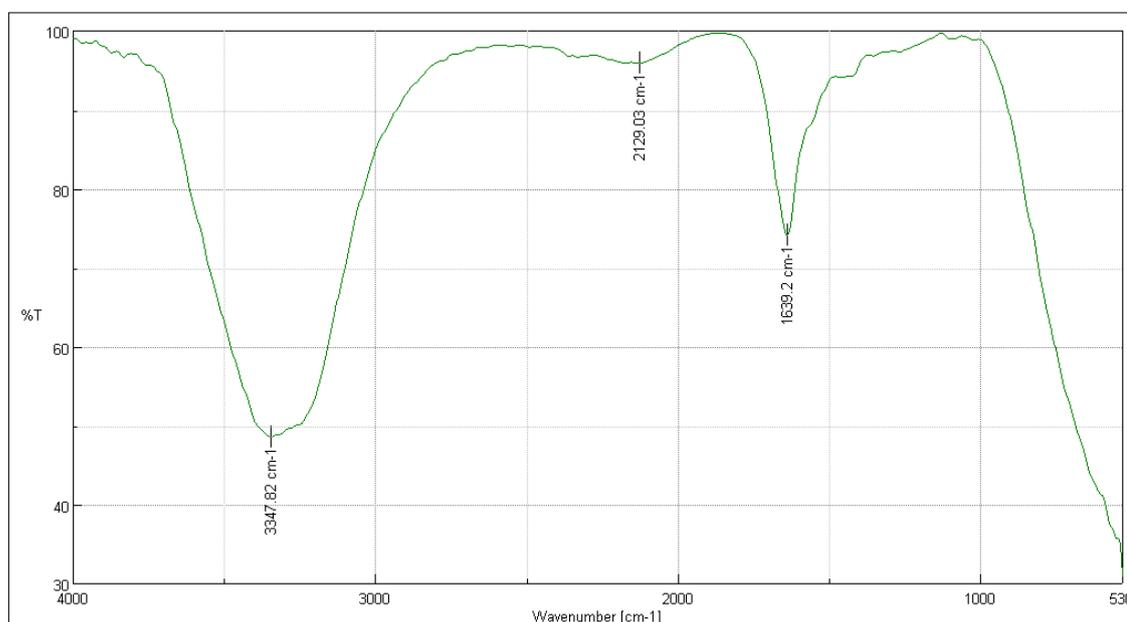
La ilustración 4-6 proporcionada muestra el espectro infrarrojo (IR) de los residuos de cenizas generados a partir de la gasificación de briquetas elaboradas con cáscara de papa y tusa de maíz, se tiene una región  $3000\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$ , presenta una banda ancha y asimétrica, característica de la presencia de aldehídos, la forma de la banda sugiere la presencia de aldehídos alifáticos como el formaldehído o el acetaldehído, presenta una segunda región  $1600\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ , en donde se observa una banda de absorción a  $1616.06\text{ cm}^{-1}$ , indicativa de la presencia de ácidos carboxílicos.

La intensidad de la banda indica una concentración considerable de estos compuestos en las cenizas, no se observa una banda en la región  $1600\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ , lo que descarta la presencia de dobles enlaces  $\text{C}=\text{C}$ . Región  $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ :

La banda presente a  $1006.66\text{ cm}^{-1}$  confirma la presencia de silicatos en las cenizas, un componente importante de la cáscara de papa y la tusa de maíz, finalmente se puede apreciar una región  $1000\text{-}600\text{ cm}^{-1}$ , en donde se observan bandas de absorción a  $867.81\text{ cm}^{-1}$ ,  $755.959\text{ cm}^{-1}$ ,  $617.109\text{ cm}^{-1}$  y  $551.542\text{ cm}^{-1}$ , estas bandas indican la presencia de éteres, carbonatos, silicatos y aluminatos, respectivamente.

#### 4.5.2. Resultados del análisis FTIR del alquitrán

**Espectroscopia infrarroja:** se pudo obtener la espectroscopia infrarroja del alquitrán obtenido de la gasificación de cáscara de papa y tusa de maíz, realizado en el laboratorio de análisis instrumental. (ANEXO C), el resultado se indica en la siguiente ilustración.



**Ilustración 4-7:** Tercera espectroscopia infrarroja de las cenizas del proceso de gasificación

**Realizado por:** González M., 2024.

El espectro infrarrojo (IR) de los residuos de alquitrán de la gasificación de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz presenta diversas bandas de absorción que permiten identificar la presencia de una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, se tiene una región de 3000-2000  $\text{cm}^{-1}$ , en donde se observa una banda ancha y asimétrica, característica de la presencia de aldehídos. La forma de la banda sugiere la presencia de aldehídos alifáticos como el formaldehído o el acetaldehído, también se observan bandas de absorción en esta región que pueden indicar la presencia de cetonas y ácidos carboxílicos, se observa una región 1600-1200  $\text{cm}^{-1}$ , destaca una banda de absorción a 1616.06  $\text{cm}^{-1}$ , indicativa de la presencia de ácidos carboxílicos. La banda presente a 1006.66  $\text{cm}^{-1}$  confirma la presencia de silicatos en el alquitrán, este es fundamental en la cáscara de papa y la tusa de maíz, en la región 1000-600  $\text{cm}^{-1}$ : Se observan bandas de absorción a 867.81  $\text{cm}^{-1}$ , 755.959  $\text{cm}^{-1}$ , 617.109  $\text{cm}^{-1}$  y 551.542  $\text{cm}^{-1}$ , estas bandas indican la presencia de éteres, carbonatos, silicatos y aluminatos, respectivamente.

#### 4.6. Resultados del análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa

Con respecto a la hipótesis que fue planteada en el primer capítulo, recalcando que consistía en que las briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz podrían mejorar la eficiencia energética de la gasificación debido a su composición fibrosa y estructura porosa, se puede decir que no es del todo cierta, las briquetas al ser quemadas si producen gas, se logra tener una llama estable y duradera, sin embargo, la composición de las mismas no provocan como resultado valores altos en su constitución de gas de síntesis, no se obtiene un gas con valores muy altos como para ser considerado un excelente gas de calidad, es decir que no es ideal como para utilizarlo en otras investigaciones o como materia prima para la producción de otros compuestos, además para alcanzar una mejor obtención se debería contar con una mayor cantidad de briquetas, y también mayor cantidad de carbón para que la quema sea optima.

