



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**VALORACIÓN ENERGÉTICA DE DIFERENTES BIOMASAS
MEDIANTE GASIFICACIÓN DE TIPO DOWNDRAFT**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: GRACIELA NICOLE CASILLAS CAZA

DIRECTOR: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES, PhD

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Graciela Nicole Casillas Caza

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

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

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




Riobamba, 25 mayo 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Graciela Casillas', with a horizontal line drawn underneath it.

Graciela Nicole Casillas Caza
175109189-1

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: Investigación, **VALORACIÓN ENEGÉTICA DE DIFERENTES BIOMASAS MEDIANTE GASIFICACIÓN TIPO DOWNDRAFT**, realizado por la señorita: **GRACIELA NICOLE CASILLAS CAZA**, 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.

	FIRMA	FECHA
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera, Mgs. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-05-25
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes, PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-05-25
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada, MsC. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2023-05-25

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía, al trabajo y confianza de mi núcleo familiar, sobre todo de Martha, muchas gracias por ser el ángel que mi vida necesita mamita; a mis hermanas Allison, Dayana y mi hermano Dennis, infinitas gracias.

Graciela

AGRADECIMIENTO

Querida alma máter Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, gracias por el acogimiento en tu establecimiento durante esta etapa universitaria, gracias a los profesores que radican en ella y transfieren todo su conocimiento.

Gracias a Raúl y Jorge por su apoyo en momentos específicos.

Gracias a mis tías preciosas por su apoyo y comprensión, Sonia, Angelica y Rosio.

Gracias a mi tutor el Ing. Paul Palmay por apoyarme con su increíble conocimiento, porque a pesar de las adversidades que se presentó durante el proceso de investigación siempre fue un gran apoyo, además de ser un excelente profesional es un gran ser humano. Gracias al Ing. Darío Guamán quien es un gran profesor en la querida carrera de ingeniería química.

Gracias a mis amigos en general que formaron parte de este gran viaje, en especial a mi pana del alma Kevin, gracias por la ayuda en todo momento, te mereces el cielo. Gracias a Mayra por su apoyo durante todos los semestres.

Gracias a mis amadas mascotas y todos quienes confiaron en mí.

Graciela

INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
INDICE DE ANEXOS.....	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xiv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Planteamiento de Problema.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Hipótesis	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes de investigación	5
2.2. Referencias Teóricas.....	6
2.2.1. Biomasa.....	6
2.2.1.1. Biomasa forestal.....	6
2.2.1.2. Aserrín	6
2.2.1.3. Cascarilla de arroz.....	6
2.2.2. Tipos de biomasa	7
2.2.2.1. Según su composición.....	7
2.2.2.2. Según su origen.....	8
2.2.2.3. Según su estado.....	8
2.2.3. Características energéticas de la biomasa	9
2.2.3.1. Poder calorífico	9
2.2.3.2. Porcentaje de cenizas	9

2.2.3.3.	<i>Contenido de humedad</i>	9
2.2.3.4.	<i>Densidad aparente</i>	10
2.2.4.	Proceso de conversión de la biomasa en energía	10
2.2.4.1.	<i>Proceso de conversión termoquímicos</i>	10
2.2.4.2.	<i>Proceso de conversión bioquímico</i>	11
2.2.5.	Aprovechamiento energético de biomasa	12
2.2.6.	Potencial energético de biomasa a nivel mundial	12
2.2.7.	Potencial energético de biomasa en Ecuador	15
2.2.8.	Caracterización de biomasa	15
2.2.8.1.	<i>Análisis elementales</i>	16
2.2.9.	Gasificador	16
2.2.10.	Tipos de gasificadores	17
2.2.10.1.	<i>Gasificador de lecho fijo</i>	17
2.2.10.2.	<i>Gasificador de lecho fluizado</i>	19
2.2.10.3.	<i>Gasificador de lecho cruzado</i>	20
2.2.11.	Gasificación de biomasa	20
2.2.12.	Agente gasificante	21
2.2.13.	Proceso de gasificación	22
2.2.13.1.	<i>Zona de secado</i>	23
2.2.13.2.	<i>Zona de pirólisis</i>	23
2.2.13.3.	<i>Zona de oxidación o combustión</i>	23
2.2.13.4.	<i>Zona de reacción o reducción</i>	23
2.2.14.	Reacciones producto de la gasificación	24
2.2.15.	Gas de síntesis	25
2.3.	Cromatografía de gases	25

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	27
3.1.	Enfoque de investigación	27
3.1.1.	Enfoque cualitativo	27
3.1.2.	Enfoque cuantitativo	27
3.2.	Alcance de Investigación	27
3.2.1.	Investigación exploratoria	27
3.2.2.	Investigación descriptiva	27
3.2.3.	Investigación no experimental	28
3.3.	Diseño de investigación	28

3.3.1.	Identificación de variables	28
3.3.1.1.	<i>Variables independientes</i>	28
3.3.1.2.	<i>Variables dependientes</i>	28
3.4.	Tipo de estudio	28
3.5.	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	29
3.5.1.	Preparación de la muestra de la biomasa	29
3.5.2.	Caracterización de la biomasa	30
3.5.2.1.	<i>Análisis elemental</i>	30
3.5.2.2.	<i>Determinación del porcentaje de humedad</i>	31
3.5.2.3.	<i>Determinación del porcentaje de cenizas</i>	32
3.6.	Análisis termodinámico del gasificador	33
3.6.1.	Cantidad estequiométrica de aire para una combustión completa	33
3.6.2.	Poder calorífico inferior (PCI)	34
3.6.3.	Poder calorífico superior (PCS)	34
3.6.4.	Coefficiente de aire en exceso	35
3.6.4.1.	<i>Relación entre la ratio de equivalencia y aire en exceso</i>	35
3.6.5.	Cantidad de aire para gasificar	36
3.6.6.	Balance global del sistema	36
3.6.7.	Balance de masa	36
3.6.8.	Balance de energía	37
3.6.9.	Calor perdido	37
3.6.9.1.	<i>Coefficiente de convección</i>	38
3.6.9.2.	<i>Número de Rayleigh</i>	38
3.6.9.3.	<i>Número de Nusselt – Transferencia de calor en convección libre</i>	38
3.6.10.	Eficiencia de la gasificación	39
3.6.10.1.	<i>Eficiencia en frío</i>	39
3.6.10.2.	<i>Eficiencia en calor</i>	39
3.6.11.	Régimen de operación	39
3.7.	Descripción del gasificador existente	40
3.7.1.	Instrumentación	41

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS OBTENIDOS	42
4.1.	Procedimiento experimental	42
4.1.1.	Condiciones atmosféricas para gasificar	42
4.1.1.1.	<i>Presión atmosférica</i>	42
4.1.1.2.	<i>Densidad del aire</i>	42
4.1.2.	<i>Protocolo para gasificar</i>	43
4.2.	Valoración energética de la biomasa de cascarilla de arroz	45
4.2.1.	Cálculo del balance de masa para la biomasa de cascarilla de arroz	47
4.2.2.	Cálculo del balance de energía para la biomasa de cascarilla de arroz	49
4.2.3.	Resultado del análisis cromatográfico de la cascarilla de arroz	54
4.3.	Valoración energética de los biomas de residuos madereros	55
4.3.1.	Cálculo del balance de masa para la biomasa de viruta de eucalipto	57
4.3.2.	Cálculo del balance de energía para la biomasa de viruta de eucalipto	58
4.3.3.	Análisis cromatográfico del gas de viruta de eucalipto	64
4.4.	Discusión de resultados	65
4.4.1.	Análisis de la composición elemental de la biomasa	67
4.4.2.	Análisis de la cromatografía de gases	67
4.4.2.1.	<i>Composición elemental del gas de síntesis</i>	67
4.4.2.2.	<i>Poder calorífico inferior y superior del gas de síntesis</i>	69
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tipos de biomasa según su composición.....	7
Tabla 2-2: Agentes gasificantes	21
Tabla 2-3: Compuestos de los productos de gasificación	21
Tabla 3-1: Preparación de la muestra.....	29
Tabla 3-2: Análisis CHON.....	30
Tabla 3-3: Determinación de la humedad.....	31
Tabla 3-4: Determinación de cenizas.....	32
Tabla 3-5: Composición elemental de la biomasa.....	33
Tabla 3-6: Coeficiente de exceso de aire por diferentes tipos de combustible.....	35
Tabla 3-7: Características del gasificador.....	40
Tabla 3-8: Descripción de los elementos que conforman el gasificador.....	41
Tabla 3-9: Instrumentación instalada en el reactor.....	41
Tabla 4-1: Parámetros de gasificación.....	43
Tabla 4-2: Procedimiento para gasificación.....	44
Tabla 4-3: Datos de gasificación de la cascarilla de arroz	45
Tabla 4-4: Guía durante la gasificación	47
Tabla 4-5: Resultados del balance de masa de la cascarilla de arroz.....	48
Tabla 4-6: Cálculo de la entalpía del gas de cascarillas de arroz.....	51
Tabla 4-7: Resultados del balance de energía de la cascarilla de arroz	51
Tabla 4-8: Guía para determinar el calor perdido por convección natural.....	52
Tabla 4-9: Parámetros valorados en el análisis.....	54
Tabla 4-10: Composición de los análisis - biomasa cascarilla de arroz.....	54
Tabla 4-11: Propiedades de los análisis - biomasa cascarilla de arroz.....	54
Tabla 4-12: Datos de gasificación de la viruta de eucalipto	55
Tabla 4-13: Guía durante la gasificación de la biomasa de viruta	57
Tabla 4-14: Resultados del balance de masa de la biomasa de viruta.....	58
Tabla 4-15: Cálculo de la entalpía del gas de viruta	61
Tabla 4-16: Resultados del balance de energía.....	61
Tabla 4-17: Guía para determinar el calor perdido por convección natural.....	62
Tabla 4-18: Parámetros valorados en el análisis del gas de viruta de eucalipto	64
Tabla 4-19: Composición de los análisis del gas de viruta de eucalipto.....	64
Tabla 4-20: Propiedades de los análisis del gas de viruta de eucalipto.....	64
Tabla 4-21: Resultados obtenidos de la gasificación.....	65
Tabla 4-22: Resultados del balance de masa.....	66
Tabla 4-23: Resultados del balance de energía.....	67

Tabla 4-24: Diferencias de la composición elemental del gas	68
Tabla 4-25: HLV - LHV de la biomasa	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Tipos de biomasa	7
Ilustración 2-2: Proceso de conversión termoquímicos.....	10
Ilustración 2-3: Proceso de conversión bioquímicos.....	11
Ilustración 2-4: Energía eólica, solar y otras.....	13
Ilustración 2-5: Consumo de energía renovable.....	13
Ilustración 2-6: Consumo de energía renovable.....	14
Ilustración 2-7: Producción de biocombustible	14
Ilustración 2-8: Recursos energéticos renovables y no renovables	15
Ilustración 2-9: Proceso químico interno de un gasificador.....	16
Ilustración 2-10: Tipos de gasificadores	17
Ilustración 2-11: Gasificador Downdraft.....	18
Ilustración 2-12: Gasificador Updraft	18
Ilustración 2-13: Gasificador de lecho fluidizado circulante.....	19
Ilustración 2-14: Gasificador de lecho cruzado.....	20
Ilustración 2-15: Proceso de gasificación updraft en el reactor.....	22
Ilustración 3-1: Balance de masa.....	36
Ilustración 3-2: Balance de energía.....	37
Ilustración 3-3: Diagrama de bloques del gasificador.....	40
Ilustración 4-1: Resultados de la gasificación	66
Ilustración 4-2: Resultado balance de masa	66
Ilustración 4-3: Composición del gas de síntesis	68
Ilustración 4-4: Resultado de poder calorífico	70

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Zona de combustión.....	23
Ecuación 2-2: Zona de reacción.....	23
Ecuación 2-3: Producto de gasificación	24
Ecuación 3-1: Masa de aire estequimétrico	33
Ecuación 3-2: Análisis gravimétrico.....	33
Ecuación 3-3: PCI.....	34
Ecuación 3-4: PCS	34
Ecuación 3-5: Coeficiente de aire en exceso	35
Ecuación 3-6: Equivalente entre ER y EA	35
Ecuación 3-7: Cantidad de aire gasificante.....	36
Ecuación 3-8: Balance global del sistema.....	36
Ecuación 3-9: Balance de masa	36
Ecuación 3-10: Balance de energía.....	37
Ecuación 3-11: Calor perdido	38
Ecuación 3-12: Coeficiente de convección.....	38
Ecuación 3-13: Número de Rayleigh.....	38
Ecuación 3-14: Número de Nusselt	38
Ecuación 3-15: Eficiencia en frío.....	39
Ecuación 3-16: Eficiencia en calor	39
Ecuación 4-1: Presión atmosférica Riobamba	42
Ecuación 3-17: Régimen de operación	39
Ecuación 4-2: Densidad del aire	42
Ecuación 4-3: Entalpía del aire	49
Ecuación 4-4: Entalpía del hidrógeno.....	49
Ecuación 4-5: Entalpía del oxígeno	50
Ecuación 4-6: Entalpía del nitrógeno.....	50
Ecuación 4-7: Entalpía del monóxido de carbono	50
Ecuación 4-8: Entalpía del metano	50
Ecuación 4-9: Entalpía del dióxido de carbono	50
Ecuación 4-10: Entalpía del agua.....	50
Ecuación 4-11: Entalpía del gas	51
Ecuación 4-12: Temperatura fílmica	52
Ecuación 4-13: Entalpía del etano	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 4-14: Entalpía del propano	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DE LA BIOMASA DE CASCARILLA DE ARROZ

ANEXO B: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DE LA BIOMASA DE VIRUTA

ANEXO C: TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA - CENGEL

ANEXO D: PROPIEDADES DEL AIRE - CENGEL

ANEXO E: CALORES ESPECÍFICOS - CENGEL

ANEXO F: CALORES ESPECÍFICOS DE GAS IDEAL – CENGEL

ANEXO G: ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE CENIZAS DEL RESIDUO SÓLIDO

ANEXO H: ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DEL ALQUITRÁN

ANEXO I: ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA BIOMASA

RESUMEN

Actualmente el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía son los más importantes, se espera que durante el transcurso de los años presente mayor demanda, en consecuencia, serán más costos y disminuirá su producción, además es una de las industrias más contaminantes debido a las emisiones de CO_2 , CO y gases nocivos para el ambiente, por lo tanto, el presente trabajo de investigación tiene como finalidad obtener la valoración energética de diferente biomasa mediante gasificación de tipo Down draft. Inicialmente con las condiciones adecuadas de biomasa se procedió a gasificar a una temperatura ambiente de 20°C , presión de atmosférica de 72928 Pa, densidad del aire $0,86 \text{ kg/m}^3$ y como agente gasificante el aire. La gasificación se llevó a cabo en un gasificador de tipo Downdraft en donde la biomasa y el aire se desplazan en dirección descendente hacia la sección inferior del gasificador en ausencia de oxígeno, la temperatura de activación fue de 500°C y la temperatura de gasificación fue de entre 700 a 850°C dependiendo de la biomasa, la muestra del gas se tomó en una funda tedlar. Los analitos de interés en los compuestos del gas son el hidrógeno y el metano, los resultados reflejaron valores para la biomasa de cascarilla de arroz en H_2 de 12,22 % moles y de CH_4 0,17% moles, para la biomasa de viruta H_2 de 29,50 % moles y para CH_4 2,70 % moles. En cuanto a los resultados de los residuos, los sólidos se obtuvieron 4kg de carbón para la biomasa de cascarilla de arroz y 3kg para la biomasa de viruta, en los residuos líquidos se obtuvo 500 ml y 250 ml de alquitrán respectivamente. Mediante comparación de resultados se concluyó que la biomasa con mejor rendimiento de energía aprovechable es la viruta, debido a que presenta mayor contenido de hidrogeno y metano.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <GASIFICACIÓN>, <ENERGÍA RENOVABLE>, <POTENCIAL ENERGÉTICO>, <BIOMASA>, <GASIFICADOR DOWNDRAFT>, <GAS DE SÍNTESIS>.

1256-DBRA-UPT-2023

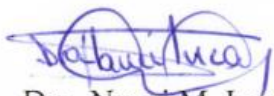


ABSTRACT

Currently the use of fossil fuels as energy sources are the most important, it is expected that during the years it will present greater demand, consequently, it will be more expensive and its production will decrease, it is also one of the most polluting industries due to emissions of C_2O , CO and harmful gases to the environment, therefore. This research work aims to obtain the energy valuation of different biomass by gasification of Down draft type. Initially, with the appropriate biomass conditions, gasification was carried out at an ambient temperature of 20°C, atmospheric pressure of 72928 Pa, air density 0.86 kg/m³ and air as gasifying agent. The gasification was carried out in a Downdraft type gasifier where the biomass and air move in a downward direction towards the lower section of the gasifier in the absence of oxygen, the activation temperature was 500°C and the gasification temperature was between 700 to 850°C depending on the biomass, the gas sample was taken in a tedlar sleeve. The analytes of interest in the gas compounds are hydrogen and methane, the results reflected values for rice husk biomass in H₂ of 12.22 % moles and CH₄ 0.17% moles, for wood chip biomass H₂ of 29.50 % moles and for CH₄ 2.70 % moles. Regarding the results of the residues, 4 kg of charcoal were obtained for the rice husk biomass and 3 kg for the wood chip biomass, and 500 ml and 250 ml of tar were obtained for the liquid residues, respectively. By comparing the results, it was concluded that the biomass with the best yield of usable energy is the wood chips, because it has a higher content of hydrogen and methane.

Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <GASIFICATION>, <RENEWABLE ENERGY>, <ENERGY POTENTIAL>, <BIOMASS>, <DOWNDRAFT GASIFIER>, <SYNTHESIS GAS>.

1256-DBRA-UPT-2023



Dra. Nanci M. Inca Ch.

0602926719

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemorables la madera, cáscaras y semillas de alimentos como el arroz y el coco han sido utilizadas como combustible para cocinar, generar calor e iluminación para el alumbrado de las ciudades. Esta práctica se modificó durante el periodo de la revolución industrial a finales del siglo XVIII, con la utilización más frecuente de los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo; siendo más visibles a finales del siglo XIX, con aparición de la energía nuclear y la utilización del gas natural (Estrada et al. 2004, p. 155).

Las sociedades modernas presentan diferentes retos importantes sobre todo relacionados con una creciente demanda energética y un mayor aumento en las emisiones CO_2 y CO debido al uso inadecuado de los combustibles fósiles. En conjunto a esto, diversas actividades humanas que generan grandes cantidades de residuos sólidos que, de no ser gestionados adecuadamente, provocan contaminación ambiental, así también la proliferación de vectores que producen enfermedades (Pérez 2017, p. 3). Todas estas situaciones fomentan el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan dar un mejor tratamiento a los residuos sólidos y a su vez el aprovechamiento energético de los mismos, además buscan disminuir el impacto ambiente y la utilización eficiente de los recursos disponibles.

El desarrollo social, tecnológico y cultural que en la actualidad experimenta la humanidad ha sido posible gracias a la amplia disponibilidad de fuentes energéticas renovables y no renovables, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural constituyen una fuente principal en el sector energético mundial y representan aproximadamente el 80% de la demanda energética (Hosseini et al. 2014, p. 621-632).

El Ecuador no es ajeno a esta realidad, de acuerdo al Balance Energético Nacional, para el año 2015, el consumo energético promedio per cápita fue de 5,28BEP. En base a esto, se presentó un ascenso en el consumo energético per cápita en el país del orden del 25%, con respecto a los de 4,22 BEP consumidos en 2005. En base a estas cifras, una persona en el Ecuador consume el 38,31% comparado con la media mundial, y el 55,29% con respecto al promedio latinoamericano, observándose que el consumo energético per cápita del país todavía sigue siendo inferior inclusive a nivel regional (Serrano et al. 2017, p. 42). Dado que el enfoque se basa en la situación energética actual y problemas medio ambientales, hace que la generación de energía mediante sistemas basados en energías renovables tome cada vez mayor relevancia a nivel mundial, estos métodos presentan una doble ventaja ya que genera la diversificación energética y disminuyen la dependencia del petróleo a la par que disminuye las emisiones de CO_2 .

El proceso de gasificación de biomasa es uno de los sistemas que actualmente está tomando mayor relevancia, ya que es un sistema con gran potencial que permite la generación de energía eléctrica y térmica, a través de tecnologías de bajo costo como los gasificadores de lecho fijo. La transformación de biomasa en combustible gaseoso, aprovechable en motores de combustión interna o en turbinas de gas como combustible, demanda que la biomasa cumpla con ciertos estándares antes de pasar a los diferentes procesos termoquímicos, compuesto por reacciones endotérmicas y exotérmicas (Turare, p. 156).

Por lo mencionado anteriormente, este tema de titulación propone realizar una valoración energética de biomasa mediante un proceso de gasificación, para determinar la eficiencia energética del componente gaseoso mediante análisis de cromatografía de gases para identificar si el gas presenta alto contenido de hidrógeno y metano que son los analitos de interés. La biomasa que se utilizará para llevar a cabo este proceso es la cascarilla de arroz y la viruta proveniente de los residuos madereros, este tipo de biomasa son las que más se generan en el país, por lo tanto, no tienen un tratamiento oportuno y son desechadas de manera inadecuada generando problemas ambientales, es por ese motivo que se genera alternativas para aprovechar este tipo de materia orgánica. Este proceso se ejecutó en un gasificador de tipo Downdraft que se encuentra ubicado en la Facultad de Mecánica de la ESPOCH el mismo que ha sido implementado y diseñado con fines de carácter investigativo.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento de problema

En la actualidad el uso de los combustibles fósiles como fuentes de energía son los más importantes, se espera que durante el transcurso de los años presente mayor demanda, por lo tanto, estarán menos disponibles, más costoso y disminuirá su producción, por estas razones se genera una búsqueda de alternativas para la conservación de energía y fuentes de energías renovables o alternativas (Escalante, *et al.* 2022, p.1-2). Por otro lado, la demanda de energía a nivel mundial continúa creciendo debido al rápido aumento de la población, lo que implica un crecimiento en el cambio climático y generación de gases de efecto invernadero.

La emisión de CO₂ es sin duda la más importante y perjudicial para el ambiente, debido a que se asocia directamente a la obtención de energía, sin mencionar, que existe gases derivados que se generan durante el proceso como: el óxido de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (SO₂), el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y partículas suspendidas (Hoang *et al.* 2021, p.3-4) . Por lo tanto, es esencial abordar la generación de energía renovable como parte de los planes de mejora del desarrollo sostenible, el progreso continuo en el crecimiento de nuevas tecnologías proporciona esfuerzos para incrementar la eficiencia energética y a su vez explorar nuevas fuentes de energía alternativa.

El Ecuador no se encuentra exento de esta realidad, dependiendo su economía en gran medida de los combustibles fósiles. Sin embargo, es posible disminuir esta dependencia si se considera a la biomasa como potencial fuente de energía proveniente de residuos orgánicos o forestales, además, que es uno de los campos de investigación actualmente más explorados en lo que respecta a las ciencias energéticas y medioambientales (Serrano *et al.* 2017a, p. 41).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Valorar energéticamente los residuos de aserraderos y cascarilla de arroz mediante gasificación tipo downdraft.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la biomasa de cascarillas de arroz y residuos de aserraderos.
- Establecer las variables del proceso de gasificación y la cantidad de energía disponible a partir de la biomasa.
- Caracterizar el gas de síntesis de la biomasa producida en el gasificador.
- Determinar un diseño que compare entre sí los diferentes resultados obtenidos del gas de síntesis que permita identificar el mayor rendimiento de energía aprovechable

1.3. Justificación

Las sociedades modernas presentan diferentes retos que solucionar, sobre todo relacionado con temas ambientales y aún más con la creciente demanda energética y un mayor aumento en las emisiones de CO_2 y CO , todos estos factores se suscitan debido al uso inadecuado de los combustibles fósiles. Las diversas actividades humanas generan grandes cantidades de residuos sólidos que no son gestionados de forma adecuada y provocan daños al medio ambiente y a su vez favorecen a la disminución de recursos naturales, así también promueven la proliferación de enfermedades (Pérez 2017, p. 3).

Por todas estas situaciones se fomenta el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan dar un mejor tratamiento a los residuos sólidos y también el aprovechamiento energético de los mismos, además se busca disminuir el impacto ambiental y la utilización eficiente de los recursos disponibles. Por lo mencionado anteriormente, este trabajo de titulación propone realizar una valoración energética de biomasa mediante gasificación con fines energéticos que resulta a partir de biomasa, las pruebas se llevaran a cabo mediante el uso de un gasificador de tipo Downdraft, que se encuentra ubicado en la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.

1.4. Hipótesis

Mediante la valoración energética de las dos biomásas se puede detectar ¿cuál de los dos genera un mejor rendimiento de gas de síntesis?

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

En la época de los años 70 una Comisión de la Organización de la Naciones Unidas (ONU) para el Medio Ambiente y el Desarrollo determinó que las acciones que había tomado la sociedad deterioraban en gran parte el medio ambiente, a su vez que sumía en la pobreza a una mayor parte de la misma. Una de las mayores preocupaciones y necesidades para el desarrollo social y económico ha sido la necesidad de obtener energía; actualmente gran parte de las fuentes de energía se agotan y producen un impacto significativo en el medio ambiente y cambio climático (Romo et al 2013, p. 127).

El descubrimiento de grandes cantidades de recursos fósiles y los continuos progresos científicos convirtieron a la humanidad en seres dependientes del petróleo. Existe varios materiales como las fibras, los polímeros sintéticos, los lubricantes, los colorantes y solventes que se obtenían con facilidad y en grandes cantidades a partir de petróleo o gas; rápidamente empezaron a remplazarse y desplazarse los productos que proviene de la biomasa (Spanevello, et al. 2013, p. 125). Debido a la enorme presión que la producción de energía ejerce sobre el medio ambiente, se debe considerar propuestas que ayuden y promuevan la diversificación y sostenibilidad. Actualmente la tecnología permite lograr una alta proporción para producir energía mediante el uso de recursos renovables (Barragán Escandón et al. 2022, p. 2).

La biomasa y los biocombustibles han traído un interés creciente como energía sostenible y renovable; la biomasa es una fuente almacenada de energía inicialmente producida por plantas y materia orgánica; como cultivos, arboles, cascarilla de granos y desechos de alimentos. Los combustibles líquidos como el biodiesel o bioetanol, son adecuados para fines de transporte, por lo tanto, tienen una atención importante no solo en el ámbito empresarial sino también en el ámbito académico (Kajikawa et al. 2008, p. 1349). La energía de la biomasa es la cuarta fuente de energía más grande, seguida por el carbón, el petróleo y el gas natural; desde el punto de vista del ciclo de vida, la generación de energía con biomasa puede lograr emisiones de CO_2 casi nulas. Así pues, como fuente de energía renovable y limpia, tiene la gran capacidad para resolver el problema de energía, a mantener el equilibrio ecológico y ayudar a mejorar el entorno (Guo, et al. 2022, p. 687).

2.2. Referencias teóricas

2.2.1. Biomasa

La industria y los investigadores caracterizan las materias primas para la conversión termoquímica en diferentes formas: biomasa maderera, biomasa herbácea, abonos y plantas marinas. Se emplea residuos con bajo contenido de humedad para evitar pérdida energética durante el proceso de secado, la biomasa leñosa y las plantas herbáceas son las opciones más utilizadas debido a su contenido de humedad controlable. También se utilizan materias primas de biomasa en forma suelta o en polvo, con una densidad aproximada de 200 kg/m³, incluye desechos agrícolas como bagazo de azúcar, cascara de arroz, cascara de maní, fibra de coco, entre otros (Sikarwar et al. 2016, p. 2953). Si el proceso de la biomasa ocurre de forma eficiente, ya sea de manera biológica o química, además, extrayendo la energía almacenada en los enlaces químicos que se convertirán en producto energético combinado con oxígeno, en consecuencia, el carbono se oxida para producir CO_2 y agua. Este proceso es cíclico por lo tanto el CO_2 quedará disponible para producir una nueva biomasa (Mckendry 2002, p. 37).

2.2.1.1. Biomasa forestal

Ideal para gasificación gracias a su alto contenido del porcentaje de celulosa y hemicelulosa (Sikarwar et al. 2016, p. 2953).

2.2.1.2. Aserrín

La transformación de la madera genera grandes cantidades de desechos en forma de aserrín y pequeños trozos de madera, que en varias ocasiones son desechados de forma incorrecta, lo cual causa problemas ambientales porque es quemado o desechado en ríos o lagos. El aserrín representa una parte de los restos forestales que generalmente se emplea para la gasificación debido a que es una biomasa con un menor contenido de humedad (Guasch, et al. 2016, p. 469).

2.2.1.3. Cascarilla de arroz

La producción de arroz continua en aumento, de igual forma la producción de residuos como la cascarilla de arroz conjuntamente con el tamo que se clasifican como productos secundarios de la actividad, que se obtiene durante el proceso del pulido para la obtención del grano de arroz. Actualmente la cascarilla de arroz, se registra como una de las tantas energías alternativas que se utiliza como combustible para producir electricidad, vapor y calor (Ramírez y Trinidad 2021, p. 73).

2.2.2. Tipos de biomasa

Existen varias clasificaciones de biomasa, pero las más reconocidas y fundamentadas son según su composición, origen y estado; y se encuentran representadas a continuación. Ver ilustración 2-

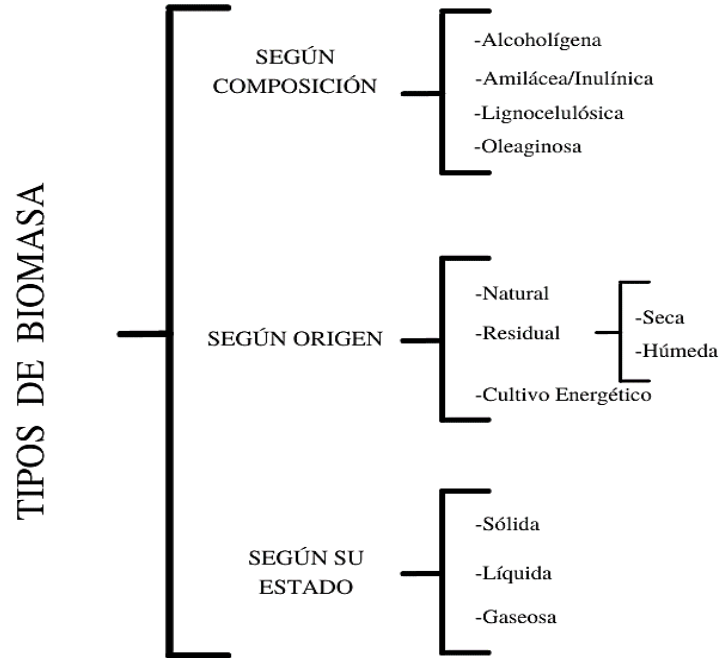


Ilustración 2-1: Tipos de biomasa

Realizado por: Casillas G.,2022

2.2.2.1. Según su composición

Los tipos de biomasa según su composición, se visualiza en la siguiente tabla con ejemplificaciones basados en biomasa agrícola. Ver tabla 2-1.

Tabla 2-1: Tipos de biomasa según su composición.

Tipo	Sustancia bio-orgánica		Ejemplos
Hidratos de carbono			
Alcoholígena	Monosacáridos	Glucosa	Pulpa de futa
		Fructosa	Pulpa de futa
	Disacáridos	Sacarosa	Caña de azúcar, remolacha, sorgo dulce
Amilácea /Inulínico	Polisacáridos	Insulina	Tubérculo de patata y rizomas de dalia, achicoria
		Almidón	Granos de cereal, Tubérculo de patata
Lignocelulósica	Polisacáridos	Hemicelulosa	Maderas en general
		Celulosa	Residuos lignocelulósicos
Lípidos			
Oleaginoso			Semillas de girasol, soja, maíz.

Fuente: Menbrillera,2018

Realizado por: Casillas G.,2022

2.2.2.2. *Según su origen*

Natural: Es la biomasa que se genera de forma natural en la naturaleza, siempre y cuando no haya sufrido cambios o intervención de los seres humanos. El proceso de obtención y el transporte de la materia prima a lugar del procesamiento no son rentables, así pues, la explotación y extracción son poco viables debido a razones económicas. Por otra parte, existe países en vías de desarrollo y pequeñas poblaciones que en la actualidad hacen uso de la biomasa natural como principal constituyente de fuente energética.

Residual: Su obtención radica en la producción de residuos que son originados debido al desarrollo de diferentes actividades humanas, y se clasifica en secos y húmedos. Secos: Son generados por recursos que implica actividades forestales y agrícolas, que tienen lugar en industria madereras y agroalimentarias. Ejemplo: pajas, aserrín, residuos agrícolas, etc. Húmedos: Procede a partir de derrames biodegradables, de manera que son provenientes de aguas residuales industriales y urbanas, de residuos agroindustriales e incluso de residuos ganaderos.

Cultivo energético: Son cultivos destinados exclusivamente para la producción de energía, sin fines alimentarios; es decir que produce biomasa para transformar en combustible. Ejemplo: cultivos de calza etíope y cardo.

2.2.2.3. *Según su estado*

Sólida: La biomasa sólida es procedente de sectores forestales, agrícolas y de industrias de transformación que producen este tipo de residuos. Las cascaras de frutos secos, la paja, los restos de podas, la leña, las cortezas y restos de madera y de diferentes productos forestales son empleados en la elaboración de biocombustible sólido. Por lo contrario, las cenizas producidas en el proceso de combustión de la biomasa sólida pueden ser empleadas como fertilizantes en los suelos.

Líquida: Se genera a partir de materia vegetal como, por ejemplo: grasas de animales, aceites vegetales y cultivos con mayor contenido de azúcares. En la actualidad los biocarburantes esenciales son el bioetanol y el biodiesel, el primero se aplica en motores de combustión de gasolina y el segundo se aplica en motores que funcionan con gasoil. Es más seguro de transportar y almacenar, debido a ciertas características que presenta como; el menor punto de inflamabilidad que los convencionales y el mayor punto de ignición.

Gaseosa: Se obtiene mediante la descomposición de materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno que da origen a combustibles de origen no fósil, es decir, biocombustibles gaseosos; el más representativo es el biogás. El biogás se produce en equipos específicos y en medios naturales mediante diversas reacciones de biodegradación de la materia orgánica (Membrillera et al. 2018, p. 6).

