



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BRIQUETAS OBTENIDAS DE  
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE GASIFICACIÓN**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR:**

**DIEGO ALEJANDRO TAPIA SILVA**

Riobamba - Ecuador

2024



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

**VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BRIQUETAS OBTENIDAS DE  
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE GASIFICACIÓN**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: DIEGO ALEJANDRO TAPIA SILVA**

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

Riobamba - Ecuador

2024

**©2024, Diego Alejandro Tapia Silva**

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, Diego Alejandro Tapia Silva, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 07 de junio de 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Diego Tapia Silva', with a stylized flourish at the end.

**Diego Alejandro Tapia Silva**  
**C.I. 060509666-8**

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

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto de Investigación, **VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BRIQUETAS OBTENIDAS DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE GASIFICACIÓN** , realizado por el señor: **DIEGO ALEJANDRO TAPIA SILVA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Carlos Cepeda G. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		07/06/2024
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		07/06/2024
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		07/06/2024

## **DEDICATORIA**

## **AGRADECIMIENTO**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Limitaciones y delimitaciones.....	3
1.2.1. <i>Limitaciones</i> .....	3
1.2.2. <i>Delimitaciones</i> .....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.4. Justificación.....	5
1.5. Hipótesis general.....	6

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes de investigación .....	7
2.2. Referencias Teóricas.....	10
2.2.1. <i>Cebada</i> .....	10
2.2.2. <i>Cerveza</i> .....	10
2.2.3. <i>Briqueta</i> .....	11
2.2.4. <i>Biomasa</i> .....	11
2.2.4.1. <i>Biomasa forestal</i> .....	11
2.2.4.2. <i>Biomasa agrícola</i> .....	11
2.2.4.3. <i>Biomasa de malta</i> .....	12
2.2.5. <i>Características energéticas de la biomasa</i> .....	12

2.2.5.1.	<i>Composición química</i> .....	12
2.2.5.2.	<i>Contenido de humedad</i> .....	12
2.2.5.3.	<i>Porcentaje de ceniza</i> .....	13
2.2.5.4.	<i>Poder calorífico</i> .....	13
2.2.5.5.	<i>Densidad aparente</i> .....	13
2.2.5.6.	<i>Porcentaje de fibra</i> .....	14
<b>2.2.6.</b>	<b><i>Conversión de la materia en energía</i></b> .....	<b>14</b>
2.2.6.1.	<i>Gasificador</i> .....	14
2.2.6.2.	<i>Gasificador de lecho fijo/móvil</i> .....	15
2.2.6.3.	<i>Gasificador de lecho fluidizado</i> .....	16
2.2.6.4.	<i>Gasificador con arrastre</i> .....	17
<b>2.2.7.</b>	<b><i>Combustión</i></b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.8.</b>	<b><i>Pirólisis</i></b> .....	<b>18</b>

### **CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1.</b>	<b>Enfoque de investigación</b> .....	<b>19</b>
3.1.1.	<i>Enfoque de investigación cualitativo</i> .....	19
3.1.2.	<i>Enfoque de investigación cuantitativo</i> .....	19
<b>3.2.</b>	<b>Nivel de Investigación</b> .....	<b>20</b>
3.2.1.	<i>Investigación Exploratoria</i> .....	20
3.2.2.	<i>Investigación Descriptiva</i> .....	20
3.2.3.	<i>Investigación Explicativa</i> .....	20
<b>3.3.</b>	<b>Diseño de investigación</b> .....	<b>19</b>
3.3.1.	<i>Identificación de variables</i> .....	22
3.3.1.1.	<i>Variables independientes</i> .....	22
3.3.1.2.	<i>Variables dependientes</i> .....	23
<b>3.4.</b>	<b>Tipo de estudio</b> .....	<b>19</b>
<b>3.5.</b>	<b>Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b> .....	<b>23</b>
3.5.1.	<i>Caracterización de briquetas y pruebas de CHON</i> .....	23
3.5.1.1.	<i>Obtención de la briqueta a partir de los residuos agroindustriales.</i> .....	23
3.5.1.2.	<i>Análisis de CHON</i> .....	23
3.5.2.	<i>Determinación de análisis proximales de la biomasa</i> .....	24
3.5.2.1.	<i>Determinación del contenido de humedad</i> .....	24

3.5.2.2.	<i>Pruebas de porcentaje de cenizas</i> .....	25
3.5.2.3.	<i>Pruebas adicionales</i> .....	26
3.5.3.	<b>Gasificación</b> .....	26
3.5.3.1.	<i>Gasificador</i> .....	27
3.5.4.	<b>Balance de masa del Equipo</b> .....	31
3.5.5.	<b>Análisis Estadístico</b> .....	32
3.5.5.1.	<i>Análisis de varianza Anova entre la fase sólida y gaseosa</i> .....	32

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	34
4.1.	<b>Análisis Físicoquímicos</b> .....	34
4.2.	<b>Pruebas Proximales</b> .....	35
4.2.1.	<i>Cenizas</i> .....	35
4.2.2.	<i>Porcentaje de Humedad</i> .....	37
4.2.3.	<i>Porcentaje de fibras</i> .....	37
4.2.4.	<i>Resultado de pruebas adicionales</i> .....	38
4.3.	<b>Diseño Experimental del proceso de Gasificación.</b> .....	39
4.3.1.	<i>Proceso de Gasificación</i> .....	39
4.3.2.	<i>Valoración energética de briquetas de bagazo de cebada</i> .....	41
4.3.3.	<i>Resultados del análisis cromatográfico del gas de síntesis.</i> .....	45
4.3.4.	<i>Poder calorífico inferior y superior</i> .....	47
4.4.	<b>Balance de Masa</b> .....	48
4.5.	<b>Análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa</b> .....	55
4.5.1.	<i>Anova</i> .....	56
4.6.	<b>Comprobación de la hipótesis</b> .....	61
	<b>DISCUSIONES</b> .....	62
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	63
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	65
	<b>GLOSARIO</b> .....	66
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	67
	<b>ANEXOS</b> .....	72

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Estudios con antecedentes de investigación similares.....	9
<b>Tabla 2-2:</b> Parámetros de tipos de gasificadores.....	15
<b>Tabla 4-1:</b> Resultado de pruebas de CHON.....	34
<b>Tabla 4-2:</b> Parámetros iniciales.....	35
<b>Tabla 4-3:</b> Pesos de la ceniza.....	35
<b>Tabla 4-4:</b> Parámetros iniciales para el porcentaje de humedad.....	37
<b>Tabla 4-5:</b> Datos obtenidos prueba de fibras.....	37
<b>Tabla 4-6:</b> Parámetros de gasificación.....	39
<b>Tabla 4-7:</b> Proceso de gasificación.....	40
<b>Tabla 4-8:</b> Datos del tiempo de gasificación vs temperatura.....	41
<b>Tabla 4-9:</b> Resultados del coeficiente de aire en exceso en el proceso de gasificación.....	44
<b>Tabla 4-10:</b> Parámetros valorados en el análisis cromatográfico.....	45
<b>Tabla 4-11:</b> Composición del gas de síntesis de bagazo de cebada.....	45
<b>Tabla 4-12:</b> Propiedades del gas de síntesis de bagazo de cebada.....	46
<b>Tabla 4-13:</b> Poder calorífico del bagazo de cebada.....	47
<b>Tabla 4-14:</b> Datos iniciales de gasificación.....	48
<b>Tabla 4-15:</b> Datos de salida de gasificación.....	48
<b>Tabla 4-16:</b> Resultados del balance de masa de la primera gasificación.....	51
<b>Tabla 4-17:</b> Resultados del balance de masa de la segunda gasificación.....	53
<b>Tabla 4-18:</b> Resultados del balance de masa de la tercera gasificación.....	54
<b>Tabla 4-19:</b> Resultado del balance de masa.....	54
<b>Tabla 4-20:</b> Resumen de los resultados obtenidos en los procesos de gasificación.....	55
<b>Tabla 4-21:</b> Resumen Estadístico para Flujo másico de la fracción sólida y fracción gaseosa.....	56
<b>Tabla 4-22:</b> Análisis de varianza ANOVA para el flujo másico por Fracción sólida y gaseosa.....	56
<b>Tabla 4-23:</b> Prueba de rangos múltiples LSD.....	57
<b>Tabla 4-24:</b> Resultados de la prueba LSD.....	57
<b>Tabla 4-25:</b> Resumen Estadístico para RESIDUOS.....	60
<b>Tabla 3-1:</b> Diseño experimental muestra.....	22
<b>Tabla 3-2:</b> Resumen variables dependientes.....	22
<b>Tabla 3-3:</b> Obtención de briqueta a partir de residuo agroindustrial.....	23
<b>Tabla 3-4:</b> Análisis elemental del hidrogeno y oxigeno.....	24
<b>Tabla 3-5:</b> Determinación del contenido de humedad.....	24
<b>Tabla 3-6:</b> Pruebas de porcentaje de ceniza.....	25
<b>Tabla 3-7:</b> Pruebas adicionales planteadas.....	26

<b>Tabla 3-8:</b> Proceso de gasificación .....	26
<b>Tabla 3-9:</b> Esquema de elementos para el análisis estadístico ANOVA.....	32

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b>	Gasificadores de lecho flujo ascendentes y descendentes .....	15
<b>Ilustración 2-2:</b>	Gasificadores burbujeante y con recirculación .....	16
<b>Ilustración 3-1:</b>	Diagrama de procesos de gasificación .....	21
<b>Ilustración 3-2:</b>	Gasificador tipo JXQ-10A .....	27
<b>Ilustración 4-1:</b>	Comparación de pruebas .....	38
<b>Ilustración 4-2:</b>	Temperatura vs tiempo del proceso de gasificación .....	42
<b>Ilustración 4-3:</b>	Cromatografía de gas de síntesis.....	47
<b>Ilustración 4-4:</b>	Prueba Fisher LSD para las medias de la fracción sólida y a fracción gaseosa. ....	58
<b>Ilustración 4-5:</b>	Caja y bigotes para la media de la fracción sólida.....	59
<b>Ilustración 4-6:</b>	Caja y bigotes para la media de la fracción gaseosa .....	59
<b>Ilustración 4-7:</b>	Gráfico de residuos vs fracciones sólida y gaseosa .....	61

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO A:</b> ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS DE SÍNTESIS DE BAGAZO DE CEBADA .....	72
<b>ANEXO B:</b> NORMA ASTM 1945: RANGO DE COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL..	73
<b>ANEXO C:</b> ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DEL BAGAZO DE CEBADA .....	74

## RESUMEN

En la actualidad, la demanda de energía es evidente en muchos aspectos. Cada vez hay una mayor falta de recursos para obtener energía, y el alto consumo energético representa un problema futuro. Por ello, se pretende conseguir alternativas que mitiguen la necesidad de desgastar las fuentes naturales. El objetivo de la presente investigación es la implementación de residuos agroindustriales como fuentes alternas de energía, mediante el análisis de la valoración energética que estos pueden proveer y la calidad de gas disponible en la biomasa. La metodología utilizada tuvo un enfoque cuantitativo y cualitativo, empleando un diseño experimental aleatorio que permita explorar relaciones entre variables y su relación directa con el proceso. El estudio se llevó a cabo a través de un proceso de gasificación, donde la biomasa como residuo agroindustrial pasa por una etapa de ignición con un agente gasificante como el aire. El resultado de este proceso es un gas que puede ser usado adecuadamente en la industria o la vida cotidiana, reemplazando otros gases con fuentes limitadas. Mediante esta metodología, se logró determinar la valoración energética del bagazo de cebada, residuo comúnmente obtenido de la elaboración de la cerveza. Se determinó también la calidad del gas que se puede obtener de esta biomasa, siendo analizada por el porcentaje de contenido de compuestos importantes como el metano, el cual se encontró en un 0.77%, comparado con el nitrógeno que se obtuvo en un 64.86% siendo la composición del menor y mayor respectivamente. Se concluye que el uso de biomásas como fuente de energía en actividades industriales es viable. No obstante, como fuente alterna de gas, el bagazo de cebada presenta un bajo contenido de metano en comparación con otras biomásas, aunque tiene valor en términos de capacidad calorífica, siendo esta de 3215,21 KJ/m<sup>3</sup>, considerando para aplicaciones adecuadas.

**Palabras clave:** <GAS DE SINTESIS>, <BIOMASA>, <GASIFICACIÓN>, <AGENTE GASIFICANTE>, <ENERGÍA RENOVABLE>, <FUENTES RENOVABLES>, <BAGAZO DE CEBADA>

0844-DBRA-UTP-2024



## ABSTRACT

Today, the demand for energy is evident in many aspects. There is an increasing lack of resources to obtain energy, and high energy consumption represents a future problem. For this reason, the objective is to achieve alternatives that mitigate the need to use up natural sources. The objective of this research is the implementation of agro-industrial wastes as alternative sources of energy, by analyzing the energy valuation they can provide and the quality of gas available in the biomass. The methodology used had a quantitative and qualitative approach, using a randomized experimental design to explore relationships between variables and their direct relationship with the process. The study was carried out through a gasification process, where the biomass as agro-industrial waste goes through an ignition stage with a gasifying agent such as air. The result of this process is a gas that can be adequately used in industry or daily life, replacing other gases with limited sources. By means of this methodology, it was possible to determine the energetic valuation of barley bagasse, a residue commonly obtained from beer brewing. The quality of the gas that can be obtained from this biomass was also determined, being analyzed by the percentage of content of important compounds such as methane, which was found to be 0.77%, compared to nitrogen which was obtained in 64.86% being the composition of the lowest and highest respectively. It is concluded that the use of biomasses as a source of energy in industrial activities is viable. However, as an alternative source of gas, barley bagasse presents a low methane content compared to other biomasses, although it has value in terms of heat capacity, being this of 3215.21KJ/m<sup>3</sup>, considering for suitable applications.

**Key words:** <SYNTHESIS GAS>, <BIOMASS>, <GASIFYCATION>, <GASIFYNG AGENT>, <RENEWABLE ENERGY>, <RENEWABLE SOURCES>, <BARLEY BAGASSE>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la explotación de recursos naturales para obtener fuentes de energía y combustible es evidente en el aumento de contaminación, es por ello que se quiere aplicar fuentes alternas para obtener combustible y energía sin necesidad de acabar con los recursos naturales que se tiene, los residuos agroindustriales se presentan como un alternativa para este problema, comúnmente estos eran usados para distintas áreas enfocadas en la agricultura, utilizadas en abono para terrenos etc, no obstante muchos de ellos representan un problema mayor como lo es el bagazo de cebada, que al ser tratado como abono en grandes cantidades, tiende a deteriorar el suelo y proliferar la aparición de microorganismos perjudiciales para la planta. Las biomásas en la actualidad a través de varios estudios han demostrado tener potencial como fuente de energía, debido a que al ser un compuesto orgánico tiene grandes cantidades de carbono. Por ello el objetivo de esta investigación es determinar la calidad de gas que se puede obtener a través de una biomasa y determinar la valoración de la capacidad calorífica que pueda proveer.

Este trabajo de investigación propone mostrar cuan factible es la biomasa para tratar como fuente alterna de biogás, a través de la valoración energética mediante el proceso de gasificación, de tal manera que se pretende demostrar las posibles aplicaciones que puede tener a través de los resultados. Estos procesos se llevarán a cabo a través de un gasificador, mismo que está ubicado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la facultad de Mecánica.

Finalmente, a través de esta investigación se determinará mediante los resultados cuan factible y viable es el implemento de este tipo de materia como fuente alterna de energía o aplicaciones que se podrán tener, siendo necesario para permitir implementar otro tipo de recursos y para la contaminación.

## CAPÍTULO I

### 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del problema

La demanda mundial de energía en la actualidad se satisface fundamentalmente por fuentes orgánicas, las más comunes son carbón, petróleo, gas natural y uranio siendo el petróleo considerado fuente de energía más importante de nuestra sociedad moderna considerándose un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo.

La alta dependencia que el mundo tiene del petróleo, la inestabilidad que caracteriza al mercado internacional y las fluctuaciones de los precios de este producto, han llevado a que se investiguen energías alternativas. (Martínez y Caro, 2010, pág. 4)

Ecuador ha basado su economía de los últimos 40 años en la actividad extractiva principalmente en la Amazonia, donde hay recursos fósiles. Las prácticas industriales han tenido efectos negativos, el desarrollo incontrolado de las actividades petroleras causó grandes impactos ambientales, sanitarios y sociales en todo el país. (Becerra et al., 2013, pág. 2)

Si bien este tipo de fuente de energía equivale a un porcentaje significativo en la economía del país, una fuente alterna permitiría el aprovechamiento de los recursos disponibles como el bagazo de cebada y se mitigaría de cierta forma los residuos.