Mediante la realización de un análisis estadístico, se buscó determinar si existen diferencias significativas entre las tres gasificaciones que fueron realizadas a lo largo de este trabajo de investigación, en el proceso de gasificado se trabajó con variables independientes, para ver como influyen en las variables dependientes, con este análisis se trata de demostrar si es que existe algún factor que influya de una forma significativa en los resultados.

**Tabla 4-16:** Resultados de parámetros entrada y salida en el gasificador

<b>Gasificaciones</b>	<b>Primera Gasificación</b>	<b>Segunda Gasificación</b>	<b>Tercera Gasificación</b>
<b>Variables de Entrada</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>ENTRADA</b>
Temperatura de Gasificación	502,6	538,7	556,9
Flujo de aire	68,903	68,903	68,903
Flujo de biomasa	3	4	5
<b>Variables de Salida</b>	<b>SALIDA</b>	<b>SALIDA</b>	<b>SALIDA</b>
Flujo de gas	70,333	71,053	71,703
Flujo de Ceniza	0,42	0,65	0,70
Flujo de alquitrán	1,15	1,20	1,5

Realizado por: González M., 2024.

#### 4.6.1. Resultados del análisis estadístico ANOVA

**Tabla 4-17:** Resumen Estadístico para Flujo másico de la fracción sólida y fracción gaseosa

Fracción	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Sólida	3	4,0	1,0	25,0%	3,0	5,0	2,0
Gaseosa	3	71,0297	0,685298	0,964805%	70,333	71,703	1,37
Total	6	37,5148	36,7217	97,8857%	3,0	71,703	68,703

Realizado por: González M., 2024.

La tabla 4-15 muestra un resumen del análisis estadístico descriptivo, en donde se detalla el promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimos, máximos y rango, tanto de la fracción sólida como de la fracción gaseosa.

**Tabla 4-18:** Resultados de varianza ANOVA para el flujo másico por Fracción sólida y gaseosa

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6739,46	1	6739,46	9171,63	0,0000
Intra grupos	2,93927	4	0,734817		
Total (Corr.)	6742,4	5			

Realizado por: González M., 2024.

#### Prueba de hipótesis:

**Hipótesis nula:** Las medias de todos los grupos son iguales  $H_0: \mu_1 = \mu_2$

**Hipótesis alternativa:** Al menos uno de los grupos es diferente  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

La tabla 4-16 muestra el análisis de varianza ANOVA, el mismo que descompone la varianza de flujo másico de las dos fracciones, sólida y gaseosa en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F en este caso corresponde a 9171,63, valor describe el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. El valor-P de la prueba es menor que el nivel de significancia de 0,05, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) a favor de la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), dado que sí existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de flujo másico de la fracción sólida y la fracción gaseosa, con un 95% de confiabilidad. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizó la prueba de rangos múltiples LSD.

#### 4.6.2. Resultados de la prueba de rangos múltiples LSD

**Tabla 4-19:** Prueba de rangos múltiples LSD

Fracción	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fracción sólida	3	4,0	X
Fracción gaseosa	3	71,0297	X

Nivel de confianza: 95,0 %

Realizado por: González M.,2024.

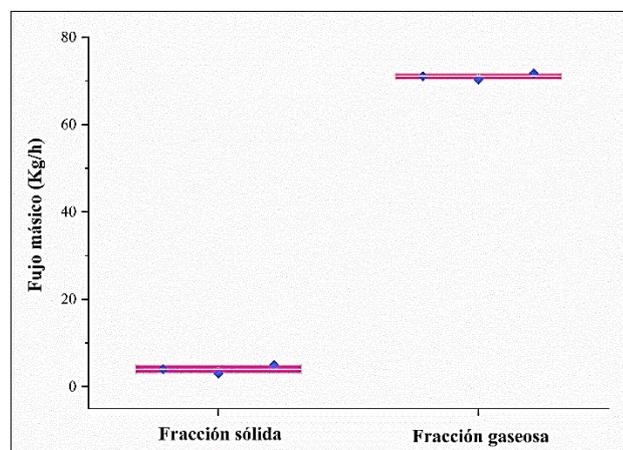
**Tabla 4-20:** Resultados de la prueba LSD

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	<b>-67,0297</b>	1,94328

\* indica una diferencia significativa.

Realizado por: González M.,2024.

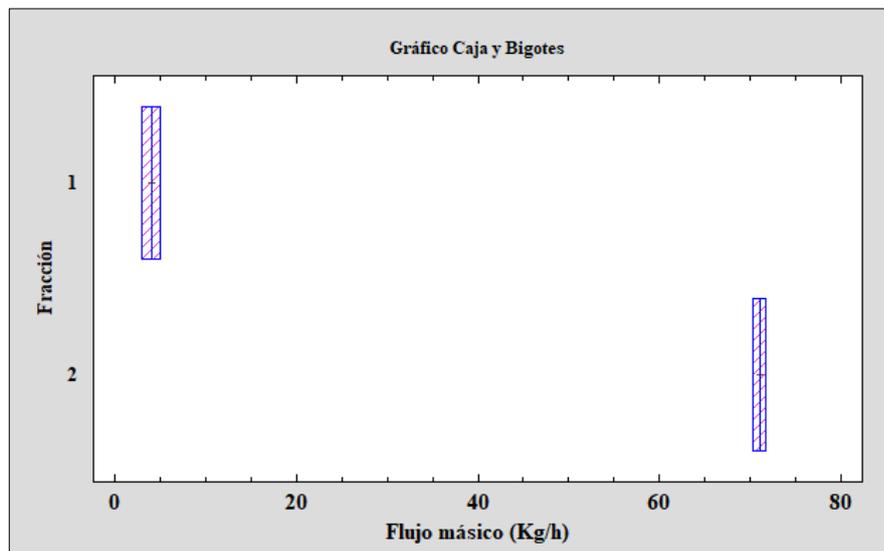
La tabla 4-17 muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples LSD al 95,0 % de nivel de confianza. La prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles son las medias significativamente diferentes. Las medias entre grupos presentan homogeneidad tanto para la fracción sólida, como para la fracción gaseosa. Sin embargo, si aplicamos el contraste entre la fracción sólida y la fracción gaseosa, se visualizó una diferencia significativa entre las dos fracciones, la tabla 4-18, describe dicho resultado, resaltando la significancia entre los dos grupos, con una diferencia de -67,0297. Para visualizar de mejor manera esta diferencia, se graficó el diagrama de caja y bigotes descrita en la ilustración 4-9, donde se corrobora la diferencia que existe entre las dos fracciones analizadas.