2.2.3. Características energéticas de la biomasa

2.2.3.1. Poder calorífico

El poder calorífico superior (PCS) es una medida de la cantidad total de energía liberada cuando se quema completamente una unidad de masa de biomasa. Representa la energía aprovechable en forma de calor y es una variable crucial para determinar su potencial energético. Por otro lado, el poder calorífico inferior (PCI) es una medida que considera únicamente la energía liberada durante la combustión de la biomasa, sin tener en cuenta la energía utilizada en la producción o procesamiento. Es una medida más conservadora y no tiene en cuenta la eficiencia del proceso de combustión. Ambas medidas son importantes para determinar la viabilidad y eficiencia de los procesos de combustión de biomasa, así como para estimar la cantidad de calor que puede ser generada en un sistema de producción de energía.

2.2.3.2. Porcentaje de cenizas

El porcentaje de ceniza es una medida que indica la cantidad de materia no combustible que se genera por cada kilogramo de materia prima utilizada en la combustión. Es una variable importante a tener en cuenta, ya que la presencia de cenizas puede afectar la eficiencia del proceso de combustión y la calidad del producto final.

2.2.3.3. Contenido de humedad

El contenido de agua se establece como la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca, la biomasa es un residuo orgánico natural que posee agua de forma natural, el mismo que implica un enlace directo con la cantidad de calor que suministra la biomasa. Por lo tanto, el agua reduce la capacidad calorífica de la biomasa, es por eso que primero se debe evaporar el agua antes de que el calor se encuentre disponible; de esta forma se eliminará la cantidad de humedad posible y tendrá una mayor eficiencia energética (Moya Roque, et al. 2017, p. 20).

2.2.3.4. Densidad aparente

Es el peso por unidad de volumen del material que se encuentra en estado físico, por ejemplo, material forestal molido o aserrín, en donde el volumen contiene espacios vacíos. Por lo tanto, los combustibles con alta densidad aparente se benefician de la relación de energía por unidad de volumen, de esta forma, se requiere menor tamaño de los equipos y aumentará las etapas entre cargas. En cuanto a los combustibles de bajo densidad aparente se necesitará mayor cantidad de almacenamiento y transporte (Moya Roque, *et al.* 2017, p. 20).

2.2.4. Proceso de conversión de la biomasa en energía

Los procesos termoquímicos y bioquímicos transforman la energía de manera aproximadamente tan eficiente como los demás. También, se ha demostrado que la economía global de estos métodos es idéntica. Por lo contrario, un análisis del ciclo de la vida sugiere que la conversión bioquímica sería efectiva en términos de balance de energía y la cantidad de gases de efecto invernadero que liberaría. Es importante mencionar, que cada uno de estos procesos tiene limitaciones específicas, lo que demanda un cuidado minucioso de la tecnología para una conversión de biomasa efectiva (Gnanasekaran *et al.* 2023, p. 331). Ver ilustración 2-2.

2.2.4.1. Proceso de conversión termoquímicos

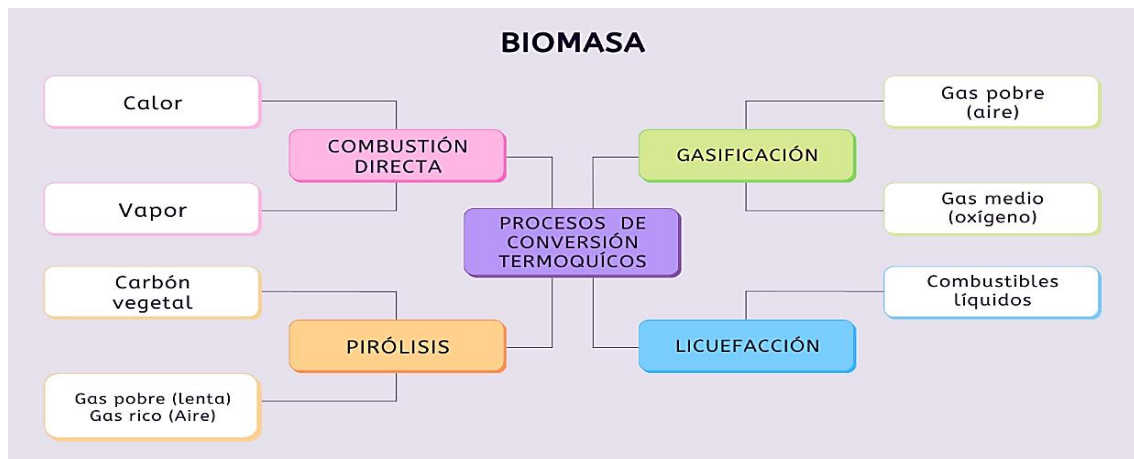


Ilustración 2-2: Proceso de conversión termoquímicos

Realizado por: Casillas G.,2022

Combustión: De la combustión se obtiene energía térmica y es la más utilizada, sus usos son diversificados ya sea para uso domésticos o industriales. Desde el fogón a fuego abierto hasta las calderas de vapor de alto rendimiento son los medios utilizados para la combustión directa de la biomasa.

Gasificación: Consiste en la generación de la quema de la biomasa (residuos orgánicos, forestales) en presencia de oxígeno de forma controlada, de este modo se puede producir un gas combustible llamado gas pobre o gas de síntesis debido a su bajo contenido calorífico en relación al gas natural. La gasificación se genera en un recipiente cerrado comúnmente llamado gasógeno, en el mismo se inserta el combustible y una menor cantidad de aire, que se requiere para completar el proceso de combustión.

Pirólisis: El pirólisis presenta una manera similar de producción a la gasificación, se realiza una oxigenación parcial controlado de la biomasa, que se obtiene como producto una combinación diversa de combustibles sólidos como el carbón vegetal, combustibles líquidos como efluentes piroleñosos y finalmente combustibles gaseosos como el gas de síntesis. Sin embargo, el principal producto de obtención del pirólisis es el carbón vegetal, en este caso se toma en cuenta a los líquidos y gases como subproductos del proceso (Renovables 2008a, p. 9).

Licuefacción: Se trata de la conversión de la biomasa, a presiones elevadas de hidrógeno y bajas temperaturas, en hidrocarburos que presentan características líquidas y estables. Es un proceso de menor interés debido a la complejidad del uso de los reactores y sistemas de combustión, además, son menos rentables económicamente (Urien Pinedo *et al.* 2013, p. 20).

2.2.4.2. Proceso de conversión bioquímico

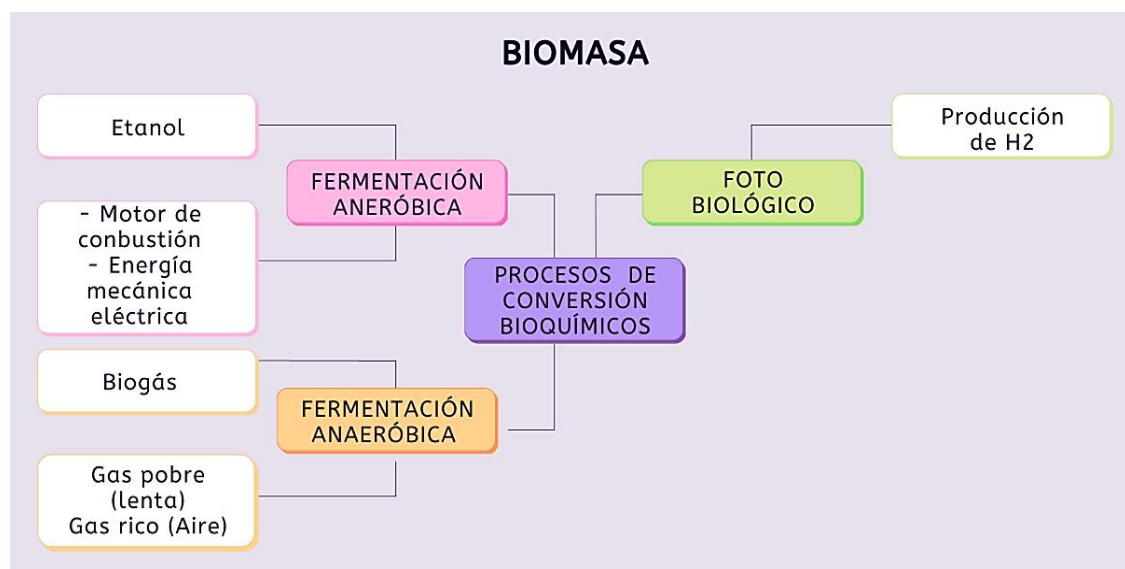


Ilustración 2-3: Proceso de conversión bioquímicos

Realizado por: Casillas G.,2022

Fermentación aeróbica: La formación de alcohol (etanol) se debe la fermentación aeróbica de la biomasa que presenta un alto contenido de almidones y azúcares, las que se utilizan comúnmente

son el sorgo dulce, caña de azúcar, mandioca y maíz. Además, de su amplio uso en la industria de la medicina y licorera, también, es un combustible líquido de características similares a los que adquiere mediante la refinación de petróleo (Renovables 2008, p. 9)

Fermentación anaeróbica: En este tipo de fermentación se produce el biogás comúnmente constituido por metano y dióxido de carbono, puede ser empleado de forma similar al gas natural, se genera mediante residuos vegetales o de animales de baja relación de carbono – nitrógeno, se desarrolla en un recipiente denominado gestor, es así que los residuos de la biomasa degradada en el proceso de producción son excelentes constituyentes para mejorar la calidad de los suelos (Renovables 2008, p. 9).

Fotobiológico: Es un proceso en donde la fotosíntesis mediada por hidrogenadas puede convertir la energía solar en hidrógeno. El proceso de fotobiológico transforma moléculas orgánicas en H₂, mediante una serie de reacciones bioquímicas que involucran varios grupos fotosintéticos bacterianos; los dos elementos fundamentales e importantes para los organismos en crecimiento en el proceso fotobiológico proporcionado por la enzima hidrogenada son la luz solar y el CO₂ (Hongacai, *et al.* 2022, p. 10).

2.2.5. Aprovechamiento energético de biomasa

La energía de la biomasa es un ejemplo de energía renovable, y a comparación de los combustibles fósiles, puede ser utilizada directamente o después de su conversión en otras formas, liberando la cantidad de CO₂ que la biomasa capturó de la atmósfera durante el proceso. Por este motivo la biomasa se considera neutral en carbón, lo que ha producido un interés mundial como alternativa a las fuentes de energía provenientes de los combustibles fósiles, especialmente como fuente de combustibles líquidos y químicos. Actualmente grandes sectores se benefician de la energía, calor y combustible que genera la biomasa, que es producto principalmente de la industria maderera, papelera y química (Antar *et al.* 2021, p. 7).

2.2.6. Potencial energético de biomasa a nivel mundial

La producción de biomasa y su potencial energético para producir energía renovable va depender según su ubicación geográfica, la biodiversidad, la economía, la disponibilidad de la materia prima y la tecnología. Se valora que la biomasa podría suministrar aproximadamente 3000 teravatios hora (TWh) de electricidad. Estudios señalan que para el 2050 se podría ahorrar 1,3Bt de emisiones de CO₂ equivalente por año, y por cada TWh de energía que genere se producirá 472,89 kt de CO₂ (Gielen *et al.* 2019, p. 39).

En el 2014 a nivel mundial, la producción de energía renovable aumentó al 18,6%, sin embargo, en el 2018, aumento en un 14.5%, ligeramente por debajo del crecimiento promedio (16%) de la última década. La región que corresponde a Asia- Pacífico es el mayor contribuyente, represa el 40% de producción de energía renovable a nivel mundial, seguido por Europa y América del Norte (Dudley 2018, p. 116). Ver ilustración 2-4.

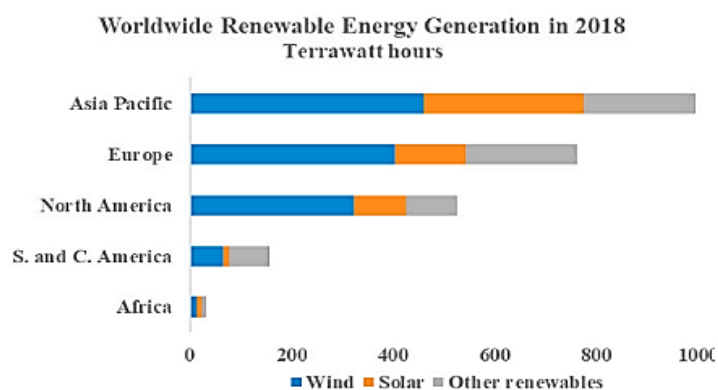


Ilustración 2-4: Energía eólica, solar y otra

Fuente: Renewable and sustainable, R.2022

Así pues, China se encuentra entre los países que genera mayor productividad de energía renovable, aportando con una producción de 634,2 TWh, seguido por Estados Unidos y Alemania, con niveles de producción de 458,5 y 209,2 TWh respectivamente. Por otra parte, el consumo de energías renovables a nivel mundial en el 2018, genero similares tendencias en cuanto a la producción de la misma (Dudley 2018, p. 116). Ver ilustración 2-5.

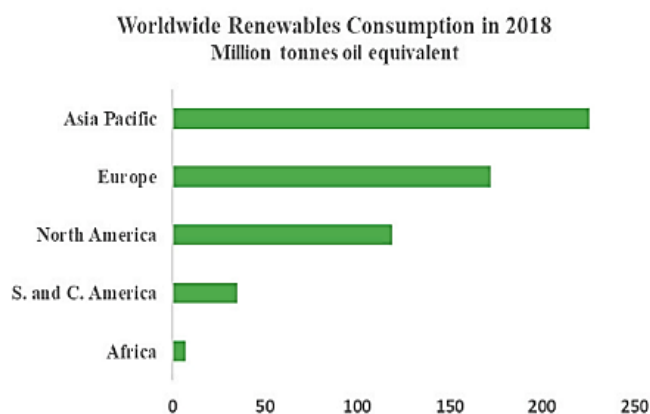


Ilustración 2-5: Consumo de energía renovable

Fuente: Renewable and sustainable, R.2022

La tendencia de consumir energía renovable ha cambiado radicalmente en el mundo durante la última década; en China el consumo se ha multiplicado un 20% desde el 2008, sin embargo, en

ciertos países como Estados Unidos, Canadá, India y Alemania se ha producido en menor cantidad (Antar *et al.* 2021, p. 2). Ver ilustración 2-6.

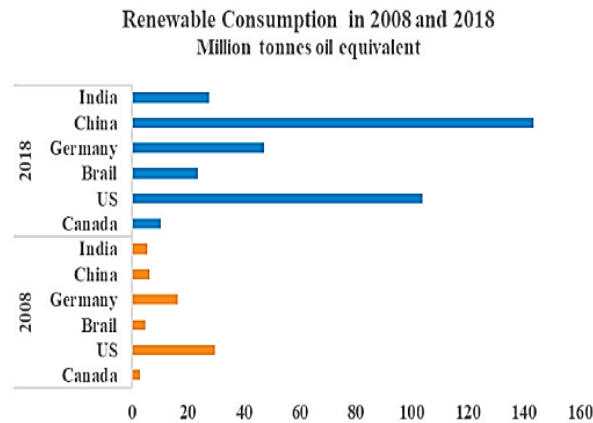


Ilustración 2-6: Consumo de energía renovable

Fuente: Renewable and sustainable, R.2022

De igual forma, la creciente demanda de biocombustibles en el mundo, como alternativa a los combustibles convencionales, ha generado una importante producción de la misma. Países como Estados Unidos, Alemania y Brasil son los mayores productores de biocombustibles en el mundo (Antar *et al.* 2021, p. 2). Ver ilustración 2-7.

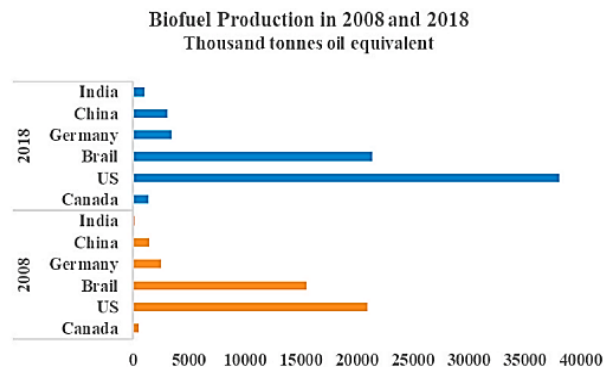


Ilustración 2-7: Producción de biocombustible

Fuente: Renewable and sustainable, R.2022

A nivel mundial, las principales materias primas empleadas para la producción de biocombustibles son el trigo, la soja, el maíz, la caña de azúcar, el girasol y la colza que se utiliza de forma directa o indirecta en la industria alimentaria, actualmente existe un debate, a mayor empleo de las materias primas para la producción de biocombustible, los precios aumentarían notablemente, debido al aumento de la demanda y la reducción de la oferta en el mercado internacional (Zhang *et al.* 2010, p. 446).

2.2.7. *Potencial energético de biomasa en Ecuador*

En el año 2019, la producción de energía fue de 26,408 GWh, de los cuales el 89,63% fue generado por energía hidroeléctrica, el 10,05% se produjo en centrales térmicas y el 1,32% se originó mediante energía eólica, fotovoltaica, biomasa y biogás. En la ilustración 8, se presenta los recursos energéticos no convencionales como, biomasa, viento y energía fotovoltaica, tienen una contribución limitada en comparación con las fuentes de energía tradicionales. El consumo de diésel disminuyó en 93,5 millones de galones en 2018, esto representa el 45% con respecto al año 2009, al mismo tiempo el consumo de fuel oil disminuyó en 39 millones de galones, y el fuel oil residual disminuyó en 10,34 millones galones, en este caso representa 17,33% y 26,56% respectivamente (ARCONEL 2016, p. 2).