El grupo de Investigación en Materiales Avanzados (GIMA) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo explora alternativas con relación a la búsqueda de materiales que permitan la selección de energía de una fuente natural como son los desechos, teniendo como objetivo principal Analizar materiales y nanomateriales para aplicaciones energéticas y medio ambientales.

## **1.2. Limitaciones y delimitaciones**

### **1.2.1. Limitaciones**

- Accesibilidad a la biomasa.
- Equipos que permitan realizar el análisis cromatográfico del gas.
- Espacio adecuado para la realización del proceso de gasificación.
- Elementos y materiales necesarios para gasificar.
- Indumentaria adecuada.
- Equipos para la recolección y aprovechamiento de energía y gas.

### **1.2.2. Delimitaciones**

- Biomasa establecida (bagazo de cebada)
- Identificación de componentes específicos, en el análisis del gas.
- Aprovechamiento energético establecido
- Variables identificadas, para el desarrollo del proceso

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Valoración energética de las briquetas obtenidas de residuos agroindustriales de bagazo de cebada.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar la biomasa de las briquetas mediante análisis físico, químicos y pruebas de CHON
- Identificar las variables de procesos de gasificación para su aprovechamiento energético.
- Determinar la composición del gas de síntesis producido en el Gasificador.
- Realizar un balance de masa del proceso de gasificación.
- Realizar un análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa conseguidos del proceso de gasificación.

#### 1.4. Justificación

Según la FAO, anualmente se producen 113.654.000 kilogramos de cerveza, lo que incrementa la economía de un país y genera residuos sólidos incontrolables. Entre los residuos sólidos, el bagazo de malta (BSG) es el de mayor preocupación, ya que representa el 85% de la producción total, a un ritmo estimado de 20 kg de BSG, por cada 100 litros de cerveza. Para la producción se considera BSG. Como fuente de biomasa con alto contenido de humedad y residuos de glicoproteínas que proporcionan un ambiente adecuado para la propagación de microbiota bacteriana extraña. (Camacho y Grande, 2021, pág. 3)

Como residuo vegetal, se tiene la posibilidad de utilización del bagazo cervecero en la producción de energía, a través de la elaboración de carbón, combustión directa o bien mediante la producción de biogás, dentro de sus usos más comunes se encuentra la utilización en calderas para generación de calor o electricidad y su utilización en motores o turbinas para la generación de electricidad. También, es posible su purificación para su incorporación en redes de gas natural y su utilización como material base en la síntesis de productos de elevado valor agregado como metanol o gas natural licuado. (Rodríguez, 2012, pág. 6)

El aprovechamiento de energía a partir de este tipo de materia puede variar esto considerando las variables que involucra el estado de la materia como poder calorífico, cambios estacionales sustanciales en la composición de los residuos entre otros. Teniendo en cuenta el consumo de energía, en el Ecuador, esta se mantiene en continua variación, el consumo de energía eléctrica por persona entre 2010 y 2020 mostró un incremento del 33,0%, pasando de 1.105 kWh por habitante a 1.470 kWh por habitante.

En 2020 se tuvo una producción de energía primaria de 204 millones de BEP. Del total producido, 86,3% estuvo conformado por petróleo, 4,3% por gas natural y 9,4% por energía de origen renovable (hidroenergía, leña, productos de caña, energía eólica, fotovoltaica y biogás) (Ministerio de energía, 2020, pág. 8)

Por otra parte, el desarrollo en función de obtener una fuente alterna de energía partiendo del BSG, se llevará a cabo de acuerdo con la valoración energética y energía aprovechable que se pueda determinar a través de un gasificador.

## **1.5. Hipótesis general**

A través de la valoración energética de la biomasa ¿Cuán optimo y eficiente es el gas de síntesis producido en el proceso de gasificación?

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

El primer combustible empleado y utilizado por los seres humanos fue la madera, y este combustible todavía es utilizado por cientos de personas para distintas actividades como cocinar o calentar, de igual forma empleado en la construcción siendo este material muy demandado.

No es de sorprender que la revolución industrial se implementara de carbón como combustible iniciando la producción de coque. Como resultado de este proceso, se desarrolló mediante pirólisis la primera producción de gas a una escala mayor a partir de carbón a finales del siglo VIII. (Ciuta et al., 2017, pág. 15)

Las primeras tecnologías dependían en gran medida de la pirólisis (es decir, la aplicación de calor a la materia prima en ausencia de oxígeno), pero esto tiene menos importancia en la producción de gas actual. La tecnología dominante es la oxidación parcial, que produce gas de síntesis (también conocido como gas de síntesis) que consiste en hidrógeno y monóxido de carbono en proporciones variables, donde el oxidante puede ser oxígeno puro, aire y/o vapor. (Ciuta et al., 2017, pág. 15)

##### 2.1.1. El bagazo de cebada como fuente alterna de energía.

El elevado contenido de lignocelulosa del BSG lo convierte en un recurso relevante para la fabricación de biocombustibles de segunda generación. A diferencia de fuentes tradicionales como la caña de azúcar y el aceite de palma (fuentes de primera generación), el BSG no plantea el dilema combustible-alimento al no comprometer la seguridad alimentaria.

La producción de biogás a partir de residuos agroindustriales como el BSG implica tres etapas fermentativas:

- Hidrolítica-acidogénica

En esta fase, las macromoléculas presentes en el BSG (lípidos, proteínas y carbohidratos) se descomponen en moléculas más simples.

- Acetogénica

Durante esta etapa, los productos de la fase anterior se convierten en ácido acético.

- Metanogénica

Finalmente, en esta fase, el ácido acético se transforma en metano y dióxido de carbono, que constituyen el biogás. El objetivo de estas tres fases es degradar el contenido ligninolítico del BSG hasta obtener compuestos sencillos como el metano y el dióxido de carbono. (Camacho y Grande, 2020, pág.10)

**Tabla 2-1:** Estudios con antecedentes de investigación similares

<b>Nombre del Estudio</b>	<b>Tipo</b>	<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>URL/ DOI</b>
Chapter Two - Fundamentals of Gasification and Pyrolysis	Libro	Simona Ciuta, Demetra Tsiamis, Marco J. Castaldi	2018	<a href="https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812716-2.00002-9">https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812716-2.00002-9</a>
Valorization of Biomass Gasification Char as Filler in Polymers and Comparison with Carbon Black	Artículo	V. Benedetti, M. Scatto, M. Baratieri, P. Riello	2020	<a href="https://doi.org/10.1007/s12649-020-01243-7">https://doi.org/10.1007/s12649-020-01243-7</a>
Effect of selected representative biomass gasification tar compounds on Ni-GDC solid oxide fuel cells	Artículo	A. Cavalli, P.V. Aravind	2021	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.188">https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.188</a>
Gasification and Power Generation Characteristics of Rice Husk, Sawdust, and Coconut Shell Using a Fixed-Bed Downdraft Gasifier	Artículo	Md. Emdadul Hoque, Fazlur Rashid y Muhammad Aziz	2021	<a href="https://doi.org/10.3390/su13042027">https://doi.org/10.3390/su13042027</a>
Complex microstructural evolution in high temperature pyrolysis of plastic and biomass	Artículo	Kwang-Hyun Ko, Tae-Jun Park, Veena Sahajwalla, Aditya Rawal	2020	<a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120153">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120153</a>
Brewers' spent grain (bsg): bioresidual with potential application at functional, material, and energetic level	Artículo	Clara Inés Camacho Villanueva y Carlos David Grande Tovar	2020	<a href="http://doi.org/10.15665/rp.v19i1.2472">http://doi.org/10.15665/rp.v19i1.2472</a>

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

## **2.2. Referencias Teóricas**

### **2.2.1. Cebada**

La cebada es un cultivo importante en el mundo, ocupando el cuarto lugar entre los cereales y el quinto en general en millones de toneladas producidas por año, desde su Página 7 de 24 inicio ha tenido gran impacto en su producción en general, como se puede destacar de la producción mundial de cebada, promediada durante los primeros 11 años del siglo XXI, se estimó en un promedio de 141 millones de toneladas por año.

La cebada ha tenido muchos y diversos usos, que han evolucionado, aumentado y disminuido durante milenios desde la época de la caza y la recolección, pasando por el desarrollo de la agricultura, hasta la actualidad. El nombre científico o latino de la cebada, *Hordeum vulgare* L posee una relación propuesta por quien otorgo el nombre a dicho cereal, *Hordeum* deriva de *hordearii*, el nombre en latín de los gladiadores, y se traduce como "hombres de cebada".

Esto se debe a que la cebada era un componente primario de la dieta de entrenamiento de los gladiadores, lo que les daba fuerza, resistencia y grasa subcutánea (Ullrich, 2014, pág. 3). La cebada se emplea como alimento para el ganado, tanto en grano como en verde para el forraje.

No obstante, pese a que una de sus principales aplicaciones está relacionada en las raciones del ganado y de las aves, se utiliza en gran escala en muchas industrias, como la más conocida fabricación de la cerveza. (Aguado, 1957, pág. 8)

### **2.2.2. Cerveza**

La cerveza es una bebida verdaderamente internacional, producida y comercializada a nivel mundial; es la bebida alcohólica más consumida en el mundo y ocupa el tercer lugar después del agua y el té. La 'cerveza' puede describirse simplemente como "una bebida alcohólica hecha esencialmente mediante la fermentación de extractos ricos en azúcar que se originan a partir de una variedad de almidones vegetales". Hoy en día, la mayor parte de la cerveza elaborada se deriva de granos de cereales, que han sido parcialmente germinados (maltados). El bagazo cervecero representa el 85 % de todos los residuos producidos en la industria cervecera y se genera a en la etapa de filtración y separación del mosto y grano de cebada. (Elsevier Ltd, 2015, pág. 1)

### **2.2.3. Briqueta**

Se considera un conglomerado de materia de forma rectangular generalmente, empleado como combustible, estas formaciones de carbono generalmente usan como componente principal, materia orgánica, la fabricación de briquetas puede verse como un proceso de tratamiento físico, en el que los finos de carbón se extruyen bajo presión y temperatura apropiadas para producir briquetas altamente termoestables y con bajo contenido de humedad, de acuerdo con las propiedades específicas del carbón estas pueden emplearse de diferentes módulos de briquetas y por lo tanto, las briquetas tienen diferentes formas, como elipsoide, medio elipsoide, cilindro y esfera, etc. (Zhuo et al., 2021, pág. 1)

### **2.2.4. Biomasa**

La biomasa se considera un recurso renovable que cubre una amplia gama de materiales con un potencial energético significativo. Alrededor de 100 tipos de materiales de biomasa han sido reportados en la literatura para aplicaciones de pirólisis considerados desde residuos agrícolas como: aserrín de madera y bagazo, hasta desechos industriales como: lodos de papel (Kan et al., 2020, pág. 2)

#### *2.2.4.1. Biomasa forestal*

La biomasa se considera un recurso renovable que cubre una amplia gama de materiales con un potencial energético significativo. Alrededor de 100 tipos de materiales de biomasa han sido reportados en la literatura para aplicaciones de pirólisis considerados desde residuos agrícolas como: aserrín de madera y bagazo, hasta desechos industriales como: lodos de papel (Kan et al., 2020, pág. 1)

#### *2.2.4.2. Biomasa agrícola*

Este tipo de biomasa originaria de los residuos de la producción agrícola estos son principalmente las pajas de cereal, y del cañote del maíz. Esta Biomasa se caracteriza por su fuerte carácter estacional y por la variabilidad de la producción que hace del producto muy variable en el precio. (Peña, 2019, pág. 27)

### *2.2.4.3. Biomasa de malta*

El bagazo de malta se genera en la etapa de filtración del mosto, donde se considera como residuo en el proceso de elaboración de la cerveza, este se obtiene como subproducto obtenido en la etapa de clarificación del mosto, caracterizado por conservar el 30% de las propiedades del grano de malta sin gastar. El BSG es considerado como una fuente de biomasa de alto contenido de humedad y residuos glucoproteicos que brindan un medio propicio para la proliferación de microbiota bacteriana forastera. (Camacho y Grande, 2021, pág. 3).

## **2.2.5. 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, teniendo esto en cuenta aparecen parámetros y condiciones dependientes del tipo de biomasa utilizada no obstante las generales son:

### *2.2.5.1. Composición química*

La composición química de la biomasa original se puede determinar al realizar un análisis de los elementos más importantes, como carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), más conocido este proceso como prueba de CHON. La proporción de los elementos será dependiente del tipo de materia que se utiliza por lo general la biomasa posee una parte orgánica, una inorgánica y agua. Al generar la combustión de la briqueta, la parte orgánica será la que combustiona y la inorgánica influirá en el comportamiento de la combustión generando residuos de ceniza. (Ulrich, 2014, pág.4)

### *2.2.5.2. Contenido de humedad*

Cuanto menor sea el contenido de humedad, mejor será el poder calorífico de la biomasa y su proceso de combustión, puesto que, durante el proceso de combustión de la biomasa, primero se requiere evaporar el agua que posee antes de que el calor esté disponible, gran parte de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad relativa inferiores al 30%. Con valores superiores se requiere la implementación de operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía. La humedad relativa es la relación existente de la cantidad de agua contenida por kilogramo de materia seca, esta puede medirse en base húmeda (H) o base seca (h), se requiere considerar el peso seco y húmedo de la materia. (Herguedas, 2012, pág. 17)

Humedad base seca:

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps}$$

Humedad base húmeda:

$$H = \frac{Ph - Ps}{Ph}$$

### 2.2.5.3. Porcentaje de ceniza

Establece una relación que indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia.

### 2.2.5.4. Poder calorífico

El contenido energético de la materia se mide en función del poder calorífico de esta, el poder calorífico por unidad de masa es el aspecto que determina la energía disponible en la biomasa y se expresa como la cantidad de energía por unidad física (joule por kilogramo). (Herguedas, 2012, pág. 17)

$$PCI = PCS - 2.5(9H + H_2O)$$

*Donde:*

PCI= Poder calorífico inferior

PCS=Poder calorífico superior

2.5=Calor de condensación del agua a 0 C

9= kilos de agua formado al oxidar un kilo de hidrogeno

H= Tanto por uno de hidrogeno en el combustible

H<sub>2</sub>O= Tanto por uno de humedad en el combustible

### 2.2.5.5. Densidad aparente

Se establece como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico. Los combustibles que tienen una densidad aparente elevada favorecen la relación de energía por unidad de volumen, ya que se requieren menores tamaños de los equipos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Por el contrario, las materias primas de baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte. (Herguedas, 2012, pág. 16)

#### *2.2.5.6. Porcentaje de fibra*

La fibra es un polisacárido importante en la cebada, está constituida principalmente por celulosa, asociada con distintas hemicelulosas y lignina, el tipo de extensión de esta aglomeración determina la existencia de genotipos cubiertos y desnudos (Pazmiño, 2011, pág. 12). Por lo general el contenido de fibra en la cebada es de 3.0-5.9%, esto dependerá y variará del tipo de cebada que se emplee, en este caso por ser ricas en carbohidratos y poseer bajo contenido de cenizas, grasas, proteínas y fibra, lo hace apto para la industria cervecera. (López et al., 2007, pág. 3)

### **2.2.6. Conversión de la materia en energía**

La manera de transformar la biomasa en energía depende, principalmente, del tipo de biomasa que se esté usando y del destino que se quiera dar a esta energía. El sector bioenergético posee tres modos de usar la energía: como calefacción, como generación eléctrica y para producción de biocombustibles.