**Ilustración 4-8:** Prueba Fisher LSD fracción sólida y a fracción gaseosa

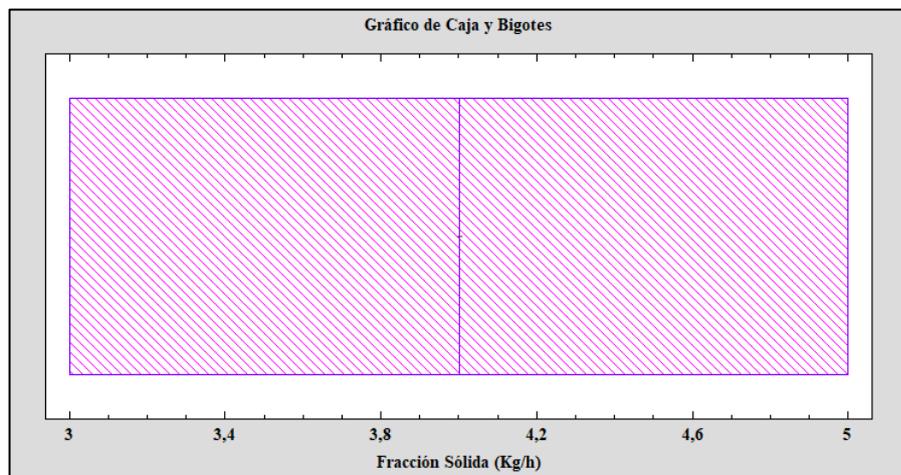
Realizado por: González M.,2024.

Así mismo, se graficó la prueba Fisher LSD (ilustración 4-8), donde se resaltan las medias agrupadas para la fracción sólida y fracción gaseosa vs, el flujo másico (Kg/h). Se observó la gran diferencia que existe entre las dos fracciones. La ilustración 4-10 y 4-11, en cambio, representa la variabilidad de las medias de cada fracción analizada; la fracción presentó una media de 4,0 Kg/h con una desviación estándar de 1,0 y la fracción gaseosa por otro lado presentó una media de 71,021 Kg/h y la desviación estándar de 0,68.



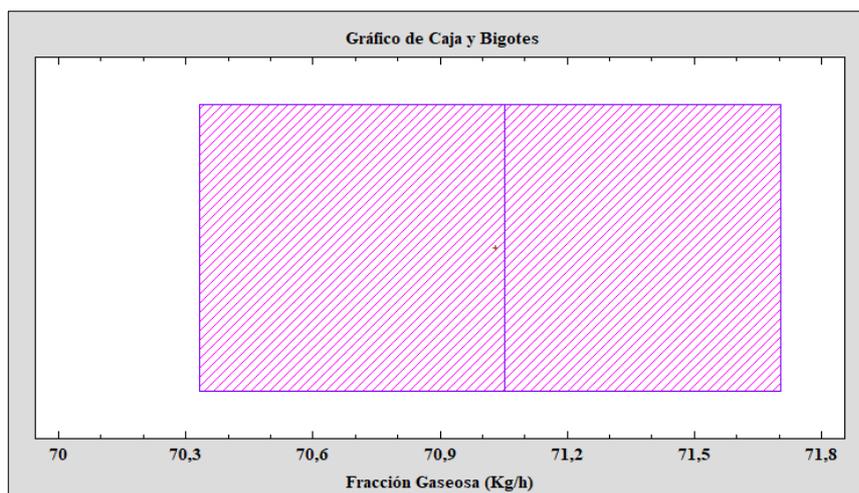
**Ilustración 4-9:** Relación Fracción (1) sólida, (2) gaseosa; vs medias de flujo másico en Kg/h.

Realizado por: González M.,2024.



**Ilustración 4-10:** Caja y bigotes para la media de la fracción sólida

Realizado por: González M.,2024.



**Ilustración 4-11:** Caja y bigotes para la media de la fracción gaseosa

Realizado por: González M.,2024.

#### 4.6.3. Resultados del análisis del supuesto de normalidad

**Tabla 4-21:** Resumen Estadístico para residuos

Recuento	6
Promedio	-1,16667E-7
Mediana	0,0116667
Desviación Estándar	0,766716
Coficiente de Variación	-6,57185E8%
Sesgo Estandarizado	<b>-0,021856</b>
Curtosis Estandarizada	<b>-0,652607</b>

Realizado por: González M.,2024.

La Tabla 4-19, presenta un resumen del análisis de residuos del ANOVA para las dos fracciones. A partir de los residuos se puede corroborar el supuesto de normalidad, si los datos obtenidos experimentalmente siguen una distribución normal. El sesgo y la curtosis son datos importantes para determinar este supuesto y el error en la distribución. Además, para validar el análisis de varianza ANOVA descrito en la Tabla 4-16, el supuesto de normalidad debe cumplirse.