Las grandes represas hidroeléctricas, brindan el principal aporte al sector eléctrico ecuatoriano, lo que conlleva a grandes gastos públicos además del considerable daño ambiental. En Ecuador, las plantas hidroeléctricas con una capacidad potencia máxima de 50 MW se considera una planta RE, este sistema representa una potencia instalada del 7,05%. La biomasa ocupa el segundo lugar con el 1,66%, en cuanto a la energía PV y EE contribuyen con menores cantidades, con un 0,31% y 0,24% respectivamente, finalmente el biogás representa el 0,08% de energía (Barragán et al. 2022, p. 2). Ver ilustración 2-8.



Nominal Power in Electric Power Generation		MW	%
 Renewable Total	Large hydroelectric ² > 50 MW	4462.39	51.48
	Small hydroelectric ≤50 MW	611.26	7.05
	Biomass	144.30	1.66
	PV	27.63	0.32
	EE	21.15	0.24
	Biogas	7.26	0.08
	Renewable Total		5273.99
 Nonrenewable Total	Thermal MCI	2010.92	23.20
	Thermal turbogas	921.85	10.63
	Thermal turbovapour	461.87	5.33
	Nonrenewable Total		3394.63
General Total		8668.62	100

Ilustración 2-8: Recursos energéticos renovables y no renovables

Fuente: Barragán M., 2022

2.2.8. *Caracterización de biomasa*

La biomasa es la única fuente de carbono orgánico renovable que se puede utilizar para producir varios tipos de hidrocarburos valiosos, diferentes tipos de biomas están disponibles en varias partes del mundo y su calidad varían según la ubicación y el tiempo de disponibilidad. Es necesario comprender la estructura detallada de la biomasa disponible en el lugar antes de que pueda usarse para cualquier requisito final, existen varias técnicas analíticas que se encuentran disponibles y están en desarrollo para comprender los enlaces y grupos funcionales de la misma. Adicionalmente, proporciona la base para determinar el rendimiento del proceso en términos de

eficiencia de conversión de carbono y eficiencia energética, y facilita la optimización del proceso para maximizar el rendimiento del producto (Biswas *et al.* 2022, p. 151-175).

2.2.8.1. Análisis elementales

El análisis elemental es el método clásico para obtener información sobre la composición elemental de una sustancia, una cantidad de la misma se convierte en compuestos simples y conocidos que contiene solo el elemento que se va a cuantificar. En este caso el análisis proporciona información de la cantidad de concentración de masa de los elementos principales, que son: carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en la muestra (Sellergren *et al.* 2001, p. 27)

2.2.9. Gasificador

El Gasificador debe cumplir con ciertos parámetros específicos de energía, que son necesarios al momento de estimar las mejores alternativas de diseño, también se requiere que el gas pobre o gas de síntesis después de pasar por los diferentes sistemas del gasificador, este libre de material particulado, alquitrán y a una temperatura apropiada para ser utilizada como combustible. Ver ilustración 2-9.

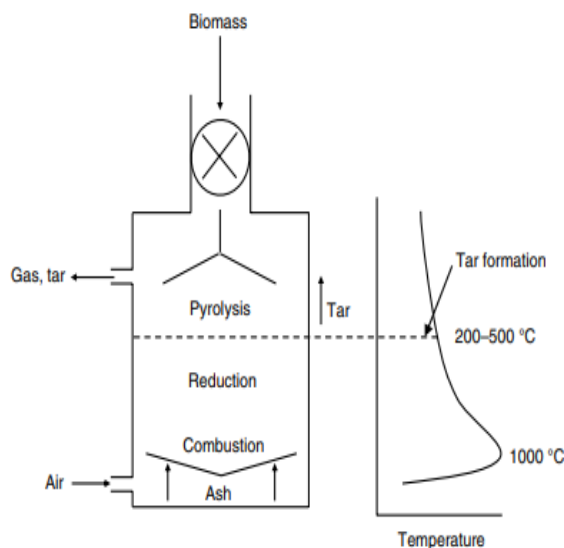


Ilustración 2-9:Proceso químico interno de un gasificador

Fuente: Basu., 2010

En la imagen se idéntica el proceso que se realiza dentro de un gasificador; una partícula de biomasa que ingresa al gasificador genera inicialmente un proceso de secado, continúa con una descomposición térmica (pirólisis). Mas adelante, se desarrollan diferentes reacciones entre sólido-gas o gas-gas, en conjunto con todos los componentes que forman parte del procedimiento, tales como productos de la etapa del secado, agentes gasificantes y la descomposición térmica

que incluye gases, vapores y sólidos. La importancia del proceso se genera en el orden de las etapas, que se determinará dependiendo del tipo de reactor y el agente gasificante (Castro 2015, p. 25).

2.2.10. Tipos de gasificadores

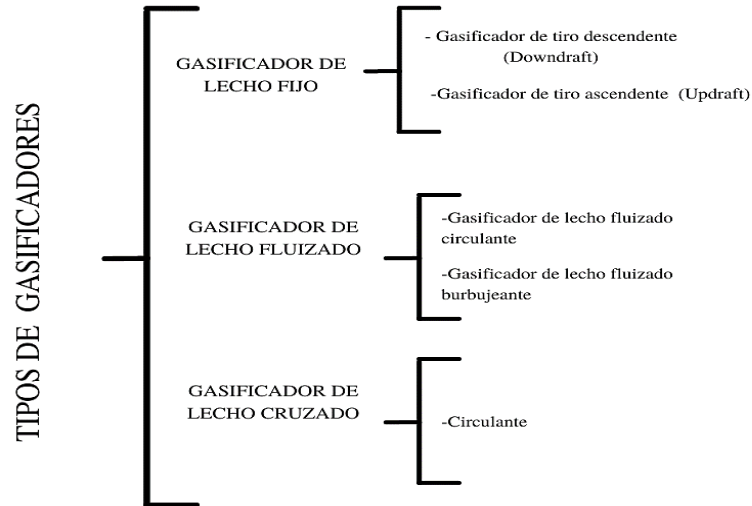


Ilustración 2-10:Tipos de gasificadores

Realizado por: Casillas G.,2022

2.2.10.1. Gasificador de lecho fijo

Son los reactores más antiguos y comunes empleados para sintetizar gas pobre o gas de síntesis, debido a su simple operación y fácil construcción, estos tipos de gasificadores son ampliamente estudiados y utilizados. Los gasificadores de lecho fijo a gran escala actualmente se encuentran perdiendo interés a nivel industrial debido a problemas de ampliación. Sin embargo, no es así para los gasificadores de lecho fijo a pequeña escala con alta eficiencia térmica porque se utilizan para la generación de energía descentralizada y para varias aplicaciones térmicas en las industrias (Klimantos *et al.* 2009, p. 14).

Gasificado de tiro descendente (Downdraft): En un gasificador de tiro descendente, la biomasa y el aire se desplazan en dirección descendente hacia la sección inferior del gasificador, siendo ideal cuando se desea obtener gas limpio, consta de cuatro zonas distintas:

- Zona de secado
- Zona de pirolisis
- Zona de oxidación
- Zona de reducción

Los gases producto salen por un punto exacto por debajo de la rejilla del gasificador, lo que posibilita el craqueo parcial de alquitrán, además, contiene una baja concentración de partículas y alquitrán debido a que gran parte de alquitranes se quemas en el gasificador (Sheth y Babu 2009, p. 3128). Ver ilustración 2-11.

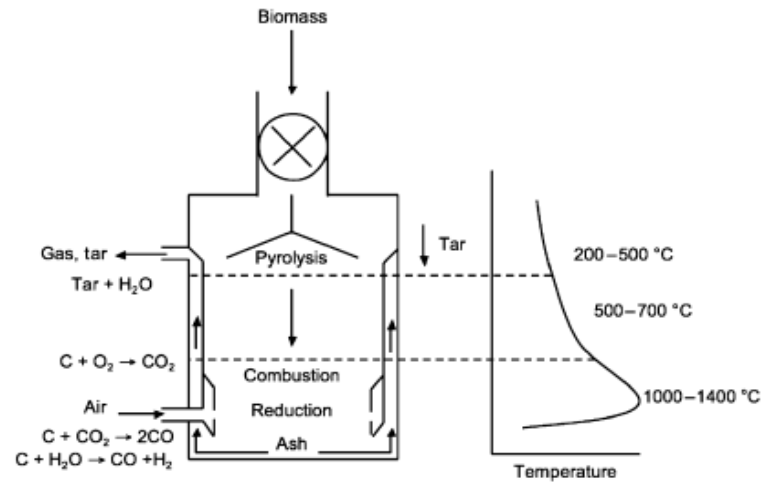


Ilustración 2-11: Gasificador Downdraft

Fuente: Proenza N.,2011

Gasificador de tiro ascendente (Updraft): En este tipo de gasificadores, la biomasa se alimenta desde la parte superior del gasificador, y el aire es suministrado por la parte inferior. Durante el proceso de alimentación, la biomasa se seca y pasa mediante la zona de pirólisis, donde la alimentación se fracciona en compuesto volátiles, carbón y alquitrán. En la zona de combustión, se genera gases de combustión debido a que la biomasa se oxida, pasa por la zona de reducción que contine carbón vegetal, que es producto de la pirolisis de la biomasa, y se transforma en gas productor. El gas de síntesis que surge de la zona de reducción pasa por la pirolisis y después se dirige hacia la zona de secado, el calor que se genera en la zona de combustión es utilizado en las zonas de reducción, secado y pirolisis (Patra *et al.* 2015, p. 3). Ver ilustración 2-12.

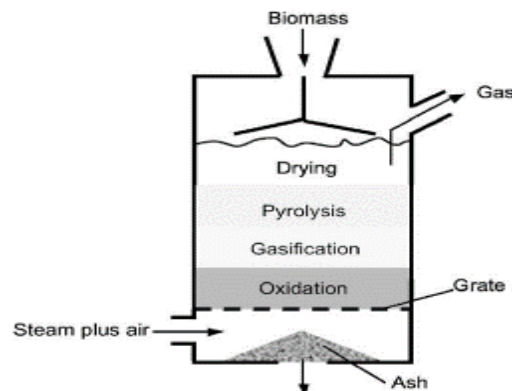


Ilustración 2-12:Gasificador Updraft

Fuente: Proenza N., 2011

2.2.10.2. Gasificador de lecho fluizado

Tecnológicamente los gasificadores de lecho fluizado son los mejores para la combustión de biomasa, debido a su alta eficiencia y flexibilidad en cuanto al tipo de combustible, se usan durante muchos años usualmente para la gasificación del carbón. La principal ventaja que presentan es la distribución uniforme de la temperatura en la zona de reducción, esto se logra mediante la utilización de lecho de material fino granular (arena) en el que circula el aire, fluidificando el lecho. Además, este tipo de gasificadores pueden mejorar el rendimiento de biomasa de alta capacidad y trabajan a altas presiones.

Gasificador de lecho fluizado circulante: Se basa en un proceso de circulación continua entre el recipiente de reacción y un separador ciclónico, donde se separan el material del lecho y las cenizas, en este proceso el carbón regresa al recipiente de reacción.

Gasificador de lecho fluizado burbujeante: El aire se alimenta desde el fondo del reactor a través de una rendija, el material fino se coloca sobre la parrilla por donde se incluye la alimentación de biomasa, la biomasa se prioriza en el lecho caliente formando carbón, alquitrán y compuestos gaseosos. La temperatura del sistema se mantiene entre 700 y 900°C, que a su vez controla la relación de aire con respecto a biomasa (Patra *et al.* 2015, p. 586). Ver ilustración 2-13.

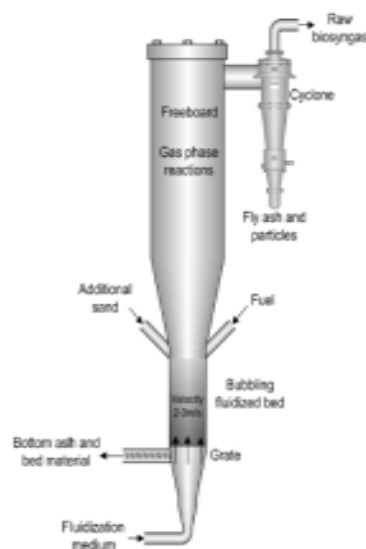


Ilustración 2-13: Gasificador de lecho fluizado circulante

Fuente: Proenza, N.,2011

2.2.10.3. Gasificador de lecho cruzado

En un gasificador de lecho cruzado, la biomasa se alimenta por la parte superior que se mueve hacia la parte inferior, mientras que el aire ingresa por un costado del gasificador, el gas producto sale del lado superior al mismo nivel que se alimenta la biomasa. Se genera una zona de combustión caliente alrededor del ingreso de aire y se forma diferentes zonas de pirólisis y secado en el gasificador. La temperatura del gas que sale es alrededor de 800-900°C, como resultado se desea obtener un gas con alto poder calorífico que no contenga un alto contenido de alquitrán (Gordillo, *et al.* 2009, p. 2793). Ver ilustración 2-14.

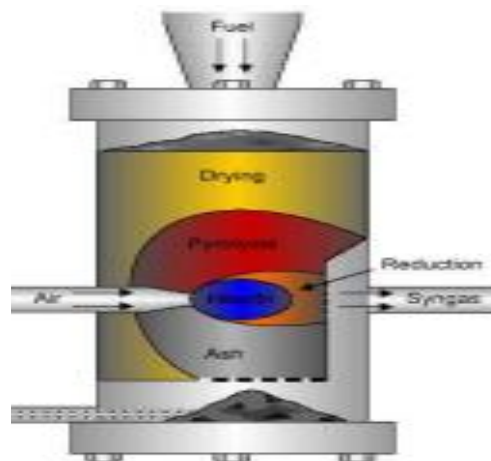


Ilustración 2-14: Gasificador de lecho cruzado

Fuente: Proenza, N., 2011

2.2.11. Gasificación de biomasa

La gasificación de biomasa es un proceso que implica el secado de materia prima seguido de la pirólisis, la combustión parcial y finalmente la gasificación de los productos. Se lleva a cabo dentro de un reactor llamado gasificador, en presencia de un medio gasificante como el aire, vapor de agua (H_2O), oxígeno (O_2) o dióxido de carbono (CO_2) (Sikarwar *et al.* 2016, p. 2941). El gas producido se conoce de forma general gas de síntesis o syngas, que contiene hidrógeno (H_2), carbono (CO), metano (CO_2) entre otros. Las reacciones químicas se producen a una temperatura entre 500 – 1300°C más alta que una normal combustión.

Cuando el componente gasificante es aire, la reacción genera un gas con bajo poder calorífico que se denomina gas pobre, generalmente la calidad del gas se encuentra asociado a la generación de poder calorífico, la cantidad final de alquitrán y material suspendido en el mismo. El gas producido puede ser empleado con fines energéticos para la producción de electricidad y calor en hornos, motores de combustión interna, microturbinas de gas, motores Stirling y sistemas híbridos (Orozco 2017, p. 17).

2.2.12. Agente gasificante

La eficiencia energética del gas dependerá del agente gasificante que se emplee durante el proceso, esto implica diferentes efectos en la gasificación que influyen directamente en la producción del gas, y sus propiedades como la composición, y el poder calorífico. Si el proceso de gasificación actúa con aire, parte de la biomasa se quema en bajas proporciones en presencia de oxígeno y el resto de la biomasa se quema en el proceso de reducción; el gas pobre contiene 50% de hidrogeno y un poder calorífico de $5.5 \text{ MJ}/\text{m}^3$, el uso apropiado de este gas es para motores de combustión interna.

Por otro lado, si la gasificación se genera con oxígeno o vapor de agua, mejora el rendimiento del syngas y se genera en mayor proporción la producción de hidrogeno que puede ser empleado como materia prima para la producción de gasolina sintética y metanol, además mejora la eficiencia del funcionamiento de los equipos. Sin embargo, el agente más utilizado en la industria es el aire, por razones tecnológicas y económicas (Raju, *et al.* 2009, p. 331). Ver tabla 2-2 y 2-3.

Tabla 2-2: Agentes gasificantes

Agente Gasificante	Nombre del Producto	Poder calorífico [MJ/m^3]
Aire	Gas pobre	4-7
Vapor de agua	Syngas	10-18
Oxígeno	Syngas	12-28

Fuente: Orozco L.,2017

Realizado por: Casillas G.,2022

Tabla 2-3: Compuestos de los productos de gasificación

Compuestos	Gas pobre [%]	Syngas [%]
Monóxido de carbono	11-30	40-50
Dióxido de carbono	6-16	10-20
Hidrogeno	10-20	25-80
Metano	1-3	4-8
Nitrógeno	50	--

Fuente: Orozco, L.2017

Realizado por: Casillas G.,2022

En las tablas se observa diferentes datos teóricos de gas pobre producido en la gasificación, en donde el gas de síntesis o syngas presenta mejores características que el gas pobre, pero en cuanto a usos, éste gas es conveniente en términos energéticos a diferencia del syngas que su producción es costosa debido al uso de oxígeno o vapor de agua incluso en el balance de energía global la cantidad de energía utilizada durante el gas de síntesis es mayor.

2.2.13. Proceso de gasificación

El proceso de gasificación de biomasa por lo general involucra reacciones relacionadas con varios fenómenos como la oxidación, la reducción, el secado y la pirolisis. Durante la etapa del secado se disminuye el contenido de humedad de la biomasa, el proceso por lo regular se genera de 100 a 200°C que disminuye la humedad hasta un 5%. Usualmente, el contenido de humedad de la biomasa varía entre 5% y 35%.