#### *2.2.6.1. Gasificador*

Este es el principal equipo en una planta de gasificación, es el encargado de obtener la composición del gas deseada y de garantizar una producción estable para las aplicaciones aguas abajo. Estos equipos se clasifican de acuerdo con el método de contacto que se utilizan entre las fases sólida (biomasa) y gaseosa (agente oxidante), de acuerdo con el tipo de contacto, las características y capacidades de los reactores difieren de manera significativa y pueden agruparse en tres tipos: gasificadores de lecho fijo, lecho fluidizado y de arrastre. (Arteaga et al., 2014, pág. 2)

**Tabla 2-2:** Parámetros de tipos de gasificadores

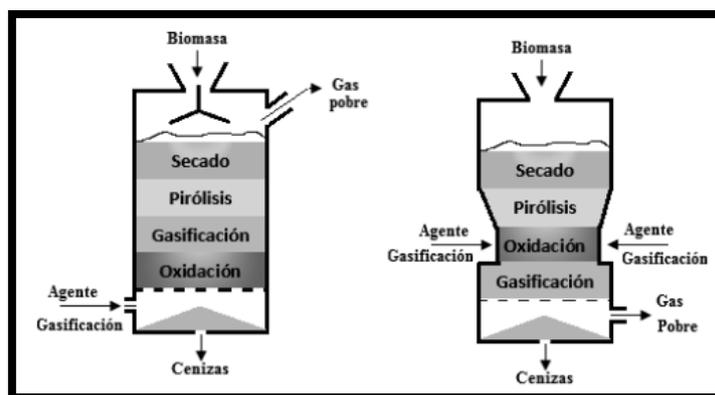
PARAMETRO	LECHO FIJO/MOVIL	LECHO FLUIDIZADO	ARRASTRE
Aplicación	Baja	Media	Alta
Tamaño de partícula	< 51mm	< 6mm	< 0.15mm
Temperatura de salida	450 – 650°C	800 –1000°C	>1260°C
Tolerancia	Carbón	Carbón y biomasa	Carbón
Temperatura reacción	1090 °C	800 –1000°C	1990°C
Requerimiento de vapor	Alta	Media	Baja
Naturaleza de cenizas	seca	seca	lodo
Eficiencia de gas frío	80%	89%	80%
Problemas operación	Produce alquitrán Los finos elevan la caída de presión	Conversión de carbón	Enfriamiento del gas

Fuente: Luis Arteaga, 2014.

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

### 2.2.6.2. Gasificador de lecho fijo/móvil

En este tipo de reactores de lecho fijo, las fases se ubican en contacto de acuerdo con el modelo del flujo en pistón, la biomasa se desplaza lentamente como un pistón mientras se pone en contacto con un flujo de agente oxidante. Según la dirección del flujo de la biomasa, estos reactores pueden ser de flujo ascendente y descendente. En estos reactores permite tratar tamaños de partículas que oscilan desde 1 hasta 100 mm. (Arteaga et al., 2014, pág. 4)

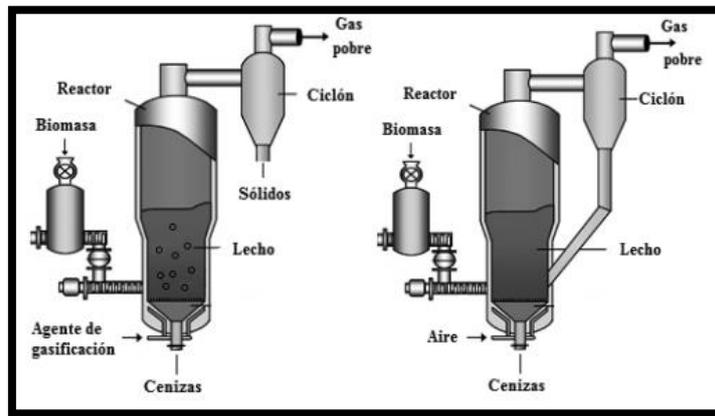


**Ilustración 2-1:** Gasificadores de lecho flujo ascendentes y descendentes

Fuente: (Arteaga et al. 2014)

### 2.2.6.3. Gasificador de lecho fluidizado

Los gasificadores de lecho fluidizado poseen un excelente mezclado entre las fases y una distribución homogénea de temperaturas. El lecho está ajustado por un material granular que puede ser inerte (arena de sílice) o uno con propiedades catalíticas (olivinas). Estos equipos son ventajosos para transformar la biomasa y su producción de alquitranes puede variar de 1 a 50 g/Nm<sup>3</sup>, por lo que se promedia con fines prácticos a 10 g/Nm<sup>3</sup>. Hay dos tipos fundamentales de lecho: burbujeante y con recirculación (Arteaga et al., 2014, pág. 4).



**Ilustración 2-2:** Gasificadores burbujeante y con recirculación

Fuente:(Arteaga et al. 2014).

En los reactores de lecho burbujeante el agente oxidante se alimenta por el fondo y conforma el medio de fluidización. Las partículas de la biomasa se colocan en contacto con el lecho anteriormente calentado ocasionando un rápido secado y posterior pirólisis. En estos equipos la conversión de carbón no es completa debido al mezclado continuo por lo que las partículas que dejan el reactor están total o parcialmente gasificadas.

En los gasificadores de lecho circulante están conformados por un lecho para la transformación de la biomasa, un ciclón y un dispositivo para la recirculación de sólidos. La velocidad de fluidización (3.5 - 5.5 m/s) es mucho más rápida a la de los lechos de burbujeo (0.5 - 1 m/s) y con la recirculación deben mantener el reactor en régimen de fluidización rápida. (Arteaga et al., 2014, pág.4)

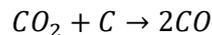
#### 2.2.6.4. Gasificador con arrastre

Estos equipos son ideales para la integración con ciclos combinados. Trabajan a 1400 °C de temperatura y presiones de 20 – 70 bar. La velocidad del gas es tal que la transferencia de masa es fácil y rápida, aunque el consumo es un 20% superior que los sistemas que trabajan de manera seca, la transferencia de calor al gas muy rápida y este alcanza la temperatura de reacción inmediatamente, no obstante, en el caso de la fase sólida se comporta como un pistón. (Arteaga et al., 2014, pág. 4)

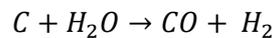
#### 2.2.6.5. Reacciones de gasificación

En la zona de reducción, muchas reacciones químicas a alta temperatura ocurren en ausencia de oxígeno. Utilizando el proceso de gasificación, para la biomasa como reserva de nutrientes, el primer paso de este proceso es la descomposición termoquímica. Compuestos lignocelulósicos con rendimiento y rendimiento variables. Las reacciones que ocurren en la gasificación por reducción se describen a continuación. (Balat, 2009, pág. 519)

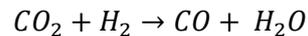
- Reacción de Boudouard:



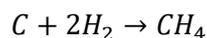
- Reacción agua-gas:



- Reacción de cambio de agua:



- Reacción de producción de metano:



#### 2.2.7. Combustión

El proceso de combustión requiere de dos etapas, que son la desvolatilización y la combustión volátil. Estas etapas dependerán de la estructura física modificada y la morfología de la superficie de la biomasa por peletización, esto puede afectar la desvolatilización de la biomasa y causar una variación en el rendimiento y características del biocarbón, como resultado se tiene una combustión diferente en el comportamiento la comparación con el biocarbón derivado de la biomasa cruda. (Mian et al. 2020)

### **2.2.8. Pirólisis**

Este es un proceso de degradación térmica que transforma los desechos sólidos en combustibles de forma gaseosa, líquida y sólida, este ocurre en ausencia de oxígeno, de tal manera que es uno de los procesos termoquímicos que puede convertir los materiales sólidos en el combustible líquido llamado aceite de pirólisis. Además, se producen gases y carbón como coproductos del proceso de pirólisis como resultado de la presencia abundante de hidrocarburos gaseosos, hidrógeno y CO. (Li et al. 2020)

## **CAPÍTULO III**

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Tipo de estudio**

El tipo de estudio de este trabajo de investigación se considera exploratoria, puesto que se trata de obtener una valoración de energía resultante de un proceso de gasificación y para ello se requiere delimitar a través de la selección de biomasa, e implementar el proceso de gasificación. También se considera exploratoria, ya que no existe mucha investigación referente al tema, siendo esta una de las razones por las que se pretende realizar este estudio.

#### **3.2. Enfoque de investigación**

El presente trabajo de titulación optará por dos posturas de investigación: cualitativo y cuantitativo.

##### **3.2.1. Enfoque de investigación cualitativo**

Cualitativo, se plantea este enfoque en función de ciertos aspectos a considerar durante el desarrollo del trabajo, tomando como punto de partida la caracterización de la briqueta a través de análisis físicos y químicos, donde permitirá tener una referencia en el enfoque general de los resultados como la cantidad y calidad, obtenidos durante el proceso.

##### **3.2.2. Enfoque de investigación cuantitativo**

Se establece este tipo de enfoque en el desarrollo del trabajo puesto que se requiere analizar la información de manera cuantitativa y a través de esta un análisis estadístico que permita plantear las variables involucradas y la información en relación con los resultados recolectados durante el proceso, esto con aspectos y variables relevantes como el comportamiento de la temperatura durante un intervalo de tiempo y como este comportamiento infliere al análisis de la valoración energética.

### **3.3. Nivel de Investigación**

#### **3.3.1. Investigación Exploratoria**

Se plantea una investigación exploratoria, puesto que el tema planteado es poco estudiado y se requiere profundizar este tema a través una investigación pertinente en relación con una revisión bibliográfica que permita el fácil manejo y planteamiento de información con respecto a procesos o análisis semejantes a los que se desarrolla en este trabajo.

#### **3.3.2. Investigación Descriptiva**

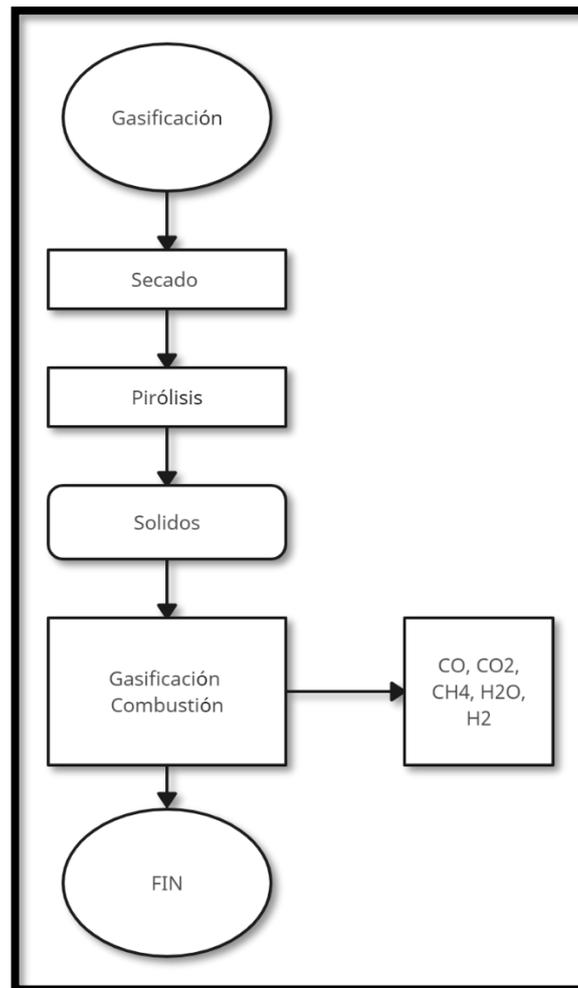
Descriptiva, este trabajo de investigación requiere describir ciertos aspectos, del mismo modo detallar ciertos procesos que se requieren, con el fin de alcanzar los resultados propuesto, esto en relación con el proceso e interacciones que se produce durante el desarrollo de este.

#### **3.3.3. Investigación Explicativa**

Se considera de investigación experimental puesto que se requiere tomar ciertas variables como sujeto de experimentación, es decir a través de la variación de estas, se pretende encontrar una interacción donde el resultado sea el más óptimo en relación a recursos requeridos y gas producido, además el fin de obtener un gas está ligado a ciertas variables que determina que tan factible y aprovechable puede ser el gas resultante, es por ello que se pretende determinar pruebas proximales, caracterización de la biomasa empleada, con el fin de encontrar una relación entre variables.

### **3.4. Diseño de investigación**

El tipo de diseño realizado en el trabajo de investigación es de tipo completamente aleatorio, puesto que las variables involucradas al proceso de gasificación son estándares en un rango, no obstante, la variación generada parte de alterar el rango en cada interacción.



**Ilustración 3-1:** Diagrama de procesos de gasificación

**Realizado por:** Tapia Diego, 2024.

A través del diagrama de proceso, se puede ver las etapas de gasificación que se seguirá, partiendo por el secado, al entrar en la cámara de alimentación y establecer la cama de carbón, la materia utilizada tiende a secarse, la temperatura aumenta a nivel de cámara, como resultado del aumento de temperatura el proceso de pirólisis empieza desde la parte donde el contacto con el carbón y materia es próximo dando lugar a la etapa de sólidos. En respuesta al proceso de pirólisis a altas temperaturas, la materia tiende a compactarse asemejando a carbón.

El proceso de gasificación empieza desde la primera etapa, siendo provocada por la combustión de la materia, este gas compuesto de (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub>) y más componentes que serán muy dependientes del tipo de masa empleada para el proceso de gasificación

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

	<b>Gasificación 1</b>	<b>Gasificación 2</b>	<b>Gasificación 3</b>
<b>Variabes</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>
Temperatura	T1	T2	T3
Flujo de aire	Fa	Fa	Fa
Cantidad de agua	C1 H2O	C2 H2O	C3 H2O
Cantidad de biomasa	Cm 1	Cm 2	Cm 3

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Se presenta el diseño experimental, donde se realizó tres pruebas, en cada una de ellas se maneja variaciones con el fin de determinar cuál de ellas tiende a presentar los mejores resultados, estas pruebas se los realizara con bagazo de cebada, siendo las variaciones en las pruebas directamente proporcionales a los resultados obtenidos.

**Tabla 3-2:** Resumen variables dependientes

<b>Variabes Dependientes</b>	<b>Gasificación 1</b>	<b>Gasificación 2</b>	<b>Gasificación 3</b>
Cantidad de Ceniza	CC	CC	CC
Cantidad de Alquitrán	Alquitrán 1	Alquitrán 2	Alquitrán 3
Cantidad de Gas	CG	CG	CG

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Para identificar las variables del proceso de mejor manera, se plantea la siguiente interpretación del diseño propuesto, donde se plantea el modelo de las variables involucradas en el proceso de gasificación y las variables resultantes de dicho proceso, necesarias para plantear una relación de resultados con recursos empleados, de tal manera que facilite la interpretación.

### **3.4.1. Identificación de variables**

#### *3.4.1.1. Variables independientes*

- Tipo de biomasa
- Proceso de gasificación

### 3.4.1.2. Variables dependientes

- Composición del Gas
- Cantidad de Cenizas

## 3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

### 3.5.1. Caracterización de briquetas y pruebas de CHON

#### 3.5.1.1. Obtención de la briqueta a partir de los residuos agroindustriales.

**Tabla 3-3:** Obtención de briqueta a partir de residuo agroindustrial

<b>Materiales:</b>	<b>Sustancias y Reactivos:</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Secador de bandejas</li><li>• Triturador de sólidos</li><li>• Tamiz</li><li>• Máquina briquetadora.</li><li>• Molino</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bagazo de cebada</li></ul>
<b>Procedimiento:</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Reducir la humedad de la materia a través del secador de bandeja.</li><li>2. Triturar y pulverizar la materia secada</li><li>3. Tamizar los residuos triturados</li><li>4. Mezclar una pequeña cantidad de agua con la materia tamizada y almidón.</li><li>5. Compactar la masa resultante a través de una maquina briquetadora</li><li>6. Secar la briqueta en el secador de bandejas</li></ol>	

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

#### 3.5.1.2. Análisis de CHON

Determinar los componentes elementales del hidrógeno y oxígeno de la biomasa

**Tabla 3-4:** Análisis elemental del hidrogeno y oxigeno

<b>Materiales:</b>	<b>Sustancias y Reactivos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analizador elemental de Dumas</li> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Crisoles</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Guantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bagazo de cebada</li> </ul>
<b>Procedimiento:</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tomar una muestra del compuesto en el crisol.</li> <li>2. Colocarlo en la bandeja del equipo.</li> <li>3. Prender el equipo</li> <li>4. Esperar los datos resultantes del equipo.</li> </ol>	

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

### 3.5.2. Determinación de análisis proximales de la biomasa

#### 3.5.2.1. Determinación del contenido de humedad.

Establecer la relación existente de la cantidad de agua contenida por kilogramo de materia.