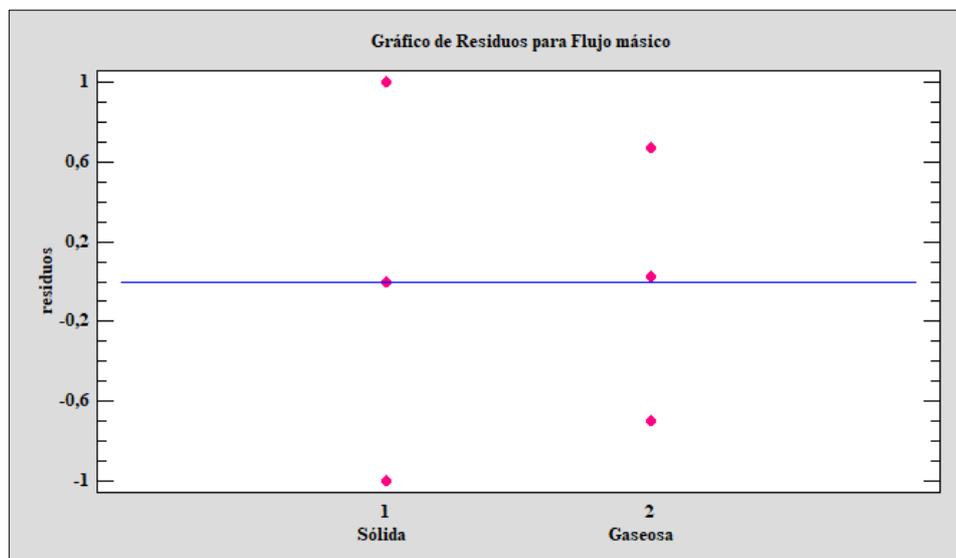
##### 4.6.3.1. Sesgo y curtosis estandarizada

El sesgo estandarizado indica la asimetría de la distribución. En este caso, cada una de las fracciones y el total de estas tienen sesgos cercanos a 0, lo que sugiere que las distribuciones son aproximadamente simétricas, cercanas a una distribución normal. Además, valores fuera del

rango de  $\pm 2$  indican desviación significativamente de la normalidad; en este caso, los valores se encuentran dentro del rango esperado, verificando la distribución normal en las dos fracciones.

Por otro lado, la curtosis estandarizada mide la forma de la distribución; un valor negativo en la curtosis estandarizada sugiere que la distribución es relativamente plana en comparación con una distribución normal. Esto puede deberse a que las medias son diferentes en cada fracción; además no hay suficientes datos para corroborar dicha distribución.

La Ilustración 4-12, muestra los residuos vs las fracciones sólida y gaseosa; en la gráfica se observa el intervalo del sesgo estandarizado que no sobrepasa de  $\pm 2$ , por lo tanto, está dentro de la distribución normal, y de esta manera se valida el análisis de varianza ANOVA y la existencia de un error mínimo de las mediciones de flujo másico para las 3 gasificaciones, tanto de la fracción sólida como de la fracción gaseosa.



**Ilustración 4-12:** Gráfico de residuos vs fracciones sólida y gaseosa

Realizado por: González M., 2024.

#### 4.6.4. Resultados de la prueba de Levene's

**Hipótesis nula:** Las varianzas entre las dos fracciones son iguales.

$$H_0: \sigma_1 = \sigma_2$$

**Hipótesis alternativa:** Las varianzas entre las dos fracciones son diferentes.

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

La prueba de Levene's se utilizó para verificar si las varianzas son iguales entre las dos fracciones analizadas. En este caso el estadístico Levene's, descrito en la Tabla 4-20 presenta un valor P de

0,6396 mayor al nivel de significancia del 0,05. Por lo tanto, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ) de igualdad de varianzas. En otras palabras, no hay diferencia significativa entre las varianzas de la fracción sólida y la fracción gaseosa con un nivel de confianza del 95,0 %.

La Tabla 4-21, describe las varianzas para la fracción sólida ( $\sigma_1$ ) y para la fracción gaseosa ( $\sigma_2$ ); el valor de F-Ratio es el cociente de las dos varianzas, en este caso el valor de 2,12932; y el valor P de 0.6391. La prueba de razón F y su valor P también se utiliza para evaluar la igualdad de las varianzas entre dos grupos. Dado que el valor P es mayor que 0,05, nuevamente no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad de varianzas; corroborando lo mencionado anteriormente.

**Tabla 4-22:** Prueba Levene's

	<b>Prueba</b>	<b>Valor-P</b>
Levene's	0,255904	<b>0,6396</b>

Realizado por: González M.,2024.

**Tabla 4-23:** Comparación de la prueba de Levene's para las dos fracciones

<b>Comparación</b>	$\sigma_1$	$\sigma_2$	<b>F-Ratio</b>	<b>P-Valor</b>
1 / 2	1,0	0,685298	2,12932	<b>0,6391</b>

Realizado por: González M.,2024.

#### 4.6.5. Comprobación de hipótesis

*La gasificación de briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa es una fuente eficiente y sostenible de energía.*

De acuerdo con los resultados obtenidos, esta hipótesis general no es verdadera, debido a que la composición de gas de síntesis que se obtuvo no tiene porcentajes muy altos, por lo cual no puede ser considerado un gas comercial y mucho menos, un gas que puede ser utilizado para otros procesos de investigación, la mezcla de briquetas no es una buena opción para la producción de gas, la tusa de maíz puede considerarse una fuente más eficiente que la cáscara de papa, debido a su contenido de humedad más bajo, lo cual favorece al proceso de gasificación.