Por consiguiente, en la etapa de la pirolisis, la descomposición térmica de la biomasa se genera en ausencia de oxígeno, a su vez se libera materias volátiles como efecto de la descomposición térmica de la biomasa. En consecuencia, la mezcla de gases que desprende la biomasa, contiene monóxido de carbono, óxido de carbono, hidrógeno y gases de hidrocarburo, además la biomasa se reduce a carbón sólido. Los gases de hidrocarburo se condensan a baja temperatura para generar alquitranes líquidos. En cuanto a los gases liberados de las zonas de pirolisis y secado pueden o no pasar mediante la zona de oxidación, todo va depender del tipo de gasificador (Patra *et al.* 2015, p. 585). Ver ilustración 2-15.

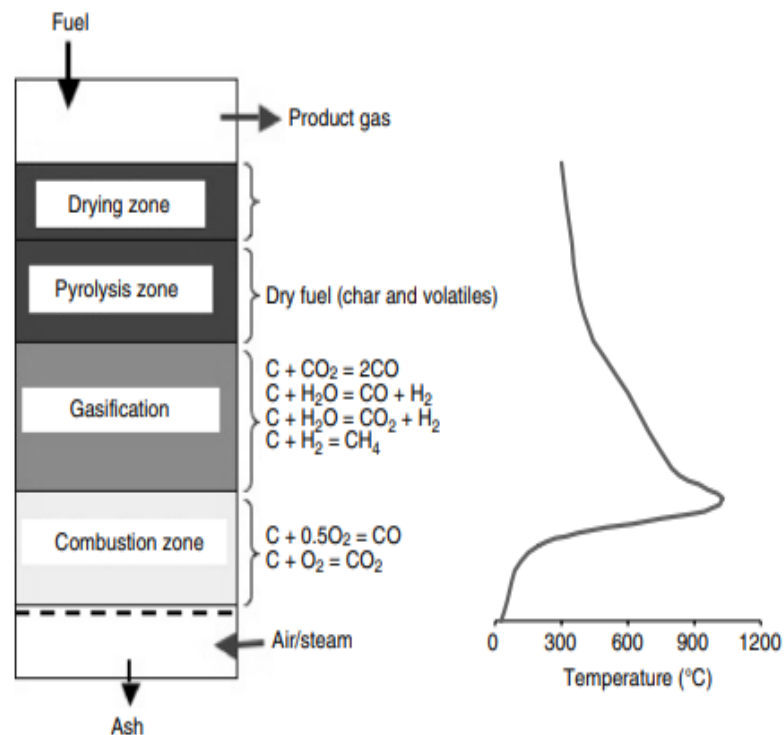


Ilustración 2-15: Proceso de gasificación Updraft en el reactor

Fuente: Orozco L., 2017

2.2.13.1. Zona de secado

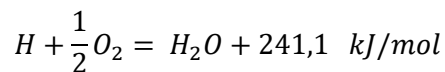
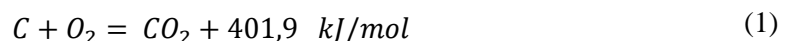
La gran parte de sistemas de gasificación usan biomasa seca con un contenido de humedad de 10% a 20% para la producción de gas combustible con un alto poder calorífico. El secado tiene lugar después de que la biomasa ingresa al gasificador en donde recibe calor de la zona caliente de todo el sistema. El calor producido en el sistema seca la biomasa, la cual libera el contenido de agua es por eso que se debe calentar alrededor de 200°C con la finalidad de eliminar el contenido de humedad. Conforme la temperatura se eleva, las partículas de bajo peso molecular empiezan a volatilizarse (Martínez 2015, p. 49).

2.2.13.2. Zona de pirólisis

Después del secado la biomasa aún continúa calentándose para generar el proceso de pirólisis, que consiste en la degradación térmica en ausencia de oxígeno para lograr que la biomasa se separe en sólido, líquido o gaseoso. En este caso los gases de combustión hacen parte de la zona gaseosa, el carbón pertenece a la parte sólida y el alquitrán a la parte líquida. (Ramírez et al. 2011, p. 3).

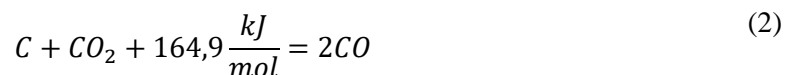
2.2.13.3. Zona de oxidación o combustión

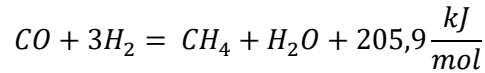
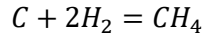
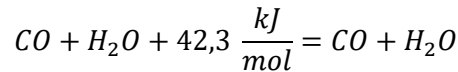
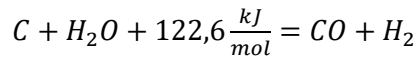
Ocurre cuando el agente gasificante es un oxidante que actúa como oxígeno el cual implica un conjunto de reacciones de oxidación, pueden ser homogéneas o heterogéneas. Generalmente ocurren reacciones exotérmicas lo cual permite generar el calor necesario para que el proceso se mantenga encendido, la temperatura adecuada para el sistema oscila entre 700°C y 2000°C (Pérez et al. 2020, p. 231).



2.2.13.4. Zona de reacción o reducción

Se genera cuando ocurre el contacto directo entre el agente gasificante y la biomasa descompuesta, se origina en fase sólido-gas o gas, además tiene lugar las reacciones del proceso de gasificación tomando en cuenta el equilibrio termodinámico y minimizando la energía libre de Gibbs (Pérez et al. 2020, p. 231).

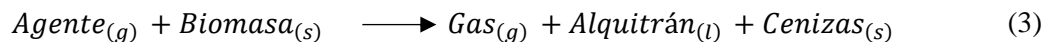




2.2.14. Reacciones producto de la gasificación

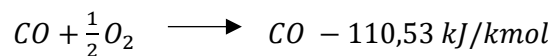
El proceso de gasificación comprende una secuencia de reacciones químicas que se generan en torno a los átomos de carbono de la biomasa. La materia prima o biomasa pasa de ser un sólido a degradarse térmicamente mediante calor y se clasifica en tres partes, una parte que es el producto de la gasificación (gas pobre), una líquida que es el alquitrán y finalmente una parte residual que son las cenizas sólidas (Orozco 2017, p. 16).

De forma general se puede describir de la siguiente manera:

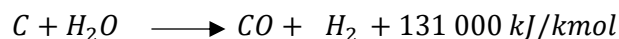


Los principales compuestos producto de la gasificación son el hidrogeno, carbono, dióxido de carbono y metano; su composición dependerá de las condiciones de operación y de las características de la biomasa utilizada (Orozco 2017, p. 16).

Cuando se utiliza el producto gasificado como combustible, se oxida el monóxido de carbono (CO), generando calor. Está representado por la siguiente ecuación:



El alquitrán se reduce, el carbono y dióxido de carbono pasan a ser monóxido de carbono es decir gas combustible; este gas producido es gas de síntesis.



La mayoría de las reacciones que se producen en la gasificación son de tipo endotérmicas, es por esta razón que, en la fase de combustión, fracciones de gases combustibles reaccionan de forma exotérmica con el oxígeno liberando energía para que continúe el ciclo completo (Orozco 2017, p. 16).

Las principales reacciones que se generan en la zona de reducción son las siguientes:

Reacción agua-gas



Reacción de Boudouard



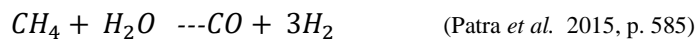
Reacción de metano



Cambio de reacción



Formación de hidrógeno



2.2.15. Gas de síntesis

El gas de síntesis o gas pobre es uno de los productos principales de la gasificación de la biomasa, se encuentra en conjunto con el CO y H_2 . Además, representa una fuente vital de importancia en los combustibles que se emplea para la producción de electricidad y genera productos químicos de bajo impacto ambiental. El gas de síntesis se somete por medio del proceso Fischer Tropsch en éter y metanol para obtener productos como el diésel, la gasolina y otros productos químicos. Existe varios gases que se producen a raíz de la generación del gas de síntesis, entre ellos el hidrogeno, que emplea la reacción de cambio de gas a agua, usualmente se aplica en las pilas de combustible; otro de los gases es el gas sintético natural (SNG). Entre la variedad de aplicación que se le atribuye al gas de síntesis, está la aplicación en la producción de gas de media (BTU) que se utiliza como combustible para turbinas y en el ciclo combinado de gasificación integrada (IGCC) (Sikarwar et al. 2016, p. 2944).

2.3. Cromatografía de gases

Es una técnica analítica que permite la separación de componentes relacionados con mezclas complejas y la identificación del analito de interés, donde se puede cuantificar y cualificar los componentes de la mezcla. Se basa en el conjunto de técnicas del principio de retención selectiva, que tiene como finalidad separar distintos componentes de una mezcla e identificar las cantidades

de los componentes que contenga la mezcla. Cumple con las siguientes funciones básicas (Montoya *et al.* 2012, p. 38):

- Para determinar el analito de interés u obtener los compuestos más puros que pueden ser utilizados posteriormente.
- Medir la proporción de la cantidad de los componentes de la mezcla.
- Las cantidades empleadas para la muestra son pequeñas (Montoya *et al.* 2012, p. 38)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de investigación

En el presente trabajo de titulación se identificará dos enfoques de investigación, cualitativo y cuantitativo.

3.1.1. Enfoque cualitativo

Se desarrollará un enfoque cualitativo, ya que se realizará la caracterización de la biomasa mediante análisis físico químicos que posteriormente nos permitirá determinar la calidad del producto con el que se trabajará en el proceso de gasificación y finalmente se determinará cuál de las muestras es mejor para la obtención del gas de síntesis.

3.1.2. Enfoque cuantitativo

Por otro lado, se ejecutará un enfoque cuantitativo, porque se llevará a cabo una recopilación de datos numéricos a partir de la evaluación de las variables dependientes e independientes, determinando la correlación entre variables como resultado de las muestras, de tal manera que se puedan tabular estadísticamente los datos.

3.2. Alcance de investigación

3.2.1. Investigación exploratoria

En el tema de investigación propuesto se empleará un diseño de tipo exploratorio ya que es el primer peldaño de la investigación porque ayudará a la identificación del proceso de gasificación, de las variables que interviene y las características de la biomasa.

3.2.2. Investigación descriptiva

Será descriptiva ya que busca la incidencia de las diferentes biomásas que están representadas por la cascarilla de arroz y residuos de aserraderos como fuente energética al obtener gas de síntesis.

3.2.3. Investigación no experimental

Es importante mencionar que el diseño de la misma es no experimental ya que no se manipulan directamente las variables como la temperatura, presión o gravedad. Finalmente se realizará una inferencia estadística, es decir que la investigación se apoyará en los datos obtenidos a partir de los resultados.

3.3. Diseño de investigación

El diseño propuesto según el tema de investigación es de tipo completamente aleatorio, que tiene como objetivo comparar entre si resultados, en este caso se comparará los datos del resultado final del gas de síntesis obtenido en el proceso de gasificación, mediante la utilización de las dos biomásas propuestas. Para la caracterización del gas producido en el gasificador, se realizará a través del análisis de cromatografía de gases, que determina la composición del mismo. Además, se realizan un análisis elemental de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno. Antes de llevar a cabo la toma de las muestras, se debe realizar varias pruebas de gasificación y seguir un protocolo de muestreo.

3.3.1. Identificación de variables

3.3.1.1. Variables independientes

Caracterización de la biomasa.

Cantidad de biomasa

3.3.1.2. Variables dependientes

Obtención del gas de síntesis

3.4. Tipo de estudio

El tipo de estudio que interviene en el trabajo de investigación es de campo, ya que todo el proceso se llevará a la práctica mediante una investigación completamente aleatoria que será respaldada por la ejecución de varios tratamientos, con la finalidad de obtener el mejor rendimiento de energía aprovechable.

3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

3.5.1. Preparación de la muestra de la biomasa

Tabla 3-1: Preparación de la muestra

Operación	Sustancias y reactivos	Materiales y equipos	Procedimiento
✓ Triturado	<ul style="list-style-type: none">- Cascarilla de arroz- Residuos madereros	<ul style="list-style-type: none">- Molino micronizador- Balanza analítica- Guantes	<ul style="list-style-type: none">- Limpiar todo el equipo con etanol para evitar contaminación- Pesar la biomasa que se utilizará en el proceso- Alimentar el micronizador con la biomasa- Retirar el producto triturado
✓ Tamizado	<ul style="list-style-type: none">- Cascarilla de arroz- Residuos madereros	<ul style="list-style-type: none">- Torre de tamices	<ul style="list-style-type: none">- Colocar el producto triturado al inicio de la torre de tamices- Agitar constantemente hasta que llegue a la malla # 180 de la torre- Retirar el producto- Pesar en la balanza analítica 4g de cada una de las biomosas- Almacenar el producto tamizado en un tubo de ensayo con tapa

Realizado por: Casillas G.,2022

3.5.2. Caracterización de la biomasa

3.5.2.1. Análisis elemental

Tabla 3-2: Análisis CHON

Operación	Sustancias y reactivos	Materiales y equipos	Procedimiento
✓ Análisis de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON)	<ul style="list-style-type: none">- 2-8gramos de cascarilla de arroz- 2-5 gramos de residuos de aserraderos	<ul style="list-style-type: none">- Analizador elemental orgánico- Balanza analítica- Crisoles- Pinzas- Guantes	<ul style="list-style-type: none">- Realizar el pesaje de la biomasa- Tomar las muestras y colocarlas en cada uno de los crisoles, utilizar las pinzas para cerrarlos- Colocar los crisoles sobre la bandeja del equipo- Encender el equipo- Esperar el tiempo determinado por el equipo para que finalmente arroje los datos que posteriormente serán analizados

Realizado por: Casillas G.,2022

3.5.2.2. Determinación del porcentaje de humedad

Tabla 3-3: Determinación de la humedad

Materiales y equipos	Sustancias y reactivos	Procedimiento
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estufa de secado ✓ Balanza analítica ✓ Desecador ✓ Cápsulas ✓ Pinza ✓ Guantes 	<ul style="list-style-type: none"> - 2-5 gramos de cascarilla de arroz - 2-5 gramos de aserraderos 	<ul style="list-style-type: none"> - Esterilizar las capsulas en la estufa durante aproximadamente 1 hora - Pesar las cápsulas vacías - Colocar las muestras en diferentes capsulas tomando en cuenta la cantidad que se vaya utilizar en un intervalo de 2 a 8 gramos de biomasa y después cerrar con la ayuda de las pinzas - Llevar la muestra hacia la estufa y observar que tenga una temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. - Transcurrido el tiempo necesario retirar las capsulas y trasladarlas hacia el desecador. - Finalmente retirar y pesar la muestra - El cálculo de la humedad se realiza con la siguiente fórmula: $\% \text{ Humedad} = \frac{(W1 - W2)}{W1} \times 100$ <p>W1: Peso inicial de la muestra W2: Peso de la muestra seca</p>

Realizado por: Casillas, G.2022

3.5.2.3. Determinación del porcentaje de cenizas

Tabla 3-4: Determinación de cenizas

Materiales y equipos	Sustancias y reactivos	Procedimiento
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mufla ✓ Desecador ✓ Reverbero ✓ Balanza analítica ✓ Crisoles ✓ Pinza ✓ Guantes 	<ul style="list-style-type: none"> - 1-2 gramos de cascarilla de arroz - 1-2 gramos de aserrín 	<ul style="list-style-type: none"> - Esterilizar las capsulas en la estufa durante aproximadamente 4 hora - Pesar los crisoles vacíos - Colocar 1g de las muestras en diferentes crisoles - Con la ayuda del reverbero, se calcina en su totalidad las muestras hasta que no haya presencia de humo o vapor. - Ingresar los crisoles en la mufla a una temperatura de 600°C durante por 2 horas. Según la norma ASTM D 1102-84. - En el desecador esperar que las muestras adquieran la temperatura ambiente durante un tiempo aproximado 3 horas - Finalmente retirar y pesar la muestra - El cálculo de las cenizas se realiza con la siguiente fórmula: $\% \text{ Ceniza} = \frac{(A - B)}{C} * 100$ <ul style="list-style-type: none"> A= Peso de cenizas + cápsula B = Peso de la cápsula C = Peso de la muestra

Realizado por: Casillas, G.2022

3.6. Análisis termodinámico del gasificador

Se realiza el análisis termodinámico del gasificador tomando en cuenta los parámetros de funcionamiento, en la zona de gasificación se cuantifican las variables de entrada para obtener las variables de salida, con la finalidad de obtener gas de síntesis.

3.6.1. Cantidad estequiométrica de aire para una combustión completa

Teniendo en cuenta que el aire contiene 23,16% de oxígeno, 76,8% de nitrógeno y 0,04% de gases inertes, el aire seco necesario para la combustión completa de una unidad de peso de hidrocarburo, viene dado por:

$$m_{at} = 0,1153 * C + 0,3434 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,0434 * S \quad (1)$$

Donde:

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

C, H, O, S = Son los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre respectivamente en base seca (Basu 2010, p. 59-60).

Los valores de la composición elemental de la biomasa se realizaron en el laboratorio de analítica de la ESPOCH, en este caso se obtuvo el oxígeno por diferencia y debido a la sensibilidad del equipo el azufre no presentó valores. Ver tabla 3-5.