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

<b>Materiales:</b>	<b>Sustancias y Reactivos:</b>	<b>Cálculos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Desecador</li> <li>• Estufa de secado</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Guantes</li> <li>• Capsulas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bagazo de cebada</li> </ul>	$h = \frac{Ph - Ps}{Ps}$ <p><b>Donde:</b> Ph= Peso húmedo Ps=Peso seco</p>
<b>Procedimiento</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Preparar la muestra</li> <li>2. Pesar la capsula tarada</li> <li>3. Colocarlo en una capsula</li> <li>4. Dejar la muestra en la estufa durante un día a 100 C</li> </ol>		

5. Colocar la muestra en el desecador
6. Cuando la muestra tenga temperatura ambiente, retirar y pesar.

Realizador por: Tapia Diego, 2024.

### 3.5.2.2. Pruebas de porcentaje de cenizas

Relación que indica la cantidad de materia solida no combustible por kilogramo de materia.

**Tabla 3-6:** Pruebas de porcentaje de ceniza

<b>Materiales:</b>	<b>Sustancias y Reactivos:</b>	<b>Cálculos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crisol</li> <li>• Estufa</li> <li>• Guantes</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Balanza digital</li> <li>• Desecador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bagazo de cebada</li> </ul>	$\%C = \frac{m1 - m}{m2 - m} * 100$ <p><b>Donde:</b>  m= masa del crisol tarado (g)  m1= masa del crisol después de la incineración de la muestra (g)  m2= masa del crisol antes de la incineración de la muestra (g)</p>
<b>Procedimiento:</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tarar los crisoles durante tres horas a 110 °C, retíralas y colocarlas en desecadores por 20 min y pesarlas</li> <li>2. Pesar de (2-2,5) gr y acto seguido se procede a colocarlos en el reverbero en la Sorbona para realizar su calcinación</li> <li>3. Trascurrido el tiempo evidenciar que ya no salga humo de las muestras y retíralas hasta la temperatura ambiente</li> <li>4. Transferir las muestras a la mufla realizar la incineración a una temperatura aproximada de 500°C-550°C en un lapso de 24 horas</li> <li>5. Retirar de la mufla, dejar enfriar y realizar el peso final</li> </ol>		

Fuente: (Jama, 2022)

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

### 3.5.2.3. Pruebas adicionales

Puesto que las pruebas de ceniza hubo complicaciones al trabajar con briquetas se plantea una prueba breve para identificar la mejor materia para el proceso.

**Tabla 3-7:** Pruebas adicionales planteadas

<b>Materiales:</b>	<b>Sustancias y Reactivos:</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Velas</li><li>• Carbón</li><li>• Encendedor</li><li>• Mufla</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bagazo de cebada</li><li>• Briquetas de bagazo de cebada</li></ul>
<b>Procedimiento:</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Encender una porción de carbón</li><li>2. Añadir la biomasa y briquetas por separado</li><li>3. Observar</li><li>4. Comparar resultados implementando una mufla en caso de ser necesario destacar diferencias</li></ol>	

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

### 3.5.3. Gasificación

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

<b>Materiales:</b>	<b>Sustancias y Reactivos:</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Gasificador</li><li>• Guantes</li><li>• Mascarilla</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bagazo de cebada</li></ul>
<b>Procedimiento:</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Agregar agua en el sello de agua</li><li>2. Conecte la corriente a 220 V</li><li>3. Encender la cama de fuego, con carbón.</li><li>4. Después de la ignición la materia prima comienza a arder, es importante tener en cuenta que ciertas zonas deben arder por completo.</li><li>5. Colocar la segunda alimentación con la biomasa, llenando toda la cámara de alimentación.</li></ol>	

6. Cerrar la compuerta y monitorear todo el proceso.
7. Verificar la salida del gas, encendiendo la hornilla del equipo.

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

**Realizado por:** Tapia Diego, 2024.

### 3.5.3.1. Gasificador

El gasificador JXQ-10A, es empleado en el desarrollo del presente trabajo de investigación para convertir la biomasa solida como es el bagazo de cebada, en gas de síntesis, es de tipo lecho flujo descendente. Utilizado en proceso de gasificación termoquímica para obtener productos como Monóxido de carbono, hidrogeno y en cantidades pequeñas, dióxido de carbono, metano y otros componentes.



**Ilustración 3-2:** Gasificador tipo JXQ-10A

**Fuente:** Tapia Diego, 2024.

Se requiere establecer parámetros de gasificación en el lugar donde se realizará la gasificación por ello se establece valores de presión y temperatura. El proceso de gasificación se lo realiza en la Provincia de Chimborazo, en la ciudad de Riobamba. Para ello se emplea la siguiente fórmula para determinar presión atmosférica y la densidad del aire de la zona.

$$P_{atm} = 101325 * \left( \frac{T_{amb} - 0.0065 * z}{T_{amb}} \right)^{5.256}$$

Considerando que Riobamba se encuentra a 2745 m sobre el nivel del mar (z) y la temperatura ambiente es de 22 °C (295.25 K), la presión atmosférica será:

$$P_{atm} = 101325 * \left( \frac{295.25 - 0.0065 * 2745}{295.25} \right)^{5.256}$$

$$P_{atm} = 72928 Pa$$

Presión atmosférica que permitirá determinar la densidad del aire mediante la siguiente formula

$$\rho_{aire} = \frac{P_{atm}}{R_d * T_{amb}}$$

Tomando en cuenta que  $R_d$  es la constante de gases, pero en aire seco se tiene que:

$$\rho_{aire} = \frac{72928 Pa}{0.287 * 10^3 (295.25)}$$

$$\rho_{aire} = 0.86 kg/m^3$$

### 3.5.3.2. Cantidad estequiométrica de aire

Teniendo en cuenta que el aire este compuesto principalmente de oxígeno y nitrógeno entre el 21% y 78% respectivamente junto con otros gases menos frecuentes, se necesita aire seco para lograr una combustión completa de un hidrocarburo por unidad de masa. Siguiendo la ecuación presentada a continuación:

$$m_{at} = 0.1153 * C + 0.3434 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 0.0434 * S \quad (2)$$

Donde:

$m_{at}$  = Masa del aire estequiométrico en  $\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$

C, H, O, S= porcentajes de los componentes en base seca

Para determinar los coeficientes estequiométricos a través de un análisis estequiométrico de la composición química, se utilizan valores porcentuales de la composición elemental de la biomasa a través de la siguiente ecuación.

$$G_{xi} = \frac{i}{100} \quad (3)$$

Siendo  $i$ , la composición de los elementos de manera porcentual dividido entre 100 para obtener la fracción gravimétrica  $G_{xi}$

### 3.5.3.3. Coeficiente de aire en exceso.

El exceso de aire, también llamado coeficiente de aire en exceso, indica la proporción de aire que se combina con el combustible durante la combustión. Se calcula como la relación entre la cantidad real de aire presente en la combustión y la cantidad teórica de aire requerida para quemar completamente el combustible.

$$EA = \frac{m_{ar}}{m_{at}} \quad (1)$$

Donde:

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

$$m_{at} = \text{Masa de aire teorico o estequiométrico} \frac{\text{kg aire}}{\text{kg de combustible}}$$

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

La relación entre el factor de exceso de aire y el índice de equivalencia es directamente proporcional, lo que implica que, al aumentar el factor de exceso de aire, también aumenta el índice de equivalencia. Este fenómeno se debe a que, al añadir más aire en exceso durante la combustión, se diluyen los gases y se reducirá la concentración de oxígeno alrededor del combustible. Por lo tanto, requerirá una mayor cantidad de combustible para quemar todo el oxígeno disponible y mantener una combustión completa.

$$ER(< 1.0)_{\text{gasificación}} = \frac{m_{ar}}{m_{at}} = EA(> 1.0)_{\text{combustion}} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\text{aire actual}}{\text{aire estequiometrico}}$$

Donde:

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

EA= Aire en exceso  $EA(> 1.0)$  La mezcla es pobre

### 3.5.3.5. Cantidad de aire para gasificar

La cantidad de aire necesaria para el proceso de gasificación variara según el análisis elemental de la materia y proporción estequiométrica deseada. Es crucial llevar a cabo un análisis exhaustivo y tener en cuenta las condiciones particulares de la gasificación para calcular con precisión la cantidad de aire optima.

$$m_{ag} = m_{at} * ER \quad (3)$$

Donde:

$$m_{ag} = \text{Masa de aire requerido para gasificar} \frac{\text{kg aire}}{\text{kg de combustible}}$$

$$m_{at} = \text{Masa de aire teorico o estequiométrico} \frac{\text{kg aire}}{\text{kg de combustible}}$$

$ER = \text{Relacion de equivalencia}$

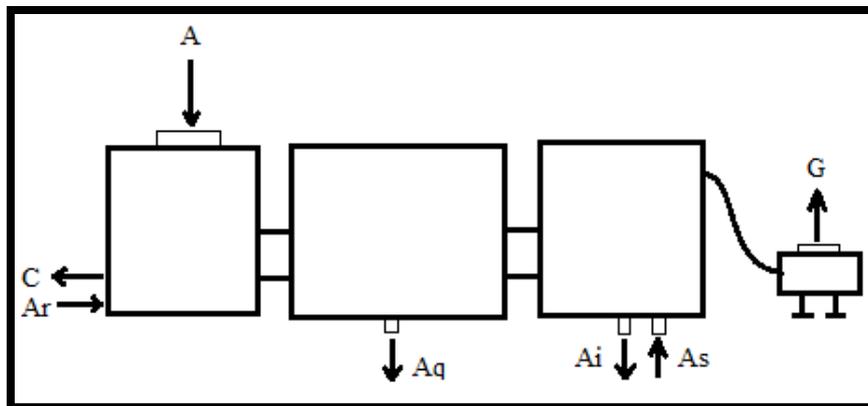
### 3.5.4. Cromatografía de gases

La cromatografía de gases (GC) es una técnica analítica ampliamente utilizada para separar y analizar compuestos volátiles y semivolátiles presentes en una mezcla. Esta técnica se destaca por su precisión, velocidad y sensibilidad excepcionales, lo que la convierte en una herramienta analítica muy popular. La GC se aplica extensamente en diversas industrias, como la ambiental, petrolera, química, de alimentos sólidos y líquidos, y farmacéutica, debido a su capacidad para identificar y cuantificar eficazmente los componentes de una muestra compleja. (Merk, 2024)

El análisis realizado a través de la cromatografía de gas de síntesis del bagazo de cebada se llevó a cabo a través de la norma ASTM D 194, titulada “Método de ensayo estándar para el análisis de hidrocarburos por cromatografía de gases”, la cual detalla los equipos necesarios, las condiciones de operación, los parámetros de calibración y criterios de validación.

### 3.5.5. Balance de masa del Equipo

Gasificador:



**Ilustración 3-5:** Gasificador tipo JXQ-10A diagrama

Fuente: Tapia Diego, 2024.

#### Donde:

A= Es la alimentación (Kg/h)

G= Salida del Gas (Kg/h)

C= Salida de Ceniza (Kg/h)

Ar= Flujo de aire (Kg/h)

Aq= Flujo de alquitrán (Kg/h)

Ai= Flujo de agua (Kg/h)

As= Flujo de agua (Kg/h)

#### Balance de masa

Entrada=Salida

$$mA + mAr + mAi = mG + mC + mAq + mAs$$

Donde:

$mA$ = flujo másico de biomasa (Kg/h)

$mAr$ = flujo másico de aire suministrado para el gasificador (Kg/h)

$mAi$ = flujo másico de agua suministrada (Kg/h)

$mG$ = flujo másico de gas producido (Kg/h)

$mC$ = flujo masico de ceniza producidas (Kg/h)

$mAq$ = flujo másico de alquitrán producido (Kg/h)

$mAs$ = flujo másico de alquitrán producido (Kg/h)

### 3.5.6. Análisis Estadístico

#### 3.5.6.1. Análisis de varianza Anova entre la fase sólida y gaseosa.

Método implementado para establecer la significancia de los resultados, es decir si se acepta o se rechaza la hipótesis.

Proceso:

1. Las observaciones son independientes y forman una muestra aleatoria, lo que implica que cada valor de la muestra se elige al azar y no guarda relación con otros valores en la muestra.
2. Respecto a las muestras, se requiere verificar si provienen de poblaciones con una distribución normal y una desviación estándar idéntica. En lugar de asumir esto, se debe confirmar mediante un análisis estadístico, la normalidad de esta distribución indicara que la población de origen de la muestra es normal.

**Tabla 3-9:** Esquema de elementos para el análisis estadístico ANOVA

<b>Fuente de variación</b>	<b>GL</b>	<b><math>\sum</math> de los cuadrados</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Entre grupos					
Error dentro de los grupos					
Total					

**Realizado por:** Tapia Diego, 2024.

3. La varianza es igual en cada grupo (homocedasticidad), esto implica que la variabilidad de los datos es uniforme en cada grupo analizado, lo que es importante en el análisis estadístico para garantizar validez de las comparaciones entre grupos.
4. La variable dependiente debe ser medida en una escala de intervalo, significa que los valores tienen un significado numérico y la diferencia entre ellos es insignificante.
5. Cuando hay más de una variable independiente, los efectos deben ser aditivos.

### *3.5.6.2. Prueba de Rangos Múltiples LSD*

El método LSD (Diferencia Mínima Significativa) de Fisher se utiliza en el análisis de varianza (ANOVA) para crear intervalos de confianza para todas las diferencias entre pares de medias de los niveles de los factores. Esto se hace controlando simultáneamente la tasa de error individual en un nivel específico. Posteriormente, el método LSD de Fisher emplea la tasa de error individual y múltiples comparaciones para calcular el nivel de confianza simultáneo para todos los intervalos de confianza. Este nivel de confianza simultáneo representa la probabilidad de que todos los intervalos de confianza contengan la verdadera diferencia entre medias. Es importante considerar la tasa de error por familia al realizar comparaciones múltiples, ya que las probabilidades de cometer un error de tipo I para una serie de comparaciones son mayores que la tasa de error de cualquier comparación individual por separado.

## CAPÍTULO IV

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

Este capítulo tiene como objetivo dar a conocer los resultados de las diversas pruebas propuestas, de igual forma un análisis e interpretación breve, con el fin de destacar el efecto de cada una en el proceso de gasificación.

#### 4.1. Análisis Físicoquímicos

**Tabla 4-1:** Resultado de pruebas de CHON

<b>Biomasa</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>O (%)</b>	<b>N (%)</b>
Bagazo de cebada	46.04	6	42.3	1.82

**Fuente:** (Barros et al. 2020)

**Realizado por:** Tapia Diego, 2024.

En la tabla 4-1 se aprecia los resultados obtenidos por medio de pruebas de CHON, estos valores fueron obtenidos mediante bibliografía, valores como 46.04% de carbono, de acuerdo con (Barros et al., 2020, pág. 1) el rango adecuado del porcentaje de carbono esta entre los 45 a 50%, siendo esta variación causa de la gran variedad que existe de la biomasa. También 6% de hidrogeno siendo este relacionado con bibliografía y comprobado por los parámetros establecidos por esta misma (Mamani Gutiérrez, 2001). Y Oxigeno y nitrógeno con 42.3% y 1.82% respectivamente, resaltando que los valores pueden variar entre una y otra por lo que se estima a través de la selección de tipo de cebada a tratar.

A través de estos resultados se puede determinar qué tan factible puede ser la biomasa para la generación del gas, puesto que al ser materia orgánica en si va a estar contenido de carbono y este mediante la ignición puede dar paso a la generación de otros gases como CO y CO<sub>2</sub> que podrían ser empleados para la generación de energía.

## 4.2. Pruebas Proximales

### 4.2.1. Cenizas

**Tabla 4-2:** Parámetros iniciales

Número de pruebas	Peso del crisol (g)	Peso de la muestra (g)	Peso final (g)
1	34.0209	5	39.0209
2	36.7415	5	41.7415
3	30.2563	5	35.2563

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Se parte de datos iniciales como la cantidad de sustancia, el peso del crisol y la suma de ambos como se muestra en la tabla 4-2, antes de calcar las muestras a una temperatura de 500 C durante 2 horas.