*Las briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa podrían mejorar la eficiencia energética de la gasificación debido a su composición fibrosa y su estructura porosa.*

Esta hipótesis es verdadera, debido a que la tusa de maíz y cáscara de papa son residuos que tienen una buena composición fibrosa, debido a las fibras vegetales presentes en ellas, estas permiten que su estructura porosa facilite la circulación del aire en el proceso de gasificación, y también puede mejorar la eficiencia del mismo, ya que permite una mayor penetración del agente oxidante, sin embargo, luego de las pruebas realizadas se puede decir, que otros de los factores importantes para mejorar la eficiencia energética es la temperatura y el contenido de humedad

***La gasificación podría ser una alternativa viable para la generación de calor en áreas rurales, ya que la disponibilidad local de estos materiales podría reducir los costos de adquisición de combustibles.***

Esta hipótesis es falsa, de acuerdo con las gasificaciones realizadas a lo largo del desarrollo de la parte experimental de este trabajo de investigación, se puede decir que la gasificación no es una alternativa viable para la generación de calor en áreas rurales, primero porque es un proceso que lleva tiempo, la biomasa debe tener baja humedad, en segundo lugar, se deberían realizar más pruebas de gasificación con distinta materia orgánica, ya que como se observa en los resultados, en este caso, el uso de briquetas de tusa de maíz y cáscara de papa para gasificar no produce un gas de alta calidad, lo que significa, que para llegar a considerar la gasificación como una alternativa viable, se debe realizar más investigaciones.

#### **4.7. Discusión de resultados**

En este proyecto de investigación se trabajó con briquetas fabricadas a partir de dos tipos de residuos agrícolas, la cáscara de papa y tusa de maíz, mediante el uso de un gasificador de tipo downdraft ubicado en la Facultad de Mecánica, en donde la eficiencia energética no detalla valores muy bajos, pero tampoco son tan altos, en el caso del poder calorífico superior e inferior, son valores estables, como materia de arranque del equipo se trabajó con carbón para calentar el equipo y lograr que las briquetas se quemaran con mayor facilidad, a su vez, también se obtuvo cantidades de alquitrán como residuos, a pesar de no ser tan altas, también son consideradas en el proceso, se ha demostrado que la mezcla de carbón/biomasa tiene una gran influencia en la composición del gas de síntesis.

Cuando se tiene cantidades altas de humedad en la biomasa con la que se trabaja, esto afecta considerablemente al proceso de gasificación, ya que para poder llevar a cabo el procedimiento se debe tener un bajo contenido de humedad, en este caso las briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz se encontraron en un rango ideal, en el caso de la cáscara de papa esta cuenta con un

7,726 %, mientras que la tusa posee 10,727% de humedad, según (IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) 2007) los valores menores al 15% son los más adecuados para la gasificación, para secar la biomasa se presentaron ciertos inconvenientes, uno de ellos es que la biomasa que está seca más allá del punto de equilibrio, puede recuperar la humedad debido al aire presente en el ambiente, al saber que hay humedad presente, se sabe que se facilita la producción de hidrógeno y esto puede hacer que la eficiencia térmica disminuya, por otro lado, adquirir biomasa seca, también es un aspecto complicado ya que hay que esperar que esté completamente seca, para poder realizar gasificaciones. Según (Adelawe y Alabi, 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, si se quiere obtener un gas de mejor calidad con un poder calorífico alto, el contenido de humedad siempre debe ser bajo, en esta investigación se determinó un valor de  $3171,01\text{kJ}/\text{m}^3$ , este valor es indicativo de que se tiene una cantidad de energía potencial contenida en el gas. De acuerdo con (Salazar, et al 2016) 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, en el estudio de los demás parámetros de operación, se identificó que la temperatura y el flujo de gas influyen directamente en la eficiencia de gasificación, al trabajar con temperaturas más alta se observó una mejor obtención de gas, ya que la biomasa se quema con más facilidad y el equipo adquiere rápidamente una temperatura máxima.

A partir de los resultados, se concluye que las briquetas son adecuadas para ser gasificadas, de acuerdo con los aspectos que cumplen, y su adecuado contenido de humedad, se deduce que son óptimas para obtener un gas de calidad, sin embargo, al realizar la gasificación no se obtuvo valores tan altos como se esperaba, entonces es importante evaluar qué porcentaje de energía se encuentra contenido en las briquetas. Es importante analizar las características del gas, es decir su composición química y el poder calorífico, por otra parte, lo ideal es trabajar con briquetas que generen un gas puro, que no genere tantos contaminantes, es fundamental discutir si entre la cáscara de papa y tusa de maíz existe una diferencia considerable en términos de eficiencia energética, lo cual brinda información que será necesaria en posteriores procedimientos de gasificación.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

- Se analizó el aprovechamiento energético del proceso de gasificación de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz mediante el uso del gasificador downdraft, teniendo en cuenta que la gasificación de briquetas es considerada una alternativa energética viable, se constató que el poder calorífico experimenta cambios en relación con el tipo de biomasa empleada en el proceso, y a su vez, la composición del gas de síntesis también se ve afectada, el uso de esta mezcla de biomasa en forma de briquetas no representa una elección óptima para la obtención de un gas de calidad destinado a diversas aplicaciones o para futuras investigaciones.
- Se caracterizó las briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz mediante el desarrollo de análisis proximales, los cuales consistieron en la determinación del análisis de humedad, en donde se obtuvo un valor de 7,726% con respecto a la cáscara de papa, y 10,727% de humedad de la tusa de maíz, así, se pudo verificar que las dos biomásas cumplen con un valor inferior a 15 % para conseguir un gas de síntesis óptimo, en las pruebas físico químicas se obtuvo el porcentaje de carbono 44,839% presente en la tusa de maíz, más alto que el contenido de la cáscara de papa 40,535%, al estar presente este elemento, indica que se va a obtener un alto poder calorífico en el proceso de gasificación.
- Se determinó condiciones de operación del proceso de gasificación, tales como temperatura de gasificación de 556,9°C teniendo como agente gasificante el aire, también se trabajó con una densidad de aire de 0,86 kg/m<sup>3</sup> y una presión atmosférica de 0,704 atm, para un buen arranque del equipo se requiere de 2 kilos de carbón, parámetros que tienen una gran influencia en los resultados de composición del gas.
- Se realizó un balance de masa del proceso de gasificación, considerando todas las entradas; flujo másico de biomasa 5 kg/h, flujo másico de aire 68,903 kg/h, en las salidas se obtuvo un flujo másico de gas con 71,703 kg/h, el flujo másico de cenizas con 0,70 kg/h y el flujo de alquitrán de 1,5 kg/h, el desarrollo del balance permitió identificar con precisión la cantidad perdida en forma de residuos no deseados, destacando particularmente el alquitrán

- Se obtuvo un gas de síntesis con una composición de hidrógeno de (5,56 %), monóxido de carbono (13,25 %), metano (1,72 %), dióxido de carbono (12,16 %), etano (0,11 %), oxígeno (7,52%), hidrógeno (5,26%), a través de cromatografía de gases analizada bajo la norma ASTM 1945, como existe una baja cantidad de etano y metano, no se considera un biocombustible.
- Se efectuó un análisis estadístico, para la fracción sólida y gaseosa, como se obtuvo un valor menor a 0,05 se rechazó la hipótesis ya que sí existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de flujo másico de las dos fracciones, lo que indica que el gas no sirve para uso comercial, la tercera gasificación fue la más óptima, con un porcentaje de confiabilidad de 95%.