Tabla 3-5: Composición elemental de la biomasa

Biomasa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cenizas (%)	U (%)	PCI (kJ/kg)
Cascarilla de arroz	37,26	4,96	56,82	0,96	-	4,92	9,06	2,41
Residuos madereros	45,82	5,71	48,07	0,40	-	1,34	4,60	3,64

Realizado por: Casillas G., 2022

Los valores de la Tabla 3-5-3 se encuentran en porcentajes, los mismos que debe convertirse en coeficientes estequiométricos y se obtendrán mediante un análisis gravimétrico de la composición química de los valores porcentuales de cada uno de los elementos que componen la biomasa.

$$G_{xi} = \frac{i}{100} \quad (2)$$

i = Composición de los elementos (%)

G_{xi} = Fracción gravimétrica (kg)

3.6.2. Poder calorífico inferior (PCI)

Es el calor que se entrega al entorno a presión constante, que se obtiene en la combustión completa; en este caso la totalidad de agua que se produce por la combustión del hidrogeno está en estado de vapor (Basalo 2006, p. 7). Con la fórmula de Dulong que calcula el poder calorífico inferior de un combustible seco.

$$PCI = 8,140 * C + 29,000 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,220 * S \quad (3)$$

Con los valores en peso de la biomasa seca y con la ecuación (3) se obtiene le valor el PCI de la biomasa de cascarilla de arroz y residuos forestales respectivamente.

Cascarilla de arroz

$$PCI = (8,140 * 0,3726) + 29,000 * \left(0,0496 - \frac{0,5682}{8} \right) + 2,220 * 0$$
$$PCI = 2,41 \text{ kJ/kg}$$

Residuos forestales

$$PCI = (8,140 * 0,4582) + 29,000 * \left(0,0571 - \frac{0,4807}{8} \right) + 2,220 * 0$$
$$PCI = 3,64$$

3.6.3. Poder calorífico superior (PCS)

Se calcula considerado que el agua resultante de la combustión se encuentra en estado líquido, es decir que el vapor de agua estará totalmente condensado. El vapor de agua proviene de la cantidad de humedad que contiene el combustible, además de la combinación del hidrógeno con el oxígeno (Ayala Blanco,2017).

$$PCS = 8,140 * C + 34,400 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,220 * S \quad (4)$$

Se aplica la ecuación de Dulong, pero esta vez para calcular el poder calorífico superior de un combustible seco, con la ecuación (4)

Cascarilla de arroz

$$PCS = (8,140 * 0,3726) + 34,400 * \left(0,0496 - \frac{0,5682}{8} \right) + 2,220 * 0$$
$$PCS = 2,29 \text{ kJ/kg}$$

Residuos madereros - viruta de eucalipto

$$PCS = (8,140 * 0,4582) + 34,400 * \left(0,0571 - \frac{0,4807}{8}\right) + 2,220 * 0$$

$$PCS = 3,62 \frac{kJ}{kg}$$

3.6.4. Coeficiente de aire en exceso

Es un parámetro de gran importancia en la gasificación, es la relación entre la masa de aire real y la masa de aire estequiométrico y se utiliza para determinar la falta de aire en el gasificador para realizar una combustión completa (Martínez y Pallarés 2015, p. 29).

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

Donde:

EA = Coeficiente de aire en exceso

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

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

Tabla 3-6: Coeficiente de exceso de aire por diferentes tipos de combustible

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

Fuente: Orozco, L.2017

Realizado por: Casillas, G.2022

3.6.4.1. Relación entre la ratio de equivalencia y aire en exceso

Es la relación que existe entre el aire actual y el aire estequiométrico o lambda (λ), se espera que mientras disminuya el valor del ratio de equivalencia (ER) se genera más gas y menos alquitrán. En cuanto al coeficiente de aire en exceso (EA) indica que, si el valor es mayor a 1 se generará mayor cantidad de alquitrán y la eficiencia del gas será menor además se reducirá el valor del poder calorífico inferior del gas resultante (Martínez y Pallarés 2015, p. 29).

Es recomendable $\lambda=1$.

$$ER(< 1,0)_{gasificación} = \lambda = EA(> 1,0)_{combustión} \quad (6)$$

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

$\lambda < 1,0$ = Defecto de aire – se dice que la mezcla es rica (Con déficit de aire del 5% al 15% es decir el valor de λ entre 0,85 a 0,95, se obtiene potencia máxima y mayor consumo)

$\lambda > 1,0$ = Hay exceso de aire – se dice que la mezcla es pobre (Con exceso de aire del 5% al 10% es decir el valor de λ entre 1,05 a 1,3, se obtiene una potencia bajo y un consumo mínimo)

3.6.5. Cantidad de aire para gasificar

El suministro de aire como agente gasificante es tan solo una parte de la masa de aire estequiométrico, este porcentaje dependerá del tipo de gasificador en el cual se encuentre trabajando. Filtro

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

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

ER = Relación de equivalencia

La relación de equivalencia para gasificación de biomasa se encuentra entre valores de 0,2 y 0,3; en los gasificadores de tipo downdraft genera un mejor rendimiento con valores entre 0,2 a 0,25 (Basu 2010, p. 195).

3.6.6. Balance global del sistema

$$\Delta E_{sistema} = E_{entra} - E_{salida} \quad (8)$$

$$\Delta E_{sistema} = E_{entra} - E_{salida} = \Delta Q + \Delta E_{masa} + \Delta W$$

$$\Delta E_{sistema} = E_{entra} - E_{salida} = Q_{entra} - Q_{salida} + E_{entra \text{ masa}} + W_{entra} - W_{salida}$$

3.6.7. Balance de masa

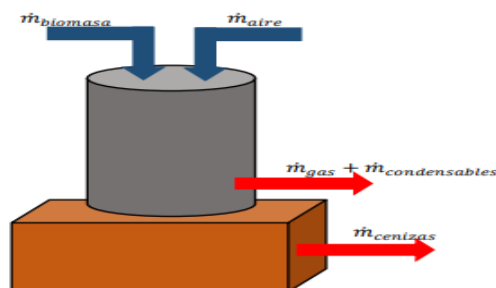


Ilustración 3-1: Balance de masa

Fuente: Orozco L.,2017

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

Donde:

$\dot{m}_{biomasa} = m_b$ = Es la cantidad de biomasa forestal.	[kg/g]
$\dot{m}_{aire} = m_{ag}$ = Flujo másico de aire para la gasificación	[kg/g]
\dot{m}_{gas} = Flujo másico de gas de síntesis	[kg/g]
$\dot{m}_{condensable}$ = Flujo másico de condensables (alquitrán)	[kg/g]
$\dot{m}_{cenizas}$ = Flujo másico de ceniza	[kg/g]

3.6.8. Balance de energía

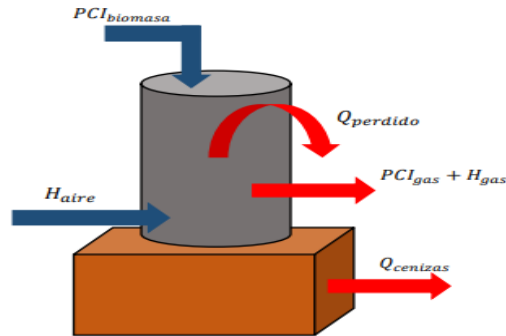


Ilustración 3-2: Balance de energía

Fuente: Orozco L.,2017

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{biomasa} * PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} * h_{aire} \\ & = \dot{m}_{gas} * PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} * h_{gas} + \dot{m}_{cenizas} * CP_{cenizas} (T_{cenizas} - T_{amb}) + Q_{perdido} \end{aligned} \quad (10)$$

Donde:

$PCI_{biomasa}$ = Poder calorífico inferior de la biomasa	[MJ/kg]
h_{aire} = Entalpía del aire, agente gasificante	[MJ/kg]
PCI_{gas} = Es el poder calorífico inferior del gas producido (cromatografía)	[MJ/kg]
h_{gas} = Entalpía del gas pobre	[MJ/kg]
$CP_{cenizas}$ = Calor específico de las cenizas	[MJ/kg*k]
$T_{cenizas}$ = Temperatura de las cenizas	[°C]
T_{amb} = Temperatura ambiente	[°C]
$Q_{perdido}$ = Tasa de calor perdido	[kw]

3.6.9. Calor perdido

Para definir el valor del calor perdido, se toma en cuenta una parte de energía que se obtiene de la transferencia de calor, desde el gasificador hacia el ambiente. Esta pérdida de calor se define como transferencia de calor por convección natural.

$$Q_{perdido} = h * A_s * (T_s - T_{amb}) \quad (11)$$

Donde:

h = Coeficiente de convección [W/m^2K]

A_s = Área de la superficie que entrega calor (reactor) [m^2]

T_s = Temperatura de la superficie [$^{\circ}C$]

T_{amb} = Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

Para definir el valor de calor perdido se toma en consideración las siguientes ecuaciones:

3.6.9.1. Coeficiente de convección

$$h = \frac{Nu * k}{Lc} \quad (12)$$

Donde:

Nu = Número adimensional de Nusselt

k = Conductividad térmica del aire a temperatura fílmica [W/mK]

3.6.9.2. Número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g * \frac{1}{Tf} (T_s - T_{amb}) * Lc^3}{\nu^2} * Pr \quad (13)$$

Donde:

Ra = Número de adimensional de Rayleigh

g = Valor de la constante gravitacional [m/s^2]

Lc = Longitud característica, altura del cuerpo del gasificador [m]

ν = Viscosidad cinemática del aire [$\frac{m^2}{s}$]

$Pr = 0,7082$ es el número de Prandtl

Tf = Temperatura fílmica ($Tf = \frac{T_s + T_{amb}}{2}$) [$^{\circ}C$]

3.6.9.3. Número de Nusselt – Transferencia de calor en convección libre

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (14)$$

Ra = Número adimensional de Rayleigh

Pr = Número de Prandtl a temperatura fílmica del aire

3.6.10. Eficiencia de la gasificación

3.6.10.1. Eficiencia en frio

Es considerada como el porcentaje de energía contenida en el gas, que se aplica para usos indirectos de calor, es decir que después de ser producido se enfriará para usos posteriores; como en el funcionamiento de motores a combustión o generación de otras energías, también es conocido como eficiencia mecánica (Brynda *et al.* 2020, p. 6).

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_{gas} * PCI_{gas}}{\dot{m}_{biomasa} * PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} * h_{aire}} \quad (15)$$

Donde:

η_F = Eficiencia en frio del proceso de gasificación en %

3.6.10.2. Eficiencia en calor

Al igual que la eficiencia en frio, es considerado como el porcentaje de energía contenido en el gas, con la diferencia que se aplica para usos directos de calor; es decir que el gas será utilizado inmediatamente después de ser producido sin atravesar por un proceso de reposo o enfriado (Brynda *et al.* 2020, p. 6).

$$\eta_C = \frac{\dot{m}_{gas} * PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} * h_{gas}}{\dot{m}_{biomasa} * PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} * h_{aire}} \quad (16)$$

Donde:

η_C = Eficiencia en calor del proceso de gasificación en %

3.6.11. Régimen de operación

Entre varios puntos importantes a considerar en un proceso de gasificación, es el funcionamiento del reactor y el régimen en el cual se encuentra operando, puede ser batch (discontinuo) o continuo. El diseño el reactor influye directamente en los parámetros de masa y energía del proceso. El reactor que actualmente existe en la facultad de mecánica opera en régimen discontinuo, a continuación, se describe las etapas:

Se enciende el reactor y se espera que alcance la temperatura adecuada ($t_{encendido}$), después se procede al cierre del reactor.

Se carga la biomasa en la tolva, que después ingresará al reactor (t_{carga})

Empieza el proceso de gasificación, hasta obtener el gas deseado ($t_{reacción}$), el tiempo de reacción dependerá de la duración de la biomasa dentro del reactor.

Se deja enfriar el reactor, después se retira las cenizas ($t_{descarga}$)

Se limpia en su totalidad el reactor y se retira residuos indeseados ($t_{limpieza}$)

Una vez descrito las etapas por las cuales opera el reactor, se procede a obtener el tiempo del reactor. En este caso se denomina tiempo muerto a las etapas en donde no se utilizó el tiempo para la reacción. (Castello et al. 2014, p. 18).

$$t_{reactor\ batch} = t_{reacción} + t_{muerto} \quad (17)$$

$$t_{reactor\ batch} = t_{reacción} + t_{endendido} + t_{carga} + t_{descarga} + t_{limpieza}$$

3.7. Descripción del gasificador existente

El gasificador se encuentra ubicado en la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, forma parte del laboratorio de Termodinámica, se utiliza para fines educativos e investigativos, a continuación, se indican los datos técnicos. Ver tabla 3-7; ilustración 3-3 y tabla 3-8.

Tabla 3-7: Características del gasificador

Características	Descripción
Tipo de gasificador	Down draft, lecho fijo
Sistema de tratamiento de gas	Reactor, ciclón, enfriador o blower, filtro de gas, caudalímetro
Altura del gasificador	2,7 m
Temperatura	500-1200°C
Combustible	Biomasa – humedad menor al 10%
Capacidad de procesamiento	40 kh/h
Dimensiones de biomasa	Elementos de hasta 10 cm por lado aproximadamente
Agente gasificante	Aire

Fuente: Orozco L.,2017

Realizado por: Casillas G.,2022

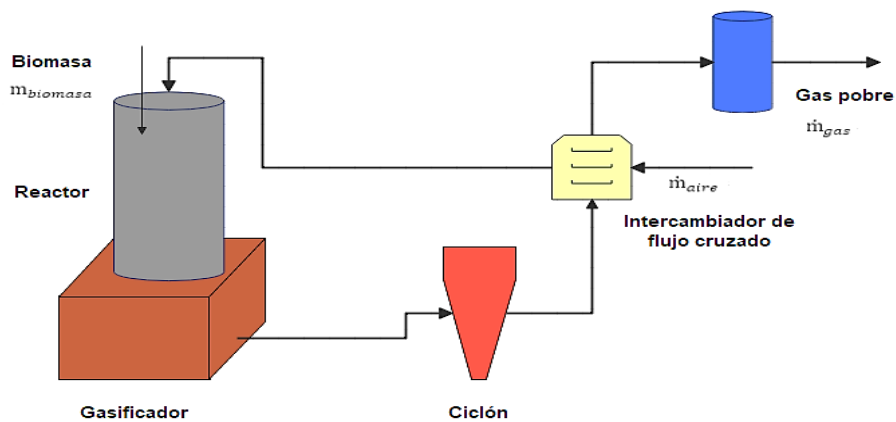


Ilustración 3-3: Diagrama de bloques del gasificador

Realizado por: Casillas G.,2022

Tabla 3-8: Descripción de los elementos que conforman el gasificador

Elementos	Descripción	Condiciones de trabajo
Reactor	Es el área en donde se generan las reacciones de combustión, con la ayuda de la biomasa que actúa como agente gasificante	Está conformado por ladrillo refractario que soporta temperaturas por encima de los 1500°C
Ciclón	Es el primer elemento que receipta el gas, además, retiene el material particulado de mayor tamaño. Existe un parámetro llamado concentración de partículas en la corriente gaseosa C_{par} , que permite la generación de polvo en cantidades aproximadas de 0,5 a 5 g/m ³ en gasificadores tipo downdraft.	Separa polvo entre 60 y 65 % Temperatura del gas 115 – 120°C
Intercambiador de flujo cruzado	El intercambiador de flujo cruzado actúa como enfriador e intercambiador de calor, en el enfriador cumple la función de enfriar el gas producto con la finalidad de aumentar el valor de la densidad con la que ingresa a la cámara de combustión y evitar que se condense al entrar en contacto con el aire. Como intercambiador de calor, aumenta el valor de la temperatura ambiente para generar mayor calor en el reactor	Reduce la temperatura del gas que pasa por el ciclón a 70°C <i>Temperatura ambiente</i> Temperatura ingreso: $T_{amb 1}$ es 22°C Temperatura salida: $T_{amb 2}$ es 48°C <i>Temperatura del gas</i> Temperatura ingreso: $T_{g 1} = 120°C$ Temperatura de salida: $T_{g 2} = 70°C$

Realizado por: Casillas G.,2022

3.7.1. Instrumentación

El gasificador actualmente consta con cuatro termocuplas que operan a lo largo del reactor, las mismas que se utilizan para determinar la temperatura; que es la variable de interés, además, se lleva el control de las temperaturas en las diferentes zonas de gasificación. Ver tabla 3-9.

Tabla 3-9: Instrumentación instalada en el reactor

Zona de gasificación	Tipos de termocuplas	Temperatura de gasificación °C	Temperatura máxima de funcionamiento °C
Zona de secado	PT100	100°C a 200°C	-200°C a 850°C
Zona de pirolisis	PT100	300°C a 500°C	-200°C a 850°C
Zona de combustión	PT100	100°C a 300°C	-270°C a 1370°C
Zona de reducción o gasificación	Tipo J	600°C a 1000°C	-270°C a 1370°C

Fuente: Herrera G.,2019

Realizado por: Casillas G.,2022

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Procedimiento experimental

En esta parte del capítulo se indica como se lleva a cabo la parte experimental, la misma que tiene como finalidad identificar las condiciones de trabajo, medir los parámetros de funcionamiento como el caudal, la temperatura y la cantidad de gas producido en base al rendimiento del gasificador.