**Tabla 4-3:** Pesos de la ceniza

Tiempo (mins)	Peso Prueba 1	Peso Prueba 2	Peso Prueba 3
30	0.8741	0.9033	0.8439
60	0.4749	0.5008	0.4492
90	0.3061	0.2307	0.2241
120	0.1961	0.1554	0.1427
150	0.153	0.1598	0.1407
180	0.15	0.1564	0.1593

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

En la tabla 4-3 se puede observar la variación del peso inicial a lo largo del tiempo hasta llegar a un peso final, siendo el considerado para aplicarla en la ecuación 1.

$$\%ceniza = \frac{Peso\ final}{Peso\ inicial} * 100 \quad (4)$$

*Muestra 1*

$$\%ceniza = \frac{0.15\ g}{5\ g} * 100$$

$$\%ceniza = 3\%$$

*Muestra 2*

$$\%ceniza = \frac{0.1564}{5} * 100$$

$$\%ceniza = 3.128\%$$

*Muestra 3*

$$\%ceniza = \frac{0.1593}{5} * 100$$

$$\%ceniza = 3.186 \%$$

*% de ceniza*

$$\%ceniza = \frac{M1 + M2 + M3}{3}$$

$$\%ceniza = \frac{3 + 3.128 + 3.186}{3}$$

$$\%ceniza = 3.1046 \%$$

El resultado de porcentaje de ceniza obtenido es de 3.1046% como se muestra en la ecuación anterior, no obstante, esta puede variar, a comparación con el resto de los datos proporcionados por (Castillo et al., 2019, pág.3) donde se tiene que el porcentaje de cebada es de 2.61 % proveniente de Alina proveniente de un cruce y originaria de México siendo la que más cercano se encuentra con respecto al valor obtenido, también se toma en cuenta que factores como el tipo de cebada, el terreno donde se cultiva, el clima, los fertilizantes, entre otros. Elementos para considerar, pues afectan directamente en el resultado. No obstante, el resultado obtenido se encuentra dentro del rango adecuado referente a cebada.

#### 4.2.2. Porcentaje de Humedad

**Tabla 4-4:** Parámetros iniciales para el porcentaje de humedad

Número de pruebas	Peso de la muestra (g)	% de humedad
1	5.01	11.344
2	5.02	11.205
3	5.01	11.254

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

$$\%Humedad = \frac{\%M1 + \%M2 + \%M3}{3}$$

$$\%Humedad = \frac{11.344 + 11.205 + 11.254}{3}$$

$$\%Humedad = 11.2676 \%$$

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 4-4, se muestra que el porcentaje de humedad obtenido por cada muestra, siendo el promedio de estos 11.2676 % entrando en el parámetro adecuado para este tipo de biomasa, como lo es la cebada, según (Bolsa de comercio de Rosario, 2023. pág. 6) el porcentaje de humedad de la cebada óptimo es inferior al 12% para ser considerado de buena calidad.

#### 4.2.3. Porcentaje de fibras

**Tabla 4-5:** Datos obtenidos prueba de fibras

MUESTRA (W2)	BOLSA VACÍA (W1)	CRISOL TARADO	CRISOL + MUESTRA	FIBRA (%)
0.504	0.557	43.060	43.173	13.889
0.501	0.557	40.36	40.475	15.968
HUMEDAD (W3)	CENIZAS	CENIZAS	C1 (CENIZAS/BV)	
0.113	43.13	0.043	0.0772	
0.115	40.44	0.035	0.0628	

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Se obtiene un porcentaje de humedad en un rango de 13.889% y 15.968 % como se muestra en la tabla 4-5, siendo esta variación a causa del proceso industrial antes de ser categorizada como residuo, la levadura puede ser un factor para considerar como causa en la composición elemental y humedad. De acuerdo con (López et al. 2007, pág.1) el porcentaje de fibra más cercano al valor obtenido es de 8.2% correspondiente a Pastor Ortiz nombre de una de las variedades de cebada cultivadas en México, siendo la que mayor porcentaje de fibra posee. Además, se resalta que  $\beta$ -glucanos representa entre el 6-17% del grano fibra soluble manteniendo relación con la información obtenida de (Aga y Rodríguez, 2012, pág.1) donde dice que “La cebada es el cereal mejor dotado de fibra (17%) y sobre todo en fibra soluble”.

**4.2.4. Resultado de pruebas adicionales**

**Ilustración 4-1:** Comparación de pruebas

	
<p>Crisol expuesto a 500 °C (Briqueta)</p>	<p>Crisol expuesto a 400 °C (Biomasa)</p>
	
<p>Estructura de la briqueta resultante</p>	<p>Estructura de la biomasa resultante</p>

Realizado por: Tapia Diego, 2024

En la ilustración 4-1, se compara el resultado obtenido de las pruebas realizadas con la mufla, obteniéndose un resultado similar uno del otro, no obstante, al involucrar el tiempo y temperatura existe

una diferencia. La combustión de la biomasa empieza al poco instante de ser introducida en la mufla a una temperatura de 400 °C consumiéndose totalmente en un lapso de 3 minutos, mientras que la briqueta de cebada, al ser tan compacta no facilita la combustión produciendo una diferencia en el tiempo de combustión total de la materia. No obstante, para lograr el mismo resultado se requiere trabajar con temperaturas mayores siendo 500 °C la temperatura a la cual ambas empiezan a producción combustión sin embargo el consumo total de la materia difiere una de la otra en función al tiempo. En conclusión, para obtener un mayor rendimiento en la obtención del gas durante el proceso de gasificación es preciso trabajar con biomasa en lugar de briquetas pues que la obtención del gas depende directamente de la cantidad de materia que se consuma en un intervalo de tiempo.

### 4.3. Diseño Experimental del proceso de Gasificación.

**Tabla 4-6:** Parámetros de gasificación

<b>Parámetros de Gasificación</b>	
Tipo de gasificador	Downdraft (lecho de flujo descendente)
Agente gasificante	Aire
Densidad del aire	0.86 kg/m <sup>3</sup>
Cantidad de biomasa	5.2 kg (bagazo de cebada)
Tipo de biomasa para el arranque	Carbón
Cantidad de arranque	2 kg
Temperatura ambiente	22 °C
Presión atmosférica	72928 Pa

Realizado por: Tapia Diego, 2024

En la tabla 4-6 se resume los parámetros de gasificación, donde se detalla las condiciones con las que se trabajó durante el proceso de gasificación valores planteados y obtenidos de acuerdo con las condiciones en las que se trabaja.

#### 4.3.1. Proceso de Gasificación

En el siguiente cuadro se detalla de manera breve el proceso necesario para llevar a cabo la gasificación del bagazo de cebada. Cabe destacar que en este proceso se empleó la biomasa en lugar de las briquetas, puesto que se demostró una mejor viabilidad en combustión a diferencia de las briquetas.

**Tabla 4-7:** Proceso de gasificación.

<b>GASIFICACIÓN</b>	
Pesar la muestra	
Encender la materia de arranque (carbón), llevar al gasificador a una temperatura adecuada, con la ayuda de la combustión de carbón	
Colocar la biomasa en la cámara de alimentación	
Cerrar la compuerta y monitorizar al equipo.	
Añadir el agua necesaria al equipo de gasificación.	
A través de la estufa de gas, verificar si existe presencia de este a través de la ignición del gas.	
Recolectar la muestra del gas, mediante una funda tedlar	

Etiquetar y analizar en el laboratorio de cromatografía de gases.	
Recoger y pesar la fracción sólida residual (ceniza) y la líquida (agua)	

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

#### 4.3.2. Valoración energética de briquetas de bagazo de cebada

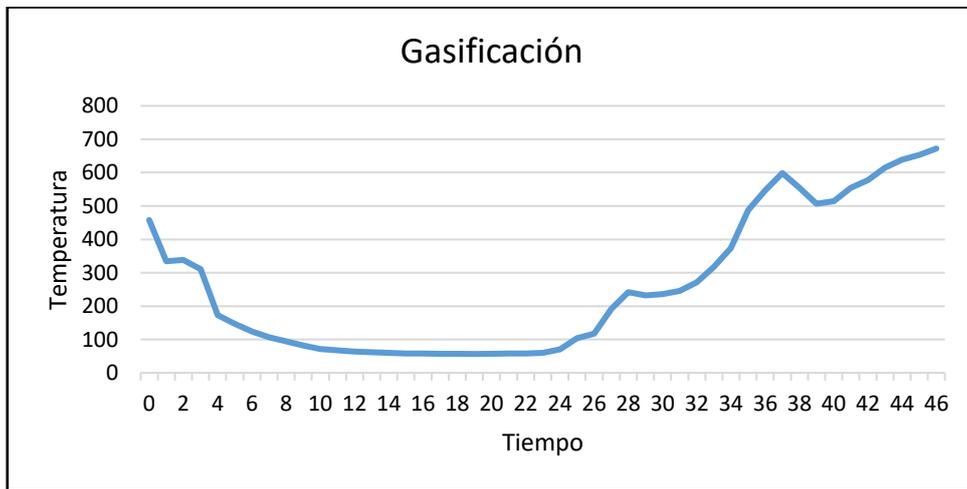
La toma de datos de la temperatura y el tiempo en el que se registro fue desde la adicción de la biomasa, para poder verificar información exacta como el tiempo y temperatura de producción de gas, el tiempo de encendido y apagado de la llama. Este inicio con una temperatura de 457.4 °C desde el contacto del carbón con la biomasa. El proceso general tuvo una duración de 1 hora siendo 40 minutos el tiempo de gasificación, proceso en el cual se realizó la prueba de encendido de la llama, esta verificación empezó a 11 minutos de haber añadido la biomasa en la cámara de combustión a una temperatura de 68 °C, no obstante el descenso de temperatura continuo pese a ya empezar la gasificación siendo la temperatura mínima de 56.7 °C a 8 minutos después de ya empezar a gasificar a partir de ese punto la temperatura empieza ascender siendo la última lectura al minuto 46 a una temperatura de 672.1 °C

**Tabla 4-8:** Datos del tiempo de gasificación vs temperatura.

Tiempo (min)	Temperatura (C)	Tiempo (min)	Temperatura (C)
0	457.4	24	70.9
1	334.8	25	103.9
2	338.2	26	117.2
3	310.3	27	190.8
4	173.1	28	241.4
5	147.3	29	232.6
6	124.2	30	235.9
7	107	31	245.5
8	94.2	32	271.1
9	82	33	317.7

10	71.4	34	374
11	68	35	487.6
12	64	36	546.9
13	61.4	37	598.3
14	59.5	38	554.3
15	58.4	39	507
16	57.6	40	514.2
17	57.3	41	554.6
18	57	42	577.5
19	56.7	43	614.5
20	56.9	44	638.8
21	57.6	45	653.2
22	58.2	46	672.1
23	60.4		

Realizado por: Tapia Diego, 2024.



**Ilustración 4-2:** Temperatura vs tiempo del proceso de gasificación

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Teniendo dos puntos a destacar siendo el minuto 11 a una temperatura de 68 grados Celsius el inicio de obtención de gas y encendido de la llama, manteniéndose encendida durante un tiempo de 40 minutos y el minuto 19, el punto más bajo en relación con temperatura, y la temperatura máxima registrada del equipo de 672.1 grados Celsius como se muestra en la ilustración 4-2.

$$G_{xi} = \frac{i}{100} \quad (3)$$

- Bagazo de cebada

$$G_{xC} = \frac{46.04}{100} = 0.4604 \text{ kg}$$

$$G_{xH} = \frac{6}{100} = 0.06 \text{ kg}$$

$$G_{xO} = \frac{42.3}{100} = 0.423 \text{ kg}$$

$$G_{xN} = \frac{1.82}{100} = 0.0182 \text{ kg}$$

Se requiere calcular el valor de masa de aire estequiométrico o teórico haciendo uso de la ecuación 2

$$m_{at} = 0.1153 * C + 0.3434 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 0.0434 * S \quad (2)$$

$$m_{at} = 0.1153 * 0.4604 + 0.3434 \left( 0.06 - \frac{0.423}{8} \right) + 0.0434 * 0$$

$$m_{at} = 0.0556 \text{ kg/kg}$$

Se utiliza el coeficiente de aire en exceso (EA) de 1.5 para combustibles sólidos (como la cebada), para determinar la cantidad de aire necesaria en exceso para la combustión. Con la ecuación 4 se calcula la masa del aire real que se utilizara en la combustión, tomando en cuenta el coeficiente del aire en exceso.

$$EA = \frac{m_{ar}}{m_{at}} \quad (5)$$

$$m_{ar} = EA * m_{at}$$

$$m_{ar} = 1.5 * 0.0556 \text{ kg/kg}$$

$$m_{ar} = 0.0834 \text{ kg/kg}$$

La eficiencia de la combustión del gas se determina comparando la masa del aire real con la masa del aire teórico utilizando la ecuación 5. Una mayor eficiencia de la combustión se logra cuando se utiliza

menos aire en exceso, lo que se refleja en una menor relación entre la masa del aire real y la del aire teórico.

$$ER(< 1.0)_{gasificación} = \frac{m_{ar}}{m_{at}} = EA(> 1.0)_{combustion} \quad (6)$$

$$ER(< 1.0)_{gasificación} = \frac{0.0834}{0.0556} = EA(> 1.0)_{combustion}$$

$$ER(< 1.0)_{gasificación} = 1.5 = EA(> 1.0)_{combustion}$$

Una vez establecido la ratio de equivalencia para gasificación, suele estar entre 0.2 a 0.25 para una gasificación tipo downdraft y si se dispone de la masa de aire teórico, se puede calcular la cantidad de aire necesario para llevar a cabo a gasificación utilizando la ecuación 6

$$m_{ag} = m_{at} * ER \quad (7)$$

$$m_{ag} = 0.0556 * 0.20$$

$$m_{ag} = 0.01112 \text{ kg/kg}$$

**Tabla 4-9:** Resultados del coeficiente de aire en exceso en el proceso de gasificación

<b>Parámetros</b>	<b>Bagazo de cebada</b>
$m_{at}$	0.0556
$m_{ar}$	0.0834
$m_{ag}$	0.01112
$\lambda(\text{coeficiente de aire en exceso})$	1.5

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

En la tabla 4-9, se presenta los resultados de la gasificación. Durante la gasificación de briquetas, observo un coeficiente de aire en exceso superior a 1, lo que indica la producción de un gas pobre con bajo poder calorífico. Estos hallazgos reflejan la relación entre la cantidad de aire real y la requerida para la combustión completa. Un valor de  $\lambda$  inferior a 1 indica una combustión con déficit de aire, mientras que un valor superior a 1 indica una combustión con exceso de aire.

### 4.3.3. Resultados del análisis cromatográfico del gas de síntesis.

Los análisis cromatográficos se llevaron a cabo siguiendo la norma ASTM-1945 en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Superior Politécnica Nacional. Los resultados de estos análisis se incluyen en la sección de anexos del informe, ANEXO A.

**Tabla 4-10:** Parámetros valorados en el análisis cromatográfico

Condiciones de Trabajo		
Parámetros	Valores	
Temperatura ambiente	20.2 °C	
%HR ambiente	30.9 %	
Temperatura de la muestra	64.5 F	18.1 °C
Presión de la muestra	0.7 psi	4895.3 Pa
Norma de referencia	ASTM D 1945: Cromatografía	
Procedimiento interno	PE-7.2-01	

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

A través de los parámetros descritos en la tabla 4-10 se puede determinar que la temperatura ambiente y humedad relativa son factores que pueden afectar la volatilidad de los componentes de la muestra. La temperatura de la muestra puede influir en la separación de los componentes o afectar la eficiencia del método. La presión en ciertos casos trabajar con una presión más alta puede mejorar la velocidad de separación. Estos parámetros son solo algunos de los muchos factores que puede influir en los resultados de un análisis cromatográfico.