## RECOMENDACIONES

- Es recomendable que la biomasa con la que se va a trabajar no tenga cantidades elevadas de humedad en su composición, lo ideal es menor o igual a 10%, caso contrario esto influye negativamente en el proceso de gasificación y, por lo tanto, también en el gas de síntesis que se va a obtener.
- Se recomienda adecuar correctamente el equipo de gasificación, especialmente, la manguera que permite la extracción del gas, ya que si no se tiene una correcta adecuación va a ser muy complicado el paso de gas hacia la funda para el posterior análisis de cromatografía.
- Es de suma importancia, limpiar los residuos de gasificaciones anteriores en el equipo, ya que esto puede influir en el balance de masa si se tiene cantidades erróneas, de igual forma, se recomienda cambiar el agua cada vez que se va a iniciar un proceso de gasificación.
- Es importante verificar que todas las llaves con las que cuenta el equipo estén bien cerradas, también las compuertas del gasificador, deben estar bien cerradas, para que no ingrese oxígeno, ya que si eso ocurre el proceso puede verse un poco afectado.
- Se recomienda utilizar otro tipo de biomasa para el desarrollo de otras investigaciones, con mayor contenido de carbono, ya que esto ayuda a tener una mayor producción de gas en el proceso de gasificación, y con baja cantidad de cenizas ya que puede afectar en su calidad.
- Por último, es fundamental contar con el equipo de protección personal, debido a que, al extraer gas, el contenido que se desprende en el procedimiento puede afectar a la salud, ya que puede ser asfixiante en el momento de prender la hornilla, para verificar la producción de gas de síntesis.

## **GLOSARIO**

**ALQUITRÁN:** sustancia viscosa y oscura que se obtiene a partir de la destilación de materiales orgánicos como la madera, el carbón, el petróleo o ciertos residuos., suele contener una mezcla compleja de compuestos orgánicos, incluyendo hidrocarburos aromáticos y alifáticos. (Romanelli, 2016, pág. 90).

**ANEMÓMETRO:** Un anemómetro es un instrumento de medición diseñado para determinar la velocidad del viento o cualquier otro flujo gaseoso. (Romanelli, 2016, pág. 72).

**BIOCOMBUSTIBLE:** combustible derivado de materias primas orgánicas renovables, generalmente de origen vegetal o animal, se produce a través de procesos biológicos o químicos y son utilizados como alternativas a los combustibles fósiles tradicionales. (Londoño, 2019, pág .31)

**BRIQUETA:** estructura compacta y maciza de material combustible que ha sido comprimido, habitualmente elaborado a partir de residuos agrícolas, forestales, industriales o de biomasa variada, la elaboración de briquetas implica comprimir material triturado o molido mediante la aplicación de presión, dando lugar a la formación de unidades densas y uniformes. (Caballo, 2022, pág. 140)

**ESPECTRO:** representación gráfica de la intensidad de la radiación electromagnética absorbida o emitida por una muestra en función de la longitud de onda o la frecuencia. (Pérez, 2021, pág. 501)

**FLUJO DE GAS:** movimiento o transporte de gas a través de un conducto o sistema, puede aplicarse a diversos contextos, desde la física y la ingeniería hasta la ciencia de los materiales y la industria. (Caballo, 2022, pág. 140)

**FUNDA TEDLAR:** bolsa o cubierta fabricada con un material específico llamado Tedlar es una marca registrada de DuPont y se refiere a un tipo de polímero conocido como cloruro de polivinilo (PVC) con una capa externa de polivinilideno fluorado (PVDF). Esta combinación de materiales confiere a Tedlar propiedades únicas, como resistencia química, durabilidad, resistencia a la intemperie y estabilidad térmica. (Mishra, 2021, págs. 329-332).

**FLUJO MÁSIKO:** magnitud fundamental en la dinámica de fluidos que describe la cantidad de masa que fluye por unidad de tiempo a través de un punto específico en un sistema, se expresa en unidades de masa por unidad de tiempo, como kilogramos por segundo (kg/s). (Mishra, 2021, págs. 329-332).

**GAS DE SÍNTESIS:** es una mezcla de gases producida mediante un proceso de gasificación, este proceso implica la transformación de materiales carbonosos, como biomasa, carbón o residuos orgánicos, en un gas combustible mediante reacciones químicas controladas en presencia de un agente gasificante. (Londoño, 2019, pág .31)

**TERMOCUPLA:** dispositivo de medición de temperatura que se basa en el principio de que la temperatura afecta la conductividad eléctrica de los metales, consiste en la unión de dos metales diferentes en un extremo. (Pérez, 2021, pág. 501)