4.1.1. Condiciones atmosféricas para gasificar

4.1.1.1. Presión atmosférica

Tomando en cuenta que Riobamba se encuentra a 2 754 m sobre el nivel del mar (z), la T_{amb} es 22°C (295,15 K), el resultado del valor de la presión atmosférica es:

$$P_{atm} = 101325 * \left(\frac{T_{amb} - 0.0065 * z}{T_{amb}} \right)^{5.256} \quad (4)$$

$$P_{atm} = 101325 * \left(\frac{295,15 - 0.0065 * 2754}{295,15} \right)^{5.256}$$

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

4.1.1.2. Densidad del aire

Con la ecuación de los gases se determina el valor de la densidad del gas, considerando que R_d es la constante de gases, pero para aire seco.

$$\rho_{aire} = \frac{P_{atm}}{R_d * T_{amb}} \quad (5)$$

Donde:

R_d = Constante de los gases para aire seco

T = Temperatura promedio

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

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

Tabla 4-1: Parámetros de gasificación

Parámetros operacionales	
Tipo de gasificador	Downdraft, lecho fijo
Agente gasificante	Aire
Densidad del aire	0,86 kg/m ³
Cantidad de biomasa	30 kg/h, en total funcionamiento del gasificador
Madera trozada, para el arranque	40 kg, dimensiones aproximadas 20cm por lado
Temperatura ambiente	22°C
Presión atmosférica ESPOCH	72928 Pa

Realizado por: Casillas G.,2022

4.1.2. Protocolo para gasificar

Para el protocolo de gasificación se debe tener en cuenta lo siguiente:







Previo al proceso se debe pesar la biomasa con una balanza digital, se prepara dos porciones de 15kg para ser suministrada cada media hora después de los 60 minutos de encendido. Cuando la biomasa se encuentre en la tolva se sugiere suministrar con precaución para evitar que toda la biomasa descienda al reactor y lo apague. En la tabla 10-3 se indica los parámetros operacionales para el correcto funcionamiento.




Verificar que el centro del control se encuentre encendido, el correcto funcionamiento de las termocuplas y el caudalímetro, y el suministro de energía a los ventiladores. Se espera que el gasificador obtenga 500°C de temperatura como mínimo para cerrar las compuertas y evitar fugas. Desde el primer momento que el gasificador se encuentre encendido se procede a tomar los valores de temperatura.

El equipo se mantiene encendido durante una hora con la finalidad que toda la madera se combustione en su totalidad, además, sirve para calentar el reactor, el mismo que adquirirá una temperatura de trabajo. Transcurrido ese tiempo se procede arrojar biomasa desde la tolva. Mientras la biomasa en combustión se encuentra dentro del reactor, podemos observar que, por la salida de gases existe la presencia de un gas espeso que va tomando claridad conforme pasa el tiempo.

Con la ayuda de un mechero procedemos a encender y se contempla una llama de color azul, que verifica la presencia de gas. Mientras el tiempo de encendido de la llama es constante, se procede a tomar la muestra de gas en las respectivas fundas tedlar que fueron adquiridas en la EPN. Ver tabla 4-2.

Tabla 4-2: Procedimiento gasificación

PROCESO DE GASIFICACIÓN		
Pesaje de biomasa		
Encendido del gasificador		
Verificación del correcto funcionamiento del centro de control		
Suministro de biomasa		
Cierre de compuertas		
Toma de datos de temperatura		

Presencia de gas	
Toma de muestra en la funda tedlar	
Muestra de gas	

Realizado por: Casillas G.,2022

4.2. Valoración energética de la biomasa de cascarilla de arroz

Una vez encendido el gasificador se tomó la temperatura cada 10 minutos durante una hora, después de transcurrido este tiempo se registra los datos cada 15 minutos, hasta aproximadamente 3 horas. Ver tabla 4-3.

Tabla 4-3: Datos de gasificación de la cascarilla de arroz

Temperatura	Tiempo (min)	Termo 4 (°C) PT100	Termo 5 (°C) PT100	Termo 6 (°C)	Termo 7 (°C)	Termo 8 (°C)
t_0	0	25,5	22,4	44	35	23
t_1	10	25,40	22,50	73	38	86
t_2	20	25,60	22,70	86	47	456
t_3	30	25,90	23,60	115	61	460
t_4	40	26,70	24,70	277	101	568
t_5	50	27,50	24,90	253	158	828
t_6	60	28,20	24,80	290	186	901
t_7	70	29,10	24,70	329	226	728
t_8	85	29,80	24,80	286	265	734
t_9	100	31,20	24,70	285	302	584
t_{10}	115	32,50	24,30	275	315	524
t_{11}	130	33,60	23,90	287	325	898
t_{12}	145	34,00	23,60	302	362	918
t_{13}	160	35,80	23,60	315	378	876

Realizado por: Casillas G.,2023

La primera gasificación se realizó con biomasa de cascarilla de arroz, también se obtuvieron los resultados de los análisis elementales que indica la composición química de la biomasa.

Previo a la determinación del valor de la masa de aire estequiométrico se define los valores de la composición química de la biomasa, estas cantidades son porcentuales las mismos que primero deberán ser convertidos en fracciones gravimétricas con la ecuación (2) , los valores se toman de la Tabla 3-5-3.

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

$$G_{xC} = \frac{37,26}{100} = 0,3726 \text{ kg}$$

$$G_{xH} = \frac{4,96}{100} = 0,0496 \text{ kg}$$

$$G_{xO} = \frac{56,82}{100} = 0,5682 \text{ kg}$$

$$G_{xN} = \frac{0,96}{100} = 0,0096 \text{ kg}$$

Con los valores calculados de la fracción gravimétrica en kg, se procede a remplazar en la ecuación (1) para determinar el valor de la masa de aire estequiométrico.

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

$$m_{at} = (0,1153 * 0,3726) + 0,3434 \left(0,0496 - \frac{0,5682}{8} \right) + (0,0434 * 0)$$

$$m_{at} = 0,035 \text{ kg/kg}$$

Se determina la masa de aire real requerido para el proceso de combustión completa con la ecuación (5) , el valor de ER que se utilizo es 1,5 para combustibles sólidos que se encuentra en la Tabla 3-6.

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

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

$$m_{ar} = 1,5 * 0,035$$

$$m_{ar} = 0,052 \text{ kg/kg}$$

En cuanto a la relación entre la ratio de equivalencia (ER) y el coeficiente de aire en exceso (EA) se demuestra lo siguiente, ecuación (6)

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

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

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{0,052}{0,035} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = 1,485 = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

Para determinar la cantidad de masa de aire necesario para realizar la gasificación se toma el valor de la masa de aire estequiométrico por ER que presenta valores de 0,2 a 0,25 que son recomendados para un mejor rendimiento en gasificadores tipo Down draft, se aplica la ecuación (7).

$$M_{\text{ag}} = m_{\text{at}} * ER$$

$$m_{\text{ag}} = 0,035 * 0,20$$

$$m_{\text{ag}} = 0,007 \text{ kg/kg}$$

4.2.1. Cálculo del balance de masa para la biomasa de cascarilla de arroz

Con los datos obtenidos durante el proceso de gasificación se realizan los cálculos para la elaboración del balance de masa. Ver tabla 4-4.

Tabla 4-4: Guía durante la gasificación

Descripción	Cascarilla de arroz
kg de biomasa utilizado	30 kg
Tamaño de partícula	1-2 cm
Tiempo de inicio de gasificación (tiempo de llama)	20 min
Tiempo de gasificación	35 min
Tiempo total del proceso de gasificación	3 h
Cenizas	4kg
Alquitrán	500 ml
Temperatura ambiente	22°C
Humedad relativa	38,6%

Realizado por: Casillas G.,2023

Con la ecuación (9) calculamos:

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

Entradas

\dot{m}_{biomasa} = Flujo másico de biomasa (cascarilla de arroz)

$$\dot{m}_{\text{biomasa}} = \frac{30 \text{ kg}}{3 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{\text{biomasa}} = 10 \text{ kg/h}$$

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

$$\dot{m}_{\text{aire}} = 60,66 \text{ kg/h}$$

Salidas

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

$$\dot{m}_{\text{alquitrán}} = \frac{0,5 \text{ kg}}{3 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{\text{alquitrán}} = 0,16 \text{ kg/h}$$

\dot{m}_{cenizas} = Flujo másico de cenizas

$$\dot{m}_{\text{cenizas}} = \frac{4 \text{ kg}}{3 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{\text{cenizas}} = 1,33 \text{ kg/h}$$

\dot{m}_{gas} = Flujo masico de gas (salida) se obtiene con la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

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

$$\dot{m}_{\text{gas}} = (10 + 60,66 - 0,16 - 1,33) \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = 69,17 \text{ kg/h}$$

Para un mejor entendimiento se resumen los valores del balance de masa en la siguiente tabla. Ver tabla 4-5.

Tabla 4-5: Resultados del balance de masa de la cascarilla de arroz

ENTRADAS		
Variables		Cantidad (kg/h)
\dot{m}_{biomasa}	Flujo másico de biomasa	10
\dot{m}_{aire}	Flujo másico de aire para gasificar	60,66
Total		70,66

SALIDAS		
Variables		Cantidad (kg/h)
\dot{m}_{gas}	Flujo másico de gas	69,17
$\dot{m}_{\text{alquitrán}}$	Flujo másico del alquitrán	0,16
\dot{m}_{cenizas}	Flujo másico de cenizas	1,33
Total		70,66

Realizado por: Casillas, G.20223

4.2.2. Cálculo del balance de energía para la biomasa de cascarilla de arroz

Del mismo modo que el anterior balance se procede a calcular el balance de energía con la ecuación (10).

$$\dot{m}_{\text{biomasa}} * \text{PCI}_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}} = \dot{m}_{\text{gas}} * \text{PCI}_{\text{gas}} + \dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}} + Q_{\text{cen}} + Q_{\text{perd}}$$

Entradas

$$\begin{aligned} - \dot{m}_{\text{biomasa}} * \text{PCI}_{\text{biomasa}} &= 10 \text{ kg/h} * 24,1 \text{ kJ/kg} \\ &= \mathbf{241 \text{ kJ/h}} \end{aligned}$$

La entalpia se calcula mediante la siguiente expresión, considerando al aire con un comportamiento igual al de un gas ideal:

$$h = C_p * \Delta T \quad (6)$$

El valor del calor especifico se obtiene de la tabla anexo d, los valores fueron interpolados a una temperatura de 22°C

$$\begin{aligned} - h_{\text{aire}} &= C_{p \text{ aire}} * \Delta T \text{ (K)} \\ h_{\text{aire}} &= 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 295,15 \\ \mathbf{h_{\text{aire}} &= 297,21 \text{ kJ/kg}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}} &= 60,66 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 297,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= \mathbf{357,87 \text{ kJ/h}} \end{aligned}$$

Salidas

$$\begin{aligned} - \dot{m}_{\text{gas}} * \text{PCI}_{\text{gas}} &= 0,060 \text{ m}^3/\text{h} * 4390,17 \text{ kJ/m}^3 \\ &= \mathbf{263,41 \text{ kJ/h}} \end{aligned}$$

Para el cálculo de la entalpia de los componentes del gas se toma los valores del anexo e, además se realiza una interpolación considerando la temperatura de la muestra a 18,9°C (292,05 K)

Hidrógeno

$$\begin{aligned} - h_{\text{H}_2} &= C_{p \text{ H}_2} * \Delta T \text{ (K)} \quad (7) \\ h_{\text{H}_2} &= 14,266 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 292,05 \text{ K} \end{aligned}$$

$$h_{H_2} = 4166,38 \text{ kJ/kg}$$

Oxígeno

$$- h_{O_2} = C_{p O_2} * \Delta T \text{ (K)} \quad (8)$$

$$h_{O_2} = 0,917 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 292,05 \text{ K}$$

$$h_{O_2} = 267,80 \text{ kJ/kg}$$

Nitrógeno

$$- h_{N_2} = C_{p N_2} * \Delta T \text{ (K)} \quad (9)$$

$$h_{N_2} = 1,039 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 292,05 \text{ K}$$

$$h_{N_2} = 306,55 \text{ kJ/kg}$$

Monóxido de carbono

$$- h_{CO} = C_{p CO} * \Delta T \text{ (K)} \quad (10)$$

$$h_{CO} = 1,039 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 292,05 \text{ K}$$

$$h_{CO} = 303,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Metano

$$- h_{CH_4} = C_{p CH_4} * \Delta T \text{ (K)} \quad (11)$$

$$h_{CH_4} = 2,253 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 292,05 \text{ K}$$

$$h_{CH_4} = 657,98 \text{ kJ/kg}$$

Dióxido de carbono

$$- h_{CO_2} = C_{p CO_2} * \Delta T \text{ (K)} \quad (12)$$

$$h_{CO_2} = 0,837 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 292,05 \text{ K}$$

$$h_{CO_2} = 244,44 \text{ kJ/kg}$$

Agua

$$- h_{H_2O} = C_{p H_2O} * \Delta T \text{ (K)} \quad (10)$$

$$h_{H_2O} = 1,872 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 292,05 \text{ K}$$

$$h_{H_2O} = 546,71 \text{ kJ/kg}$$

Entalpía del gas

$$h_{\text{gas}} = \sum h_i * (y_i) \quad (11)$$

$$h_{\text{gas}} = 773,23 \text{ kJ/kg}$$

Donde:

h_i = Entalpía de los componentes

y_i = Fracción molar del compuesto

Tabla 4-6: Cálculo de la entalpía del gas de cascarillas de arroz

Componente	y_i (%)	h_i	$h_i * (y_i)$
Hidrogeno	12,22	4166,38	509,13
Oxígeno	2,72	267,80	7,28
Nitrógeno	48,05	306,55	147,29
Monóxido de carbono	25,84	303,43	78,40
Metano	0,17	657,98	1,11
Dióxido de carbono	9,96	244,44	24,34
Agua	1,04	546,71	5,68
Total			773,23

Realizado por: Casillas, G.2023

$$\begin{aligned} - \dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}} &= 69,17 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 773,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= \mathbf{53484,31 \text{ kJ/h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - Q_{\text{cen}} &= \dot{m}_{\text{cenizas}} * C_{p \text{ cenizas}} * (T_{\text{cenizas}} - T_{\text{amb}}) \\ Q_{\text{cen}} &= 1,33 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0,96 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}} * (1023,15 - 295,15) \text{ K} \\ Q_{\text{cen}} &= \mathbf{929,51 \text{ kJ/h}} \end{aligned}$$

- Con la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se determina el valor del calor perdido Q_{perd}

$$241 + 26,63 \times 10^3 = 263,41 + 53484,31 + 929,51 + Q_{\text{perd}}$$

$$26871 = 54677,23 + Q_{\text{perd}}$$

$$Q_{\text{perd}} = 26871 - 54677,23$$

$$Q_{\text{perd}} = \mathbf{- 27806,23}$$

Tabla 4-7: Resultados del balance de energía de la cascarilla de arroz

ENTRADAS	
Variables	Cantidad (KJ/h)

$\dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}}$	241
$\dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}}$	$26,63 \times 10^3$
Total	26 871,00

Realizado por: Casillas, G.2023

SALIDAS	
Variables	Cantidad (KJ/h)
$\dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}}$	263,41
$\dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}}$	53 484,31
$\dot{m}_{\text{cenizas}} * C_{p \text{ cenizas}} (T_{\text{cenizas}} - T_{\text{amb}})$	929,51
Q_{perdido}	- 27 806,23
Total	26 871,10

Realizado por: Casillas, G.2023

Ahora se define el valor del calor perdido de forma natural durante el proceso de gasificación, es decir la transferencia de calor por convección natural desde el reactor hacia el ambiente. Los datos se tomaron durante el proceso experimental. Los valores son tomados de la tabla del anexo d. Ver tabla 4-8.

Tabla 4-8: Guía para determinar el calor perdido por convección natural

Valores	Unidades	Consideraciones
$T_f = 106$	°C	Valor referente para obtener los valores de Pr, v y k
$T_s = 190$	°C	Temperatura superficial
$L_c = 2,7$	m	Longitud del gasificador
$A_s = 6,082$	m ²	Área de transferencia de calor
$Pr = 0,7082$	-	Número de Prandtl (valor interpolado)
$v = 2,370 \times 10^{-5}$	m ² /s	Viscosidad cinética (valor interpolado)
$k = 0,03137$	W/m*K	Conductividad térmica (valor interpolado)
$T_{\text{amb}} = 22$	°C	295,15 K
$\rho = 9.80$	m/s ²	-

Realizado por: Casillas G.,2023

La temperatura fílmica se calcula en base a la temperatura superficial y temperatura ambiente del día de la gasificación

$$T_f = \frac{T_s + T_{\text{amb}}}{2} \quad (12)$$

$$T_f = \frac{190 + 22}{2}$$

$$T_f = 106 \text{ °C}$$

Con la ecuación (13) se determina el valor del Rayleigh, adimensional

$$Ra = \frac{g * \frac{1}{T_f} * (T_s - T_{\text{amb}}) * L_c^3}{v^2} * Pr$$

$$Ra = \frac{9,80 * \frac{1}{106} * (190 - 22) * (2,2)^3}{(2,370 \times 10^{-5})^2} * 0,7082$$

$$\mathbf{Ra = 2,085 \times 10^{11}}$$

Con la ecuación (14) se determina el número de Nusselt, adimensional

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

$$\text{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * (2,08 \times 10^{11})^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,7082} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

$$\text{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{29,788}{1,193} \right\}^2$$

$$\mathbf{Nu = 665,27}$$

En la ecuación (12) de la entalpia reemplazamos la ecuación (16) y (17)

$$h = \frac{\text{Nu} * k}{\text{Lc}}$$

$$h = \frac{665,27 * 0,03137 \text{ W/m} * \text{K}}{2,7 \text{ m}}$$

$$\mathbf{h = 7,729 \text{ W/K}}$$

Finalmente calculamos el valor del calor perdido con la ecuación (11)

$$Q_{\text{perdido}} = h * A_s * (T_s - T_{\text{amb}})$$

$$Q_{\text{perdido}} = 7,729 \frac{\text{W}}{\text{K}} * 6,082 \text{ m}^2 * (190 - 20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{perdido}} = 7,729 \frac{\text{W}}{\text{K}} * 6,082 \text{ m}^2 * (441,15) \text{ K}$$

$$Q_{\text{perdido}} = 1\,244,24 \text{ kJm}^2/\text{h}$$

Con la ecuación (15) encontramos el valor de la eficiencia del gasificador en frio

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}}}{\dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}}}$$

$$\eta_F = \frac{428,13}{75,18 + 355,86}$$

$$\mathbf{\eta_F = 99,32 \%}$$

A continuación, se obtiene el valor de la eficiencia del gasificador en calor, con la ecuación (16)

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{gas} * PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} * h_{gas}}{\dot{m}_{biomasa} * PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} * h_{aire}}$$

$$\eta_c = \frac{428,13 + 101\,997,27}{75,18 + 355,86}$$

$$\eta_c = 23\%$$

4.2.3. Resultado del análisis cromatográfico de la cascarilla de arroz

Los análisis cromatográficos fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de análisis instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, dentro de la norma ASTM 1945. Los documentos originales y validados se encuentran en los anexos. Ver tabla 4-9; 4-10 y 4-11.