**Tabla 4-11:** Composición del gas de síntesis de bagazo de cebada

Composición	Componente	% Moles	Desv. Std
	Hidrogeno	8.08	0.013
	Oxigeno	2.62	0.008
	Nitrógeno	64.86	0.299
	Monóxido de carbono	14.4	0.113
	Metano	0.77	0.028
	Dióxido de carbono	7.98	0.274
	Etano	0.32	0.009
	Agua	0.97	0.026

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

A través del análisis cromatográfico, se observó que el nitrógeno representa un 64.86% molar, lo que indica que se trabajó con una cantidad de aire mayor durante el proceso de gasificación o que esta clase de muestra no es adecuada para la obtención de gas de síntesis, de igual forma porcentaje en

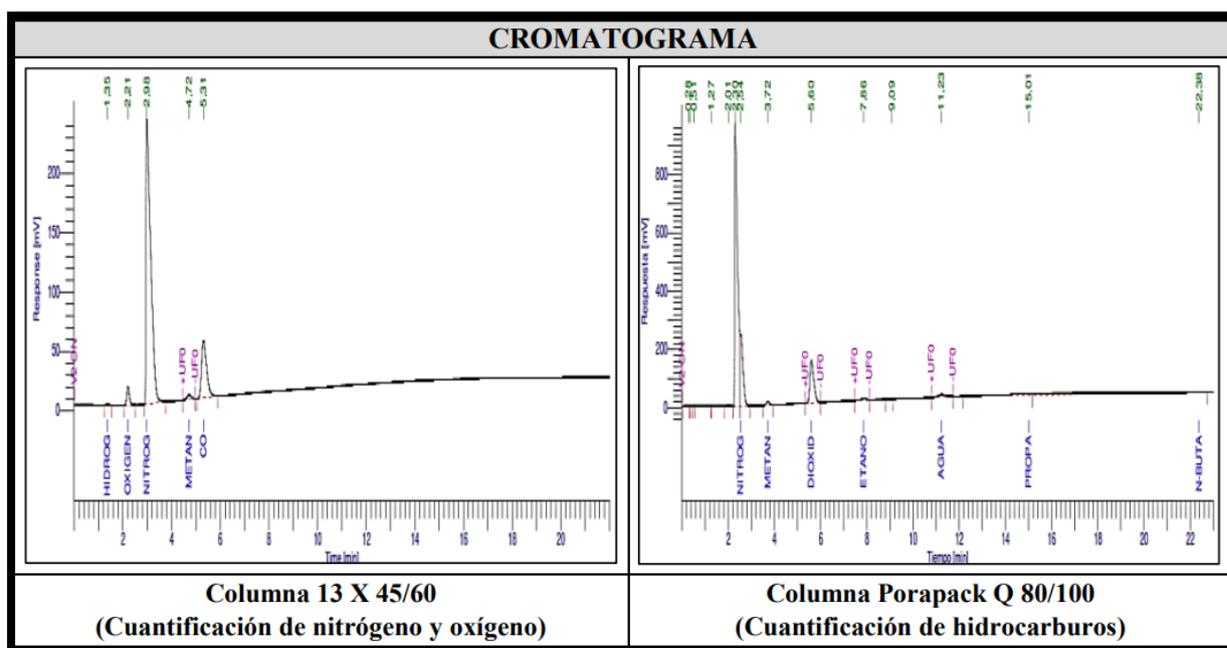
componentes como: hidrogeno 8%, oxigeno 2.62%, nitrógeno 64.86%, monóxido de carbono 14.4%, metano 0.77 y dióxido de carbono de 7.98%. Además, se menciona que esta concentración se encuentra dentro del rango de composición según la norma. Comparando con los resultados de la composición de un gas de síntesis en un gasificador tipo downdraft se muestra que la composición es: nitrógeno 53.4%, monóxido de carbono 21.1%, metano 2.9%, oxigeno de 0.4, dióxido de carbono 9.6 e hidrogeno 12.4%, tratándose de un gas proveniente de leña, valores referentes para la cantidad de nitrógeno que se obtuvo, no obstante, de acuerdo con (Balat, 2009, pág. 522) el rango para residuos empleados como carbón en un gasificador tipo downdraft se establece en un rango de los componentes como: nitrógeno 55-60%, Monóxido de carbono 28-31%, Metano 1-2%, Oxigeno 0%, dióxido de carbono 1-2% e hidrogeno de 5-10%, siendo valores a comparar más cercanos a los obtenidos no obstante, considerando que los componentes pueden variar debido a varios factores como, el agente oxidante empleado, la temperatura, la composición de la biomasa etc (Zuberbühler, 2005, pág. 7).

**Tabla 4-12:** Propiedades del gas de síntesis de bagazo de cebada

	<b>Componentes</b>	<b>Valores</b>
<b>Propiedades</b>	Densidad relativa	0.94
	Peso molecular promedio (g/mol)	27.2
	Densidad de la muestra (g/L)	1.15
	Poder calorífico superior (kJ/m <sup>3</sup> )	3215.21
	Poder calorífico inferior (kJ/m <sup>3</sup> )	2998.73
	Factor de compresibilidad (z)	1

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

En la tabla 4-12, se presenta las propiedades del gas obtenido por gasificación de bagazo de cebada, estas propiedades, involucran ciertos resultados en función al contenido que este posee, siendo el poder calorífico uno de ellos.



**Ilustración 4-3:** Cromatografía de gas de síntesis

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

En la ilustración 4-1, se indica la cuantificación de componentes como nitrógeno y oxígeno, también la cuantificación de hidrocarburos presentes en el gas de manera gráfica teniendo una relación directa con los componentes a destacar del gas, siendo el más evidente el porcentaje de nitrógeno presente.

#### 4.3.4. Poder calorífico inferior y superior

En la tabla 4-13, se aprecia los datos del poder calorífico superior (HLV) y del poder calorífico inferior (LHV), los cuales muestran una variación no significativa. Sin embargo, a comparación con resultados obtenidos por fuentes bibliográficas, existe una diferencia notable, dejando de lado factores externos como, el tipo de biomasa y condiciones de esta, se puede decir que el principal factor es el agente gasificante utilizado mostrando relación con los resultados obtenidos.

**Tabla 4-13:** Poder calorífico del bagazo de cebada

Biomasa	Poder calorífico superior (HLV)	Poder calorífico inferior (LHV)	Unidades
Bagazo de cebada	3215.21	2998.73	KJ/m <sup>3</sup>

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

La gasificación con aire genera un gas de baja calidad con un poder calorífico limitado, lo que restringe su utilidad en ciertos sectores industriales. En contraste, la gasificación con oxígeno produce un gas de

mejor calidad, con un poder calorífico superior. De acuerdo con (Telvia et al., 2001, pág.12) poder calorífico, el poder calorífico obtenido del bagazo de cebada es menor a 5500 kcal/m<sup>3</sup> representando un uso como combustible y energía eléctrica, no obstante, el proceso por el cual se obtuvo el gas es distinto, siendo el biodigestor de bagazo de cebada, la fuente de dicho gas. Según (Baquerizo, 2021, pág. 80) el poder calorífico puede variar de acuerdo con el material con el que se trabaje, teniendo en cuenta que son procesos diferentes es necesario establecer la comparativa con la capacidad calorífica del bagazo de caña según (Cabrera, 2013, pág. 124) el gas de síntesis del bagazo de caña obtenido de un proceso de gasificación presenta un poder calorífico de 5009 KJ/kg estando por encima del poder calorífico obtenido del bagazo de cebada 3215.21 KJ/m<sup>3</sup> (2795.83 KJ/kg), el valor más cercano al obtenido es 3679 KJ/kg poder calorífico del gas de síntesis de carbón de algarrobo presentando aun un alto poder calorífico.

#### 4.4. Balance de Masa

Flujo de la fracción solida

**Tabla 4-14:** Datos iniciales de gasificación

Número de pruebas	Cantidad de sustancia (Kg)	Tiempo de exposición (mins)	Temperatura de gasificación (°C)	Cantidad de agua (L)
1	3	60	220	10
2	3	60	250	11
3	5.2	60	68	12

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

En la tabla 4-14, se presenta los datos de partida en las tres pruebas especificando la cantidad de materia y agua empleada, la temperatura de gasificación.

**Tabla 4-15:** Datos de salida de gasificación

Gasificación	Cantidad de alquitrán resultante (L)	Cantidad de agua de salida (L)	Cantidad de Ceniza (Kg)
1	0.8	9	0.51
2	1	9	0.56
3	1.2	11	1.3

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Se presenta los datos de salida obtenidos del proceso de gasificación.

- Fracción sólida

$$E = S$$

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

Flujos máscicos del proceso de gasificación

Se debe calcular el caudal del flujo de aire que entra en la cámara de combustión.

Velocidad de aire empleada al gasificador= 9.5 m/s

Se determina el flujo de aire que entra en la cámara de combustión para el proceso de gasificación, para ello se toma en cuenta la velocidad de aire y el área por la que circula.

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

$$Q = 9.5 \text{ m/s} * \pi * 0.03175^2 \text{ m}$$

$$Q = 0.0300 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = 108.30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Entonces determinamos el flujo máscico de aire necesario para gasificar, utilizando la ecuación 3 donde interviene la densidad del aire por el caudal.

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

$$\dot{m}_{aire} = 0.86 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 108.30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{aire} = 93.138 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

### Gasificación 1.

Entradas:

- ✓ Flujo máscico de biomasa:

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

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

- Flujo másico de aire

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

$$\dot{m}_{aire} = 0.86 \frac{kg}{m^3} * 108.30 \frac{m^3}{h}$$

$$\dot{m}_{aire} = 93.138 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de agua

$$\dot{m}_{agua} = \frac{10kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{agua} = 10 \frac{kg}{h}$$

Salidas:

- Flujo másico del alquitrán

$$\dot{m}_{alquitran} = \frac{0.8kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{alquitran} = 0.8 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de cenizas

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{0.51kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = 0.51 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de agua

$$\dot{m}_{agua} = \frac{9kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{agua} = 9 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico del gas

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

$$\dot{m}_{gas} = (3 + 93.138 + 10 - 0.51 - 0.8 - 9)kg/h$$

$$\dot{m}_{gas} = 95.318 kg/h$$

**Tabla 4-16:** Resultados del balance de masa de la primera gasificación

Variables	Entradas	Variables	Salidas
flujo de biomasa (kg/h)	3	Flujo de alquitrán (kg/h)	0.8
flujo de aire (kg/h)	93.138	Flujo de ceniza (kg/h)	0.51
flujo de agua (kg/h)	10	Flujo de gas (kg/h)	95.828
<b>TOTAL</b>	<b>106.138</b>	Flujo de agua (kg/h)	9
		<b>TOTAL</b>	<b>106.138</b>

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

## Gasificación 2

Entradas:

- Flujo másico de biomasa:

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

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

- Flujo másico de aire

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

$$\dot{m}_{aire} = 0.86 \frac{kg}{m^3} * 108.30 \frac{m^3}{h}$$

$$\dot{m}_{aire} = 93.138 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de agua

$$\dot{m}_{agua} = \frac{11kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{agua} = 11 \frac{kg}{h}$$

Salidas:

- Flujo másico del alquitrán

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

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

- Flujo másico de cenizas

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{0.56kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = 0.56 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de agua

$$\dot{m}_{agua} = \frac{9kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{agua} = 9 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico del gas

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

$$\dot{m}_{gas} = (3 + 93.138 + 11 - 0.56 - 1 - 9)kg/h$$

$$\dot{m}_{gas} = 96.578 kg/h$$

**Tabla 4-17:** Resultados del balance de masa de la segunda gasificación

Variables	Entradas	Variables	Salidas
flujo de biomasa (kg)	3	Flujo de alquitrán (kg/h)	1
flujo de aire (kg/h)	93.138	Flujo de ceniza (kg/h)	0.56
flujo de agua (kg/h)	11	Flujo de gas (kg/h)	96.578
<b>TOTAL (kg/h)</b>	<b>107.138</b>	Flujo de agua (kg/h)	9
		<b>TOTAL (kg/h)</b>	<b>107.138</b>

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

### Gasificación 3

Entradas:

- Flujo másico de biomasa:

$$\dot{m}_{biomasa} = \frac{5.2kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{biomasa} = 5.2 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de aire

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

$$\dot{m}_{aire} = 0.86 \frac{kg}{m^3} * 108.30 \frac{m^3}{h}$$

$$\dot{m}_{aire} = 93.138 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de agua

$$\dot{m}_{agua} = \frac{10kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{agua} = 10 \frac{kg}{h}$$

Salidas:

- Flujo másico del alquitrán

$$\dot{m}_{alquitran} = \frac{1.2kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{alquitran} = 1.2 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de cenizas

$$\dot{m}_{cenizas} = \frac{1.3kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{cenizas} = 1.3 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico de agua

$$\dot{m}_{agua} = \frac{11kg}{1h}$$

$$\dot{m}_{agua} = 11 \frac{kg}{h}$$

- Flujo másico del gas

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

$$\dot{m}_{gas} = (5.2 + 93.138 + 12 - 1.3 - 1.2 - 11)kg/h$$

$$\dot{m}_{gas} = 96.838 kg/h$$

**Tabla 4-18:** Resultados del balance de masa de la tercera gasificación

Variables	Entradas	Variables	Salidas
flujo de biomasa (kg/h)	5.2	Flujo de alquitrán (kg/h)	1.2
flujo de aire (kg/h)	93.138	Flujo de ceniza (kg/h)	1.3
flujo de agua (kg/h)	12	Flujo de gas (kg/h)	96.838
<b>TOTAL (kg/h)</b>	<b>110.338</b>	Flujo de agua (kg/h)	11
		<b>TOTAL (kg/h)</b>	<b>110.338</b>

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Estas son las corrientes de entrada y salida de la tercera gasificación y a través de estas se puede observar que no existe perdidas ni ganancias de materia dentro del sistema, cumpliendo el principio de conservación de masa ya que la cantidad total entrante es igual a la cantidad total saliente.

**Tabla 4-19:** Resultado del balance de masa

	Balance de masa			
	Gasificación 1	Gasificación 2	Gasificación 3	Unidades
<b>Entradas (kg/h)</b>	106.138	107.138	110.338	Kg/h
<b>Salidas (kg/h)</b>	106.138	107.138	110.338	Kg/h

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

En la tabla 4-19 se muestra la recopilación de los distintos procesos que se llevó a cabo, cada una de las gasificación se pretendía encontrar la mejor condición en relación a los recursos requeridos teniendo en cuenta aspectos como el tiempo de gasificación y cantidad de masa empleada, siendo estas tomadas en cuenta para otros análisis, no obstante en cada una de ellas se realizó el balance de masa, en respuesta a esto se puede interpretar que se aplica la conservación de masa siendo las variables de entrada iguales a las de salida.

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

A través de un análisis estadístico, se pretende determinar si existe una diferencia significativa entre los procesos llevados a cabo para la investigación. Con el objetivo de demostrar si un factor influye significativamente en los resultados, se manipularon variables independientes para examinar su impacto con respecto a las variables dependientes en los procesos de gasificación. El análisis estadístico que se utilizó es el análisis de varianza (ANOVA), comúnmente empleado en este tipo de investigaciones, para ello se hace uso de la tabla 4-20, donde se detalla las variables dependientes como el flujo másico de entrada y variables independientes.

**Tabla 4-20:** Resumen de los resultados obtenidos en los procesos de gasificación

	<b>Gasificación 1</b>	<b>Gasificación 2</b>	<b>Gasificación 3</b>
<b>Variables de entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>
Temperatura de gasificación (°C)	220	250	68
Flujo de biomasa (kg/h)	3	3	5.2
Flujo de aire (kg/h)	93.138	93.138	93.138
Flujo de agua (kg/h)	10	11	12
<b>Variables de salida</b>	<b>Salida</b>	<b>Salida</b>	<b>Salida</b>
Flujo de alquitrán (kg/h)	0.8	1	1.2
Flujo de ceniza (kg/h)	0.51	0.56	1.3
Flujo de agua (kg/h)	9	9	11
Flujo de gas (kg/h)	95.828	96.578	96.838

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

#### 4.5.1. Anova

**Tabla 4-21:** Resumen Estadístico para Flujo másico de la fracción sólida y fracción gaseosa

	<b>Recuento</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>
Fracción Sólida	3	3.66667	1.1547	31.4918%	3.0	5.0	2.0
Fracción gaseosa	3	96.4147	0.524436	0.543938%	95.828	96.838	1.01
Total	6	50.0407	50.8065	101.53%	3.0	96.838	93.838

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

La tabla 4-21 contiene los detalles del análisis estadístico descriptivo. Se proporciona información sobre el promedio, la desviación estándar, los coeficientes de variación, los mínimos, los máximos y el rango de las fracciones sólidas y gaseosas.

**Tabla 4-22:** Análisis de varianza ANOVA para el flujo másico por Fracción sólida y gaseosa

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
Entre grupos	12903.3	1	12903.3	<b>16045.21</b>	<b>0.0000453</b>
Intra grupos	3.21673	4	0.804183		
Total (Corr.)	12906.5	5			

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

#### Prueba de hipótesis:

- **Hipótesis nula:** Las medias de tanto la fase sólida como la gaseosa son iguales

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

- **Hipótesis alternativa:** Al menos una de las fases es diferente

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

La tabla 4-22 muestra el análisis de varianza ANOVA, que divide la varianza de flujo másico de las dos fracciones sólidas y gaseosas en dos partes: una entre grupos y otra dentro de grupos. En este caso, la razón-F es 16045,21, un valor que describe el cociente entre las estimaciones dentro y fuera de grupos. Dado que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de flujo másico de la fracción sólida y la fracción gaseosa, con una confiabilidad del 95%, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) a favor de la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Esto se debe a que el valor-P de la prueba es menor que el nivel

de significancia de 0,05. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizó la prueba de rangos múltiples LSD.