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ADELAWÉ, Giwa., ALABI, Adetunji.** “A comprehensive review on biomass and solar energy for sustainable energy generation in Nigeria”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2019, (United Arab Emirates), vol. 69, págs 110-117 [Consulta: 22 octubre 2023 ]. ISSN 1364-0321. Disponible en: <https://doi:10.1016/j.rser.2016.11.160>
2. **AHUMADA, Luz.** “Optimización de las Condiciones de Operación de la Microgasificación de Biomasa para Producción de Gas de Síntesis”. *Información tecnológica* [en línea]. 2016, vol. 27, págs. 179–188 [Consulta: 12 de octubre de 2024]. ISSN 0718-0764. Disponible en: [doi:10.4067/s0718-07642016000300017](https://doi:10.4067/s0718-07642016000300017)
3. **ALAMO, R.** Mezclas de biomásas y aglutinantes orgánicos para la mejora de las propiedades energéticas en la elaboración de briquetas. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad César Vallejo, Lima – Perú. 2018. págs. 20-23. [Consulta: 2023-07-23]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/17521>
4. **ALVARÉZ, M., VALENCIA, L.,** Diseño conceptual de un gasificador para la producción de gas de síntesis, alimentar la biomasa preparada al gasificador en una tolva o sistema de alimentación [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad EAFIT, Medellín - Colombia. 2016. págs. 90-104. [Consulta: 2023-07-23]. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/120f74b9>
5. **ARDILA, M., LÓPEZ, A. & LOZANO, 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/epoch/titulos/219204>.
6. **BRITO, J.** *Que son las briquetas* [blog]. España: lenasoliver, 2015. [Consulta: 16 octubre 2023]. Disponible en: <https://tiendabiomasa.com/briqueta>
7. **CABALLO, Ricardo.** Introducción a la biomasa, primera parte. [ blog ]. España, 2022. [Consulta: 29 septiembre 2023]. Disponible en: <https://eiposgrados.com/blog-energias/introduccion-a-la-biomasa-parte-1/>
8. **CALLEJO, J.** *Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en*

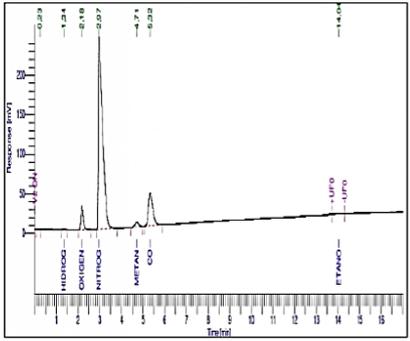
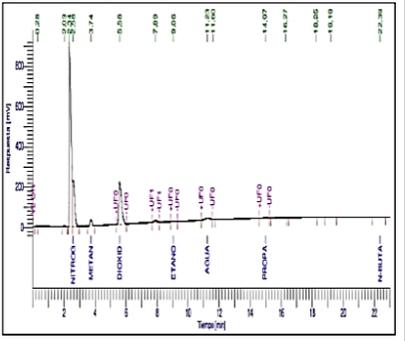
*Andalucía* [en línea]. 1ª ed. Edita: junta de Andalucía, 2017. [Consulta: 20 agosto 2023].  
Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/biomasa.pdf>

9. **CARRASCO BARRIGA, Manuel.** *Divulgación de Energías Alternativas* [ blog ]. Ecuador, 2019. [ Consulta: 17 septiembre 2023]. Disponible en: <https://blog.uclm.es/manueldbarriga/page/5/>
10. **EP, P.** *Aprovechamiento energético de biomásas* [blog]. Ecuador: Petróleo & Minas, 2014. [Consulta: 17 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.petroenergia.info/>
11. **FERRONATO, Navarro.** “Are waste-based briquettes alternative fuels in developing countries? A critical review”. *Energy for Sustainable Development* [ en línea], 2016, (España), vol. 68, págs. 220-241 [ Consulta: 16 noviembre 2023]. ISSN 0973-0826. Disponible en: [https:// doi:10.1016/j.esd.2022.03.013](https://doi:10.1016/j.esd.2022.03.013)
12. **GALINDO, G.** *Encuentro internacional sobre Biomasa para uso energético* [blog]. Guayaquil: Espol, 2019. [Consulta: 16 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.espol.edu.ec/es/noticias/encuentro-internacional-sobre-biomasa>
13. **GANI, Asri.** “Proximate and ultimate analysis of corncob biomass waste as raw material for biocoke fuel production”. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* [ en línea], 2018, (Valencia), vol. 46, págs. 198-200 [ Consulta: 16 noviembre 2023]. ISSN 2666-0164. Disponible en: [https:// doi:10.1016/j.cscee.2023.100525](https://doi:10.1016/j.cscee.2023.100525)
14. **LONDOÑO, Melisa.** *Gasificador de Biomasa* [blog]. Don Diego – Rionegro, 2019. [Consulta: 17 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.eafit.edu.co/innovacion/transferecia/Paginas/gasificador-de-biomasa.aspx>
15. **MARQUEZ, Paul.** “Poder calorífico de briquetas elaboradas con biomasa y aglutinantes orgánicos” *Dialnet*. [en línea], 2019, (España), vol. 8, págs. 199-205. [Consulta: 21 noviembre 2023]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8122174>

16. **MISHRA, Rajesh., KUMAR, Upadhyay.** “Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters”. *Renewable Energy* [ en línea], 2021, (India), vol. 4, págs. 329-340 [Consulta: 15 julio 2023]. ISSN 2589-2991. Disponible en: [https:// doi:10.1016/j.mset.2021.08.009](https://doi:10.1016/j.mset.2021.08.009)
  
17. **PÉREZ, David., CAÑETE, Angela.**” Modelling biomass gasifiers in hybrid renewable energy microgrids; a complete procedure for enabling gasifiers simulation in Homer”. *Renewable Energy* [ en línea], 2021, (Valencia), vol. 174, págs. 501-512. [ Consulta: 14 agosto 2023]. ISSN 0960-1481. Disponible en: <https://doi:10.1016/j.renene.2021.04.083>
  
18. **PÉREZ, Fernando.** *Gasificación de Biomasa: Estudios teórico experimentales en lecho fijo equicorriente*. Editorial Universidad de Antioquia, 2009. [ Consulta: 24 octubre 2023]. Disponible en: <https://unilibros.co/gpd-gasificacion-de-biomasa-estudios-teorico-experimentales-en-lecho-fijo-equicorriente.html>
  