#### 4.5.1.1. Prueba de rangos múltiples LSD

**Tabla 4-23:** Prueba de rangos múltiples LSD

Fracción	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fracción sólida	3	3,66667	X
Fracción gaseosa	3	96,4147	X

Nivel de confianza: 95,0 %

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

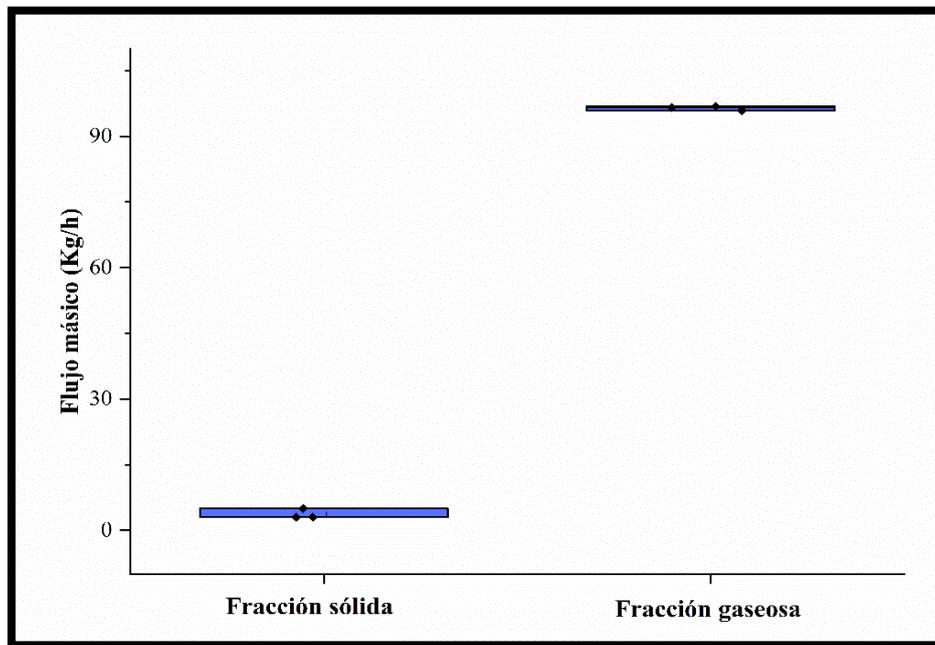
**Tabla 4-24:** Resultados de la prueba LSD

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
F. sólida/ F. gaseosa	*	<b>-92,748</b>	2,03293

\* Indica una diferencia significativa.

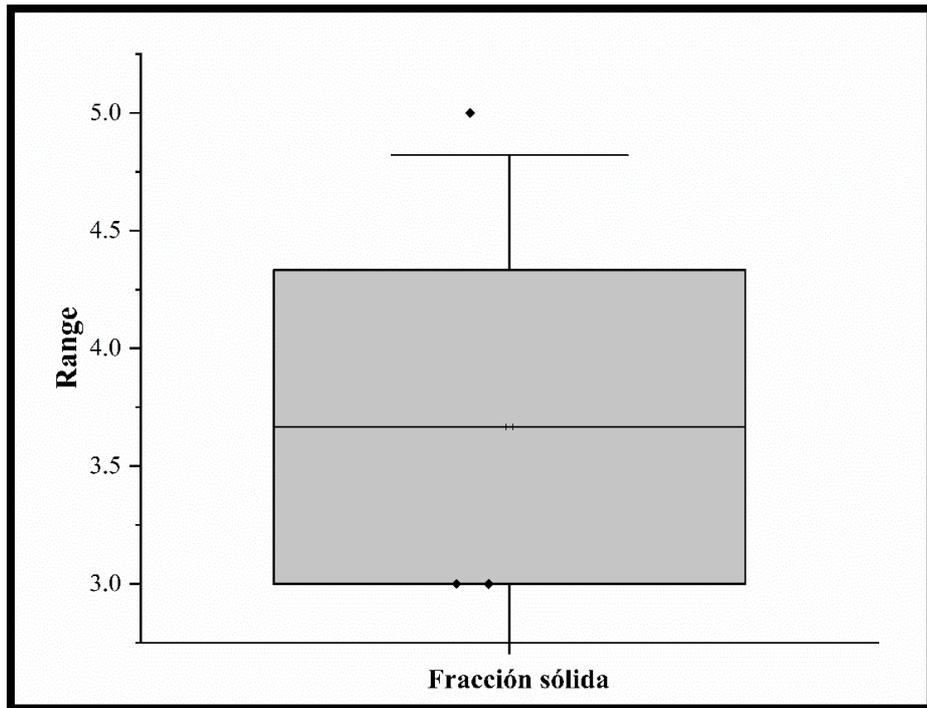
Realizado por: Tapia Diego, 2024.

Los resultados de la prueba de rangos múltiples LSD al 95,0 % de confianza se muestran en la Tabla 4-23. Para determinar cuáles son las medias significativamente diferentes, la prueba utiliza un método de comparación múltiple. Tanto la fracción sólida como la fracción gaseosa son homogéneas en las medias entre grupos. Sin embargo, si aplicamos el contraste entre la fracción sólida y la fracción gaseosa, se demostró que había una diferencia significativa entre las dos fracciones. Los resultados se muestran en la Tabla 4-24, que destaca con un (\*) la importancia de las dos fracciones, con una diferencia de -92,748. El diagrama de caja y bigotes de la ilustración 4-4 se creó para ilustrar mejor esta diferencia. Este diagrama confirma la diferencia entre las dos fracciones analizadas.



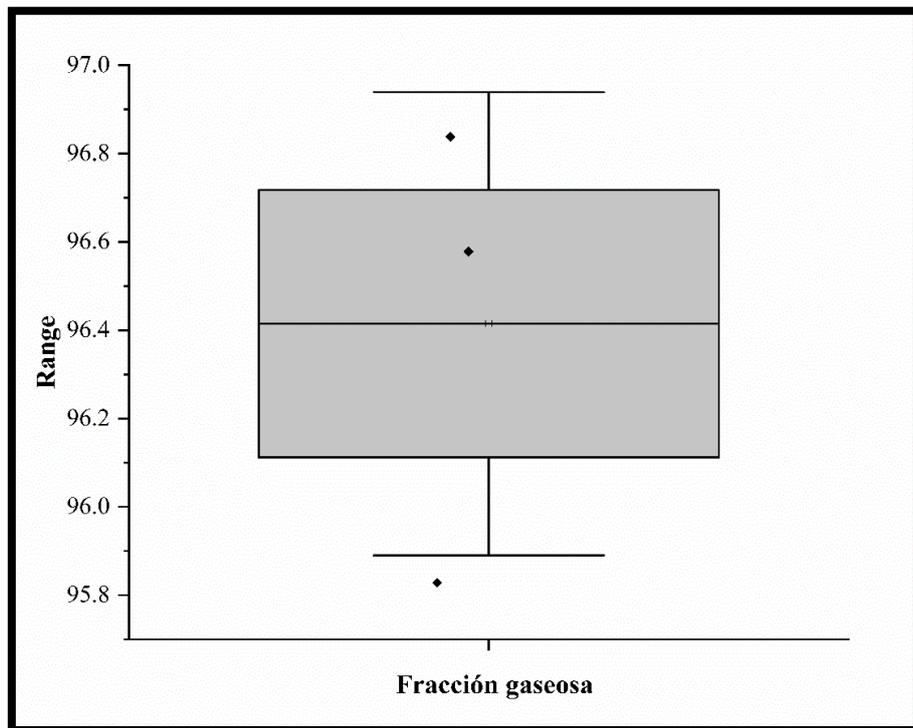
**Ilustración 4-4:** Prueba Fisher LSD para las medias de la fracción sólida y a fracción gaseosa.  
**Realizado por:** Tapia Diego, 2024.

Así mismo, se graficó la prueba Fisher LSD (Ilustración 4-4), 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 4-5 y 4-6, en cambio, representa la variabilidad de las medias de cada fracción analizada; la fracción sólida presentó una media de 3,67 Kg/h con una desviación estándar de 1,15 y la fracción gaseosa por otro lado presentó una media de 96,414 Kg/h y la desviación estándar de 0,52.



**Ilustración 4-5:** Caja y bigotes para la media de la fracción sólida

Realizado por: Tapia Diego, 2024.



**Ilustración 4-6:** Caja y bigotes para la media de la fracción gaseosa

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

## Análisis del supuesto de normalidad

**Tabla 4-25:** Resumen Estadístico para RESIDUOS

Recuento	6
Promedio	-8,33333E-7
Mediana	-0,2116667
Desviación Estándar	0,802088
Coficiente de Variación	-9,62506E8%
Sesgo Estandarizado	<b>0,962797</b>
Curtosis Estandarizada	<b>0,00959366</b>

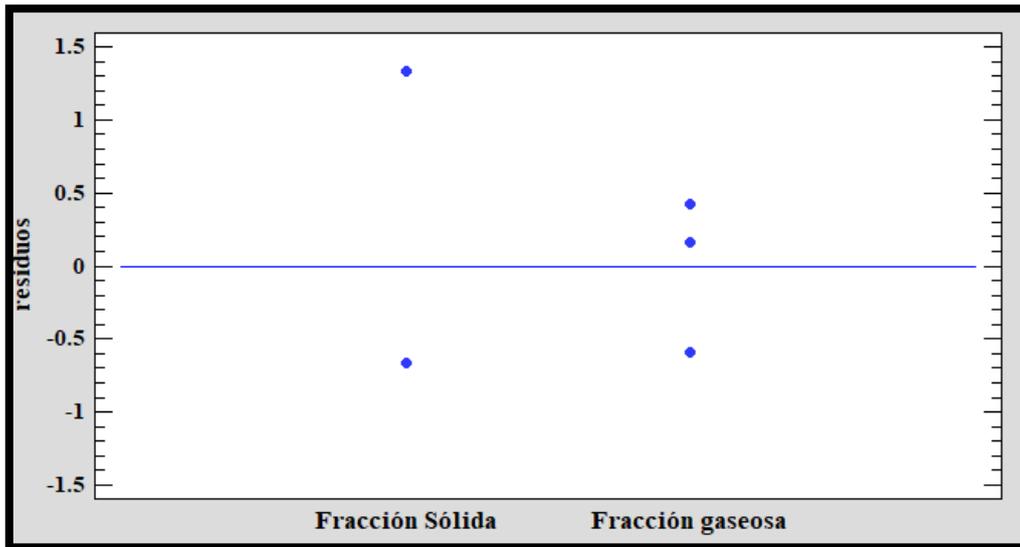
Realizado por: Tapia Diego, 2024.

La Tabla 4-25, 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, el supuesto de normalidad debe cumplirse.

### 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 4-7, 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 4-7:** Gráfico de residuos vs fracciones sólida y gaseosa

Realizado por: Tapia Diego, 2024.

#### 4.6. Comprobación de la hipótesis

A través de la valoración energética de la biomasa ¿Cuán optimo y eficiente es el gas de síntesis producido en el proceso de gasificación?

De acuerdo con los resultados obtenidos se rechaza la hipótesis, el gas producido durante el proceso de gasificación los componentes que se quiere obtener son bajos, no obstante, el poder calorífico de la biomasa es decente, muy importante a considerar en otras aplicaciones, pero como alternativa de biogás, no.

## DISCUSION

En este estudio de investigación se emplearon briquetas de bagazo de cebada para medir la valoración energética a través del uso de un gasificador de tipo downdraft, donde se observó que la eficiencia energética de esta biomasa es moderada, no se tiene valores tan bajos de la capacidad calorífica como otros estudios, pero tampoco los valores son tan altos comparados con otro tipo de procesos de obtención de biogás partiendo de la misma biomasa, no obstante al ser el proceso de gasificación mucho más económico a diferencia de otros procesos. Teniendo en cuenta que (Baquerizo, 2021, pág. 80) el poder calorífico depende directamente de la biomasa empleada.

La caracterización de la biomasa de esta investigación se tomó a partir de fuentes bibliográficas, no obstante, existe una variación de estas, la gran variedad de esta se debe a los tipos de materia que existe como lo es la cebada según (Barros et al. 2020) los porcentajes de CHON pueden variar dependiendo del tipo de cebada que se trabaje, es evidente que al ser un cereal existe factores que pueden variar su porcentaje de composición partiendo desde el mismo cultivo. Además de acuerdo con (González, 2020.) también puede haber variación dependiendo del proceso realizado a la cebada previo a la obtención de bagazo, puesto que levaduras la filtración tras maceración entre otros involucra elevar o disminuir porcentajes de composición como lo es en el nitrógeno o carbono.

El porcentaje de humedad obtenido durante este trabajo de investigación también se ve involucrado de forma dependiente con el tipo de cebada a trabajar, de acuerdo con (Arbitral Cereales) la cebada cervecera posee un rango de humedad siendo este máximo de 12.5% mientras que la cebada forrajera tiene un 14%, siendo evidente que el uso del bagazo de cebada utilizado en este trabajo de investigación concuerda con lo mencionado, puesto que se obtuvo 11,26 %, relacionando directamente con el proceso de gasificación puesto que se requiere que posee un contenido de humedad óptimo para lograr una eficiencia de conversión y un valor calorífico óptimo del gas de síntesis.

## CONCLUSIONES

Se evaluó el potencial energético de residuo agroindustrial como lo es el bagazo de cebada con enfoque en la producción de biocombustible, en esta se verifico el poder calorífico que se puede producir a través de este residuo, considerando que el uso de otro tipo de biomasa puede influir directamente en el poder calorífico se verifico cuan alto puede llegar a ser, siendo este de 3215,21 KJ/m<sup>3</sup> y considerando que hay otros tipos que poseen un poder calorífico superior se puede considerar que la biomasa no es apta para este estudio.

Se realizaron análisis físicos en las briquetas incluyendo la densidad, de igual forma análisis químicos como lo es el análisis elemental, determinación de la composición química, obteniendo resultados como 46.04% para el carbono, 6% de hidrogeno, 42.3% de oxígeno y 1.82% de nitrógeno. Estos resultados combinados ofrecen una visión integral de la biomasa lo que es fundamental para comprender su potencial como fuente de energía renovable y su viabilidad en diversas aplicaciones industriales.

Se identificó las variables involucradas en el proceso de gasificación, siendo la temperatura a la que empezó gasificar de 68 C y temperatura máxima alcanzada en el equipo de 672 C, también la cantidad de materia empleada de 5.2kg de biomasa y el tiempo de todo el proceso de 1 hora con 20 minutos.

Se determinó la composición de gas de síntesis producido en el gasificador, a través de un análisis cromatográfico de gases, este permitió caracterizar la composición del gas producido y proporciono información, permitiendo identificar especies presentes en el gas de síntesis, siendo el nitrógeno el que se presenta en mayor porcentaje de 64.86%, no obstante compuestos como el metano se presenta en cantidades ínfimas siendo este de 0.77% descartando su uso como la producción de biocombustible.

Se realizó un balance de masa del procesos de gasificación, evaluando exhaustivamente las entradas y salidas de materiales durante la operación del gasificador, este análisis permitió determinar la precisión y eficiencia del proceso, a través de las posibles pérdidas o ganancias de materia y optimizar la gestión de recursos, siendo el flujo másico del gas la incógnita a obtener con respecto a todos los recursos utilizados en el gasificador, siendo el resultado de este 96.838 kg/h de gas utilizando 5.2 kg/h de biomasa y 93.138 kg/h de aire.

Se realizo un análisis estadístico de la fracción sólida y gaseosa del proceso de gasificación para identificar si existe una diferencia significativa entre grupos puesto que el valor p obtenido supera el nivel de significancia de 0.05, las fracciones tanto solida como gaseosa no muestran diferencias.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda utilizar la estufa del gasificador como indicador del poder calorífico que puede tener la biomasa, de igual forma el tiempo que permanece encendida es de importancia para determinar resultados futuros.

Se recomienda el uso de un sensor de temperatura, para determinar los puntos máxima y mínimos que puede llegar en la cámara de alimentación durante todo el proceso.

Se recomienda implementar otro tipo de agente gasificante como el oxígeno, para ver cuán factible puede llegar a ser el gas de la biomasa.

Se recomienda verificar el uso de aire suministrado puesto que puede inferir en los resultados obtenidos del gas de síntesis.