19. **PEÑA, Araceli., CASTILLO, Alanis.** “Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por micro extracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas”. *TIP* [ en línea], 2015, (España), vol. 18, págs. 29-42. [ Consulta: 14 agosto 2023]. ISSN 0960-1481. Disponible en: <https://doi:10.1016/j.renene.2021.04.083>
  
20. **ROMANELLI, Gustavo.** *Química de la Biomasa y los biocombustibles*. [ en línea]. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, 2016. [ Consulta: 23 noviembre 2023]. Disponible en: [doi:10.35537/10915/59392](https://doi:10.35537/10915/59392)
  
21. **VILLASUR, Sofía.** Tipos de Biomasa: cuáles son y principales características. [ blog ]. España, 2018. [ Consulta: 10 diciembre 2023]. Disponible en: <https://energia.roams.es/>
  
22. **XIAOJING, Li., CHAOFAN Ma,** “Structural design and optimization of a solar spouted bed reactor of biomass gasification”. *Applied Thermal Engineering* [ en línea], 2017, (China), vol. 194, págs 210-314 [Consulta: 24 septiembre 2023]. ISSN 1359-4311. Disponible en: [https:// doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117058](https://doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117058)

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS DE SÍNTESIS DE BRIQUETAS

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	2 de 2	
		FPT-7.8-02-04		
<b>INFORME No. I-LAI-023-94-01</b>				
Orden de Trabajo No. DQ-OT0011-2024				
<b>INFORMACIÓN CLIENTE</b>				
<b>Cliente / Empresa:</b>	Marjorie Jesenia González Chavarrea	<b>Persona de contacto:</b>	Marjorie Jesenia González Chavarrea	
<b>Dirección / Telf.:</b>	Riobamba / 984952985	<b>E-mail:</b>	gonzita2016mg@gmail.com	
<b>PARÁMETROS DE LA MUESTRA</b>				
<b>Identificación:</b>	M-LAI-023-94-02	<b>Fecha de muestreo:</b>	* 29/1/2024	
<b>Tipo de muestra:</b>	Gas de cáscara de papa y tusa de maíz	<b>Plan de muestreo:</b>	No especificado por el cliente	
<b>Tipo de contenedor:</b>	Bolsa tedlar	<b>Fecha inicio del ensayo:</b>	1/2/2024	
<b>Fecha de recepción:</b>	31/1/2024	<b>Fecha entrega informe:</b>	5/2/2024	
<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>				
<b>Temperatura y %HR ambiente:</b>	20,2 °C	23,5 %	<b>Norma de referencia:</b>	ASTM D 1945 Cromatografía ASTM D 3588 Cálculos
<b>Temperatura y Presión de muestra:</b>	64,5 °F	0,7 psi	<b>Procedimiento interno:</b>	PE-7.2-01 PE-7.2-02
	18,1 °C	4895,3 Pa		
<b>RESULTADOS</b>				
<b>COMPOSICIÓN</b>	<b>COMPONENTE</b>		<b>% Moles</b>	<b>Desv. Std</b>
	Hidrógeno		5,26	0,141
	Oxígeno		7,52	0,349
	Nitrógeno		58,94	0,443
	Monóxido de carbono		13,25	0,102
	Metano		1,72	0,066
	Dióxido de carbono		12,16	0,442
	Etano		0,11	0,002
Agua		0,85	0,006	
<b>PROPIEDADES</b>	<b>Densidad relativa</b>		1,00	
	<b>Peso molecular promedio [g/mol]</b>		28,72	
	<b>Densidad de la muestra (g/L)</b>		1,21	
	<b>Poder calorífico superior [kJ/m<sup>3</sup>]</b>		3171,01	
	<b>Poder calorífico inferior [kJ/m<sup>3</sup>]</b>		2968,94	
	<b>Factor de compresibilidad (z)</b>		1,0000	
<b>CROMATOGRAMA</b>				
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)			Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)	
				
<b>DECLARATORIAS</b>	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems 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.			

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

Componentes	Mol %
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

**ANEXO C: ANÁLISIS FTIR DE MUESTRAS DE CENIZA DE BRIQUETAS DE  
CÁSCARA DE PAPA Y TUSA DE MAÍZ**



**ANEXO D: ANÁLISIS FTIR DE MUESTRA DE ALQUITRÁN  
DE BRIQUETAS DE CÁSCARA DE PAPA Y TUSA**



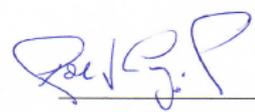
ANEXO E: ASIGNACIÓN DEL NÚMERO DE ONDA PARA EL ANÁLISIS FTIR

Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Asignación
	<i>Alcohol y fenoles</i>
3600	Estiramiento O-H del alcohol
3550-3500	Estiramiento O-H del fenol
1300-1000	Estiramiento C-O
	<i>Éteres</i>
1100	Estiramiento C-O-C
	<i>Aldehídos y cetonas</i>
2900-2700	Estiramiento C-H del aldehído
1740-1720	Estiramiento C=O del aldehído alifático
1730-1700	Estiramiento C=O de la cetona alifática
1720-1680	Estiramiento C=O del aldehído aromático
1700-1680	Estiramiento C=O de la cetona aromática
	<i>Éteres</i>
1750-1730	Estiramiento C=O alifático
1730-1705	Estiramiento C=O aromático
1310-1250	Estiramiento C-O aromático
1300-1100	Estiramiento C-O alifático
	<i>Ácidos carboxílicos</i>
3300-2500	Estiramiento O-H
1700	Estiramiento C=O
1430	Flexión C-O-H en el plano
1240	Estiramiento C-O
930	Flexión C-O-H fuera del plano
	<i>Anhidridos</i>
1840-1800	Estiramiento C=O
1780-1740	Estiramiento C=O
1300-1100	Estiramiento C-O



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 20/06/2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Marjorie Jesenia González Chavarrea
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título para optar:</b> Ingeniera Química
 Ing. Mabel Mariela Parada Rivera <b>Director del Trabajo de Titulación</b>  Dr. Robert Alcides Cazar Ramírez <b>Asesor del Trabajo de Titulación</b>