Se recomienda trabajar con los equipos de protección personal adecuados para el proceso de gasificación puesto que, el proceso de estos implica altas temperaturas, gran cantidad de gas al ambiente y afección a los ojos por el mismo.

## GLOSARIO

**Biomasa:** Se refiere a la materia orgánica proveniente de fuentes renovables como: plantas, algas o residuos agroindustriales. Se emplea para la producción de energía en forma de biocombustibles, biogás, bioetanol y así mismo para la fabricación de materias primas industriales. (Herguedas, 2012, pág. 7)

**Cromatografía de gases:** Es un método de separación en el cual una muestra se convierte en vapor a través de la volatilización, donde los elementos a separarse se reparten entre dos fases: estacionaria y móvil. La fase móvil comúnmente gas inerte, transporta los componentes a lo largo de la columna cromatográfica, donde ocurre la separación basada en las interacciones físicas y químicas entre los componentes de la fase estacionaria. (Herguedas, 2012, pag. 56-62)

**Gas de síntesis:** Se genera mediante la gasificación de materiales ricos en carbono como carbón, biomasa o residuos, y consiste en una combinación de monóxido de carbono (CO) e hidrogeno (H<sub>2</sub>), acompañado de proporciones variables de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y otros gases. (Sánchez 2014, pág. 4)

**Gasificación:** Es un proceso termoquímico que transforma materiales ricos en carbono, como carbón, biomasa, o residuos, en un gas de combustible conocido como gas de síntesis. Durante este proceso, los materiales se someten a altas temperaturas en ausencia de oxígeno o con cantidades limitadas de este, lo que provoca la descomposición de materia orgánica y formación de gases como el monóxido de carbono (CO), hidrogeno (H<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>). (Pérez et al, 2010, pág.97)

**Agente gasificante:** Consiste en un gas o combinación de gases que aporta la energía necesaria para iniciar las reacciones y suministrar oxígeno para descomponer materiales ricos en carbono. Entre los agentes gasificantes más comunes se encuentran el aire, el oxígeno y vapor de agua, los cuales son esenciales para la formación eficiente de gases de combustión durante la gasificación, esto permite convertir de manera efectiva materiales orgánicos en un gas aprovechable. (FAO, 2020, pág.2)

## BIBLIOGRAFÍA

1. **AGA VERA. Steven & RODRIGUEZ GORDILLO. Maria**, Aprovechamiento de biomasa a partir de bagazo de cebada de malta para la elaboración de pellets como biocombustible. (Trabajo de titulación) Universidad de Guayaquil. Guayaquil-Ecuador, 2012. Pág. 55.
2. **AGUADO. Mercedes**, “LA CEBADA”. *Hojas divulgadoras, Vol. 17-57H*, (1957), (MADRID), pág. 20.
3. **ARBITRAL CEREALES**, *Cuadros de normas de calidad para la comercialización Trigo, Maíz, Centeno, Mijo, Arroz Cáscara, Pellets de Afrechillo, Girasol, Soja, Sorgo, Alpiste, Cártamo, Lino, Porotos Blancos, Maní, Avena, Cebada, Colza* [blog]. Santa Fe: Cámara de comercio de rosario. [Consulta: 14 septiembre 2023]. Disponible en: <https://www.cac.bcr.com.ar/es>
4. **ARTEAGA-PÉREZ. Luis Ernesto, ET AL.**, “Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación”. *AFINIDAD LXXII*. (2014), (Cuba). Págs. 1-8.
5. **BALAT. M.**, “Gasification of Biomass to Produce Gaseous Products” *Sila Science* [En Línea] vol 31. [Consulta: 10 diciembre 2024] 2009 pág. 519. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15567030802466847>
6. **BARROS, KALLYNE, ET AL.**, “Transient Carbon Reserves in Barley: Malate, Sucrose and Starch Are the Main Players, Their Quantitative Involvement Being Light Intensity Dependant”. *Frontiers in Plant Science* [en línea], 2020, (Ireland) Vol 11Media S.A.,(2020), págs. 1-9. Disponible en: 10.3389/fpls.2020.00209
7. **BECERRA, Sylvia, ET AL.**, “Vivir con la contaminación petrolera en el Ecuador: percepciones sociales del riesgo sanitario y capacidad de respuesta”. *journal líder* [en línea]. 2013, (Ecuador).vol. 23 Págs. 1-19. Disponible en: ISBN: 0719-5265.
8. **CAMACHO, Inés. & GRANDE, DAVID**. “Bagazo de malta (bsg): biorresiduo con potencial aplicación a nivel funcional, material y energético brewers’ spent grain (bsg): bioresidual with

potential application at functional, material, and energetic level”. *Prospectiva* [En línea], 2020 (Colombia) Vol 19, 2021. Págs. 1-17. [Consulta: 1 Enero 2024] Disponible en: <http://doi.org/10.15665/rp.v19i1.2472>

9. **CASTILLO. Cecilia et al**, “Proximate Composition and Energy Value Analysis of Five Varieties of Malting Barley”. *International Journal of Food Science and Biotechnology* [En línea], 2019 (México), Vol. 4, pág. 3. Disponible en: doi: 10.11648/j.ijfsb.20190402.11
10. **CIUTA. Simona, TSIAMIS. Demetra AND CASTALDI. Marco**, “Fundamentals of gasification and pyrolysis. Gasification of Waste Materials: Technologies for Generating Energy, Gas, and Chemicals from Municipal Solid Waste, Biomass, Nonrecycled Plastics, Sludges, and Wet Solid Wastes”. *Elsevier* [en línea], 2017 (United State of America). págs. 4-40. Consulta: 15 enero 2024] Disponible en: ISBN 9780128127162
11. **DAGNINO, Jorge**. “ANÁLISIS DE VARIANZA”. *Rev Chil Anest* [en línea]. 2014 (Chile), págs. 306-310.
12. **ELSEVIER**, “Encyclopedia of Food and Health Beer: History and Types”. *Elsevier Inc.* [En línea], 2015 (United State of America). Págs. 1-10. [Consulta: 20 diciembre 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00057-X>
13. **FAO**, “*Gasificación de Biomasa*”. [blog]. Argentina, 2015. [Consulta: 14 septiembre 2024] Pág.1-2. Disponible” en: [www.probiomasa.gob.ar](http://www.probiomasa.gob.ar)
14. **GONZÁLEZ, Natalia**. BIOGÁS a partir del BAGAZO CERVECERO. UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA. FACULTAD, DE INGENIERIAS.2020 págs. .1-169
15. **HERGUEDAS, Ana**. *BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD*. [en línea]. Madrid. 2012, pág1 .216. [Consulta: 7 febrero 2024] Disponible en: ISBN: 978-84-931891-5-0
16. **JAMA GUAÑUNA, Valeria Sulay**. Determinación del poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de cascarilla de arroz (*oryza sativa*) y cáscara de coco (*cocos nucifera*) con nano cristales de celulosa como una nueva alternativa de energía (Trabajo de titulación). Universidad Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, 2022. Págs. 1-15.

17. **KAN, TAO ET AL.** “Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review of variations in process factors and system structure”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier Ltd*, [En Línea], 2020 (Australia). Págs. 1-24. [Consulta: 16 enero 2024] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110305>
18. **LI, Qingyin ET AL.** “Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste”. *Energy Conversion and Management Elsevier Ltd*, [En Línea], 2020 (China). Pags.1-30. [Consulta: 24 agosto 2023], Disponible en: Doi: 10.1016/j.enconman.2020.113525
19. **LOPEZ. Patricia P, PRIETO. Francisco G, GAYTAN Marcela y ROMAN Alma.** “Caracterización físicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la región centro de México.” *Revista Chilena de Nutrición* [En línea], 2007(Chile), vol. 34, Pág.3. [Consulta: 06 marzo 2024]. Disponible en: ISSN: 0716-1549
20. **MARTÍNEZ, Antonio. & CARO, Rafael.** *Fuentes energéticas* [en línea].2010. págs. 21-34. [Consulta: 13 septiembre 2023]. Disponible en: ISBN 978-84-9781-567-3
21. **MAMANI GUTIERREZ, Jenny Lourdes & YOUNG, Brigham.** Evaluation of diets with different levels of barley sprouts (*Hordeum vulgare*) in the basic feed of guinea pigs (*Cavia aperea porcellus*) in the phases of growth. (Tesis de titulación) UNIVERSITY MAYORDE SAN ANDRES
22. FACULTAD DE AGRONOMIA. La paz, 2001, págs. 1-109.
23. **MERK**, sigma aldrich. [blog]. Alemania 2024. [Consulta: 03 de diciembre del 2023]. Disponible en: <https://www.sigmaaldrich.com/EC/es>
24. **MIAN, Inamullah ET AL**, “Combustion kinetics and mechanism of biomass pellet”. *Energy Elsevier Ltd.*, 2020 (China). Págs. 1-29. [Consulta: 10 enero 2024] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117909>
25. **MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES,** *Energía, sociedad y ambiente* [en línea]. 2020 (Ecuador). Págs.1-30. Disponible en: [www.ambiente.gob.ec](http://www.ambiente.gob.ec)

26. **NOTENO BAUTISTA. Fabricio Arsenio and ZAPATA TRUJILLO. Luis Sebastián,** Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de biomasa. (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica de Chimborazo- Riobamba, 2022. Págs. 1-105.
27. **ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN,** GASIFICACIÓN DE BIOMASA HOJA TÉCNICA. [online]. 2020. Retrieved from : [www.probiomasa.gob.ar](http://www.probiomasa.gob.ar)
28. **PAZMIÑO, Paola Raquel.** Utilización de la cebada, grano y corontas de maíz negro. (Trabajo de titulación) Universidad de Valladolid Escuela de ingenierías industriales Sangolquí, 2011. Págs. 1-2.
29. **PEÑA CASTILLO. Laura Camila,** Evaluación de la producción de gas y líquido combustible mediante el proceso de pirólisis de madera para aplicación en la zona del resguardo Yaigojé en el Vaupés colombiano. (Trabajo de titulación) Universidad de América facultad de ingenierías. Bogotá d.c, 2019. Págs. 1-183.
30. **PÉREZ, JUAN, BORGE, DAVID AND AGUDELO, JOHN,** “Biomass gasification process: theoretical and experimental studies” *Proceso de gasificación de biomasa:s a review. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º52.* (2010) (Colombia). págs. 1-10.
31. **RODRÍGUEZ, Andrés.** Producción de biogás a partir del bagazo cervecero. biogas, (Trabajo de titulación) Universidad de Chile facultad de ciencias agronómicas production from brewers spent grain. Chile. 2012. Págs. 5-40.
32. **SÁNCHEZ BASTARDO, NURIA,** Obtención de gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel (Trabajo de titulación). Departamento de ingeniería química y tecnología del medio ambiente. Valladolid, June 2014. Págs. 1-264.
33. **TELVIA, MSC ET AL.,** *Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada de la cervecería Hatuey Technology proposal for the energy use of the shake bagasse barley from Hatuey brewery.* Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. 2001. Págs. 15.

34. **ULLRICH. Steven E**, “The Barley Crop: Origin and Taxonomy, Production, and End Uses ”. *Washington State University, Deptment of Crop and Soil Sciences* (2014), (United State of America). Págs. 1-9.
35. **ZHUO. Yuting, ZHOUZUN. Xie AND YANSONG. Shen**, “Model study of carbonisation of low rank coal briquettes: Effect of briquettes shape”. *Journal of power technology*”. *Elsevier B.V.*, (2021), (Australia). Págs. 1-11 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.071>.
36. **Zuberbühler. U**, *Gasification of biomass – an overview on available technologies* [En Linea], 1st European Summer School on Renewable Motor Fuels Birkenfeld, Germany August 2005. Pág. 7. [Consulta: 20 febrero 2009].

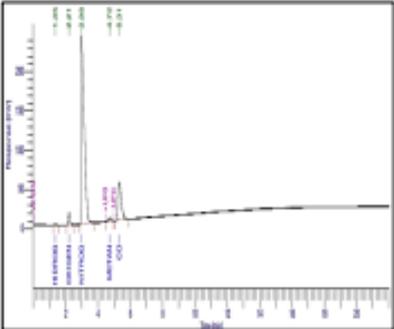
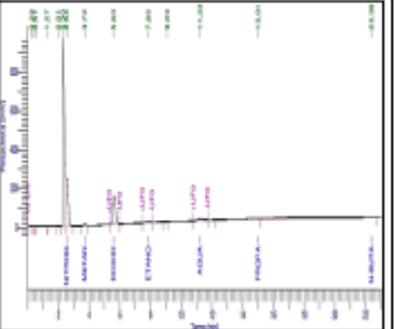
# ANEXOS

## ANEXO A: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS DE SÍNTESIS DE BAGAZO DE CEBADA

	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Página:	1 de 1	
		<b>FPT-7.8-02-04</b>		

### INFORME No. I-LAI-023-92-01

Orden de Trabajo No. DQ-OT0016-2024

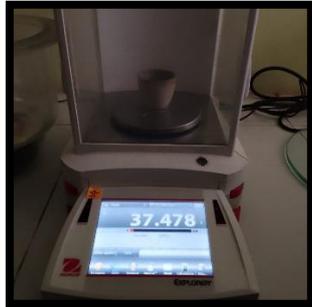
INFORMACIÓN CLIENTE			
Cliente / Empresa:	Tapia Silva Diego	Persona de contacto:	Tapia Silva Diego
Dirección / Telf.:	Calle Cuenca e Ibarra Raobamba- Ecuador / 995596977	E-mail:	diego.tapia@esPOCH.edu.ec
PARÁMETROS DE LA MUESTRA			
Identificación:	M-LAI-023-92-01	Fecha de muestreo:	* 18/1/2024
Tipo de muestra:	Gas de síntesis de bagazo de cebada	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar	Fecha inicio del ensayo:	23/1/2024
Fecha de recepción:	19/1/2024	Fecha entrega informe:	26/1/2024
CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura y %HR ambiente:	20,2 °C	30,9 %	Norma de referencia: ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F	0,7 psi	Procedimiento interno: PE-7.2-01
	18,1 °C	4895,3 Pa	PE-7.2-02
RESULTADOS			
COMPOSICIÓN	COMPONENTE	% Moles	Dev. Std
	Hidrógeno	8,08	0,013
	Oxígeno	2,62	0,008
	Nitrógeno	64,86	0,299
	Monóxido de carbono	14,40	0,113
	Metano	0,77	0,028
	Dióxido de carbono	7,98	0,274
	Etano	0,32	0,009
	Agua	0,97	0,026
	PROPIEDADES	Densidad relativa	
Peso molecular promedio [g/mol]			27,20
Densidad de la muestra (g/L)			1,15
Poder calorífico superior [kJ/m <sup>3</sup> ]			3215,21
Poder calorífico inferior [kJ/m <sup>3</sup> ]			2998,73
Factor de compresibilidad (z)		1,0000	
CROMATOGRAMA		MUESTRA	
			
<b>Columna 13 X 45/60</b> (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)		<b>Columna Porapak Q 80/100</b> (Cuantificación de hidrocarburos)	
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados repetidos 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.		
	OBSERVACIONES		
	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.		

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

TABLA 1.- COMPONENTES DEL GAS NATURAL Y RANGO DE COMPOSICION CUBIERTO

Component	Mol %
Helium	0.01 to 10
Hydrogen	0.01 to 10
Oxygen	0.01 to 20
Nitrogen	0.01 to 100
Carbon dioxide	0.01 to 20
Methane	0.01 to 100
Ethane	0.01 to 100
Hydrogen sulfide	0.3 to 30
Propane	0.01 to 100
isobutane	0.01 to 10
<i>n</i> -Butane	0.01 to 10
neoPentane	0.01 to 2
isoPentane	0.01 to 2
<i>n</i> -Pentane	0.01 to 2
Hexane isomers	0.01 to 2
Heptanes plus	0.01 to 1

## ANEXO C: ANALISIS FISICO-QUIMICOS DEL BAGAZAO DE CEBADA



a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.

a. Preparación de la muestra  
b. Ignición en la mufla  
c. Ceniza en el crisol  
d. Pesado de la muestra  
e. Secado en la estufa

f. Análisis de porcentaje de humedad en la balanza termocupla  
g. Calcinación de cebada



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

**Fecha de entrega:** 18/07/2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Diego Alejandro Tapia Silva
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Químico
 <b>Ing. Mabel Mariela Parada Rivera</b> <b>Director del Trabajo de Titulación</b>   <b>Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes</b> <b>Asesor del Trabajo de Titulación</b>