Tabla 4-9: Parámetros valorados en el análisis

Condiciones de trabajo	
Parámetros	Valores
Temperatura	17,0 °C
%HR ambiente	45,00%
Temperatura de la muestra	66,0 °F 18,9 °C
Presión de la muestra	0,7 psi 4895,3 Pa
Cromatografía	ASTM 1945
Procedimiento interno	PE-7.2 -0.1 PE - 7.2 - 0.2

Realizado por: Casillas G.,2023

Tabla 4-10: Composición de los análisis - biomasa cascarilla de arroz

COMPOSICIÓN	Componentes	%Moles	Desv.Std
	Hidrógeno	12,22	0,06
	Oxígeno	2,72	0,07
	Nitrógeno	48,05	0,84
	Monóxido de carbono	25,84	0,44
	Metano	0,17	0,00
	Dióxido de carbono	9,96	0,2
	Agua	1,04	0,08

Realizado por: Casillas G.,2023

Tabla 4-11: Propiedades de los análisis - biomasa cascarilla de arroz

PROPIEDADES	Componentes	Valores	Unidades
	Densidad relativa	0,92	-
	Peso molecular promedio	26,5	(g/mol)
	Densidad de la muestra	1,12	(g/L)
	Poder calorífico superior	4644,99	(kJ/m3)
	Poder calorífico inferior	4390,17	(kJ/m3)
	Factor de compresibilidad	1	(z)

Realizado por: Casillas G.,2023

4.3. Valoración energética de los biomas de residuos madereros (Viruta de eucalipto)

Una vez encendido el gasificador se tomó la temperatura cada 10 minutos durante una hora, después de transcurrido este tiempo se registra los datos cada 15 minutos, hasta aproximadamente 3 horas. Ver tabla 4-12.

Tabla 4-12: Datos de gasificación de la viruta de eucalipto

Temperatura	Tiempo	Termo 4 (°C) PT100	Termo 5 (°C) PT100	Termo 6 (°C)	Termo 7 (°C)	Termo 8 (°C)
t_0	t_0	18,80	19,50	21	24	26
t_1	10	18,20	17,50	59	53	83
t_2	20	18,40	17,60	83	60	442
t_3	30	18,60	17,80	92	74	495
t_4	40	19,00	17,80	105	77	544
t_5	50	19,4	17,80	264	126	598
t_6	60	20,00	18,20	233	155	413
t_7	70	21,20	18,60	212	162	587
t_8	85	22,00	19,60	198	168	750
t_9	100	23,60	20,30	286	205	861
t_{10}	115	25,3	21,20	260	245	827
t_{11}	130	27,00	20,80	267	257	890
t_{12}	145	28,50	20,40	323	275	761
t_{13}	160	29,10	21,60	370	300	650

Realizado por: Casillas G.,2023

La segunda gasificación se llevó a cabo con residuos madereros en este caso con viruta de eucalipto. Al igual que en la primera gasificación aquí se debe seguir la misma secuencia para determinar los parámetros importantes del proceso. Primero se determina el valor de la masa de aire estequiométrico con la ecuación (1), los valores de la composición química de la biomasa son porcentuales los mismos que primero deberán ser convertidos en fracciones gravimétricas con la ecuación (2), los valores se toman de la Tabla 3-5-3.

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

$$G_{xC} = \frac{45,82}{100} = 0,4582 \text{ kg}$$

$$G_{xH} = \frac{5,71}{100} = 0,0571 \text{ kg}$$

$$G_{xO} = \frac{48,07}{100} = 0,4807 \text{ kg}$$

$$G_{xN} = \frac{0,40}{100} = 0,0040 \text{ kg}$$

Los valores de las fracciones gravimétricas son remplazados en la ecuación (1)

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

$$m_{at} = (0,1153 * 0,4582) + 0,3434 * \left(0,0571 - \frac{0,4807}{8} \right) + (0,0434 * 0)$$

$$m_{at} = 0,051 \text{ kg/kg}$$

Ahora se determina la masa de aire real requerido para una combustión completa, con el coeficiente de aire en exceso (*EA*) de 1,5 para combustibles sólidos, el valor se encuentra en la Tabla 3-6 y con la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se obtiene lo siguiente:

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

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

$$m_{ar} = 1,5 * 0,051$$

$$m_{ar} = 0,076 \text{ kg/kg}$$

Después de obtener los valores del aire actual y el aire estequiométrico, se relaciona con la ecuación (6) para identificar la eficiencia del gas

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

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = \frac{0,076}{0,051} = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

$$ER(< 1,0)_{\text{gasificación}} = 1,490 = EA(> 1,0)_{\text{combustión}}$$

En este caso se necesita identificar la cantidad de aire que se requiere para llevar a cabo el proceso de gasificación de la viruta de eucalipto, para un mejor rendimiento se recomienda la aplicación de valores de 0,2 a 0,25, como referencia del ER se toma el valor de 0,2. Ecuación (7)

$$m_{ag} = m_{at} * ER$$

$$m_{ag} = 0,051 * 0,20$$

$$m_{ag} = 0,010 \text{ kg/kg}$$

4.3.1. Cálculo del balance de masa para la biomasa de viruta de eucalipto

Con los datos obtenidos durante el proceso de gasificación se realizan los cálculos para la elaboración del balance de masa. Ver tabla 4-13.

Tabla 4-13: Guía durante la gasificación de la biomasa de viruta

Descripción	Viruta de eucalipto
kg de biomasa utilizado	30 kg
Tamaño de partícula	1-10 mm
Tiempo de inicio de gasificación (tiempo de llama)	30 min
Tiempo de gasificación	20 min
Tiempo total del proceso de gasificación	3 h
Cenizas	3 kg
Alquitrán	250 ml
Temperatura ambiente	20°C
Humedad relativa	36,5%

Realizado por: Casillas G.,2023

Los valores identificados serán remplazados en la ecuación (9)

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

Entradas

$\dot{m}_{biomasa}$ = Flujo másico de biomasa (viruta de eucalipto)

$$\dot{m}_{biomasa} = \frac{30 \text{ kg}}{3 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{biomasa} = \mathbf{10 \text{ kg/h}}$$

\dot{m}_{aire} = Flujo másico de aire para gasificar (entrada)

$$\dot{m}_{aire} = \mathbf{60,66 \text{ kg/h}}$$

Salidas

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

$$\dot{m}_{alquitrán} = \frac{0,25 \text{ kg}}{3 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_{alquitrán} = \mathbf{0,083 \text{ kg/h}}$$

\dot{m}_{cenizas} = Flujo másico de cenizas

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

$$\dot{m}_{\text{cenizas}} = 1 \text{ kg/h}$$

\dot{m}_{gas} = Flujo masico de gas

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

$$\dot{m}_{\text{gas}} = (10 + 60,66 - 0,083 - 1) \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = 69,57 \text{ kg/h}$$

Para un mejor entendimiento se resumen los valores del balance de masa en la siguiente tabla.
Ver tabla 4-14.

Tabla 4-14: Resultados del balance de masa de la biomasa de viruta

ENTRADAS		
Variables		Cantidad (kg/h)
\dot{m}_{biomasa}	Flujo másico de biomasa	10
\dot{m}_{aire}	Flujo másico de aire para gasificar	60,66
Total		70,66

Realizado por: Casillas G.,2023

SALIDAS		
Variables		Cantidad (kg/h)
\dot{m}_{gas}	Flujo másico de gas	69,57
$\dot{m}_{\text{alquitrán}}$	Flujo másico del alquitrán	0,083
\dot{m}_{cenizas}	Flujo másico de cenizas	1
Total		70,65

Realizado por: Casillas G.,2023

4.3.2. Cálculo del balance de energía para la biomasa de viruta de eucalipto

Con la ecuación (10) se procede a calcular el balance de energía

$$\dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}} = \dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}} + \dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}} + Q_{\text{cen}} + Q_{\text{perd}}$$

Entradas

$$\begin{aligned} - \dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} &= 10 \text{ kg/h} * 7,518 \text{ kJ/kg} \\ &= 75,18 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

Con la ecuación (6) se calcula la entalpia

$$h = C_p * \Delta T$$

El valor del calor específico se obtiene de la tabla del anexo d, los valores fueron interpolados a una temperatura de 20°C (293,15)K

$$- h_{\text{aire}} = C_{p \text{ aire}} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{aire}} = 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (293,15)$$

$$\mathbf{h_{\text{aire}} = 295,20 \text{ kJ/kg}}$$

$$- \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}} = 60,66 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 295,20 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$= \mathbf{355,86 \text{ kJ/h}}$$

Salidas

$$- \dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}} = 0,065 \text{ m}^3/\text{h} * 6586,71 \text{ kJ/m}^3$$
$$= \mathbf{428,13 \text{ kJ/h}}$$

Para el cálculo de la entalpía de los componentes del gas se toma los valores del anexo e, además se interpola a una temperatura de 18.06°C (291,21 K), que es la temperatura de la muestra obtenida del análisis cromatográfico de la viruta, anexo b

Hidrógeno; ecuación (7)

$$- h_{\text{h}_2} = C_{p \text{ h}_2} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{h}_2} = 14,271 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{h}_2} = 4155,00 \text{ kJ/kg}}$$

Oxígeno; ecuación (8)

$$- h_{\text{O}_2} = C_{p \text{ O}_2} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{O}_2} = 0,917 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{O}_2} = 266,98 \text{ kJ/kg}}$$

Nitrógeno; ecuación (9)

$$- h_{\text{N}_2} = C_{p \text{ N}_2} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{N}_2} = 1,039 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{N}_2} = 302,50 \text{ kJ/kg}}$$

Monóxido de carbono; ecuación (10)

$$- h_{\text{CO}} = C_{p \text{ CO}} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{CO}} = 1,039 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{CO}} = 302,50 \text{ kJ/kg}}$$

Metano; ecuación (11)

$$- h_{\text{CH}_4} = C_{p \text{ CH}_4} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{CH}_4} = 2,253 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{CH}_4} = 655,96 \text{ kJ/kg}}$$

Dióxido de carbono; ecuación (12)

$$- h_{\text{CO}_2} = C_{p \text{ CO}_2} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{CO}_2} = 0,838 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{CO}_2} = 243,98 \text{ kJ/kg}}$$

Agua; ecuación (10)

$$- h_{\text{H}_2\text{O}} = C_{p \text{ H}_2\text{O}} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{H}_2\text{O}} = 1,872 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{H}_2\text{O}} = 545,03 \text{ kJ/kg}}$$

Etano

$$- h_{\text{N}_2} = C_{p \text{ N}_2} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{N}_2} = 1,766 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{N}_2} = 514,17 \text{ kJ/kg}}$$

Propano

$$- h_{\text{N}_2} = C_{p \text{ N}_2} * \Delta T \text{ (K)}$$

$$h_{\text{N}_2} = 1,679 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 291,21 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{\text{N}_2} = 488,84 \text{ kJ/kg}}$$

Entalpía del gas; ecuación (11)

$$h_{\text{gas}} = \sum h_i * (y_i)$$

$$h_{\text{gas}} = 2\,269,06 \text{ kJ/kg}$$

Donde:

h_i = Entalpia de los componentes

y_i = Fracción molar del compuesto

Tabla 4-15: Cálculo de la entalpía del gas de viruta

Componente	y_i (%)	h_i	$h_i * (y_i)$
Hidrogeno	29,50	4155,00	1 225,72
Oxígeno	2,57	266,98	7,34
Nitrógeno	25,17	302,50	76,13
Monóxido de carbono	29,25	302,50	88,48
Metano	2,70	655,96	816,75
Dióxido de carbono	19,56	243,98	47,71
Agua	0,95	545,03	5,17
Etano	0,27	514,17	1,38
Propano	0,03	488,84	0,14
Total			2 268,82

Realizado por: Casillas G.,2023

$$\begin{aligned} - \dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}} &= 69,57 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 2\,268,82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= \mathbf{157\,841,80 \text{ kJ/h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - Q_{\text{cen}} &= \dot{m}_{\text{cenizas}} * C_{p \text{ cenizas}} * (T_{\text{cenizas}} - T_{\text{amb}}) \\ Q_{\text{cen}} &= 1 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0,96 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}} * (973,15 - 293,15) \text{ K} \\ Q_{\text{cen}} &= \mathbf{652,80 \text{ kJ/h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \text{Con la ecuación (10) se determina el valor del calor perdido } Q_{\text{perd}} \\ 75,18 + 355,86 &= 428,13 + 157\,841,80 + 652,80 + Q_{\text{perd}} \\ 431,04 &= 158\,922,73 + Q_{\text{perd}} \\ Q_{\text{perd}} &= \mathbf{- 158\,491,69} \end{aligned}$$

Tabla 4-16: Resultados del balance de energía

ENTRADAS	
Variables	Cantidad (KJ/h)
$\dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}}$	75,18
$\dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}}$	355,86
Total	431,04
SALIDAS	
Variables	Cantidad (KJ/h)
$\dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}}$	428,13
$\dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}}$	157 841,80
$\dot{m}_{\text{cenizas}} * CP_{\text{cenizas}} (T_{\text{cenizas}} - T_{\text{amb}})$	652,80

Q _{perdido}	-158 491,69
Total	431,04

Realizado por: Casillas G.,2023

Se define el calor perdido por convección natural durante el proceso de gasificación de la viruta, se toma en cuenta los parámetros de la Tabla 4-17: Guía para determinar el calor perdido por convección natural los valores se encuentran en el anexo d. Ver tabla 4-17.

Tabla 4-17: Guía para determinar el calor perdido por convección natural.

Valores	Unidades	Consideraciones
$T_f = 106$	°C	Valor referente para obtener los valores de Pr, v y k
$T_s = 190$	°C	Temperatura superficial
$L_c = 2,7$	M	Longitud del gasificador
$A_s = 6,082$	m ²	Área de transferencia de calor
$Pr = 0,7082$	-	Número de Prandtl (valor interpolado)
$\nu = 2,370 \times 10^{-5}$	m ² /s	Viscosidad cinética (valor interpolado)
$k = 0,03137$	W/m*K	Conductividad térmica (valor interpolado)
$T_{amb} = 20$	°C	295,15 K
$\rho = 9.80$	m/s ²	-

Realizado por: Casillas G.,2023

La temperatura fílmica se calcula en base a la temperatura superficial y temperatura ambiente del día de la gasificación, ecuación (12)

$$T_f = \frac{T_s + T_{amb}}{2}$$

$$T_f = \frac{190 + 20}{2}$$

$$T_f = 105 \text{ °C}$$

Con la ecuación (13) se determina el valor del Rayleigh, adimensional

$$gRa = \frac{g * \frac{1}{T_f} * (T_s - T_{amb}) * L_c^3}{\nu^2} * Pr$$

$$Ra = \frac{9,80 * \frac{1}{105} * (190 - 20) * (2,2)^3}{(2,370 \times 10^{-5})^2} * 0,7082$$

$$Ra = 1,492 \times 10^{11}$$

Con la ecuación (14) se determina el número de Nusselt, adimensional

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * (1,49 \times 10^{11})^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,7082} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{28,177}{1,193} \right\}^2$$

$$\mathbf{Nu = 597.48}$$

En la ecuación (12) de la entalpia reemplazamos la ecuación (16) y (17)

$$h = \frac{Nu * k}{Lc}$$

$$h = \frac{597,48 * 0,03137 \text{ W/m} * K}{2,7 \text{ m}}$$

$$\mathbf{h = 6,94 \text{ W/K}}$$

Finalmente calculamos el valor del calor perdido con la ecuación (11)

$$Q_{\text{perdido}} = h * A_s * (T_s - T_{\text{amb}})$$

$$Q_{\text{perdido}} = 7,729 \frac{\text{W}}{\text{K}} * 6,082 \text{ m}^2 * (190 - 20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{perdido}} = 7,729 \frac{\text{W}}{\text{K}} * 6,082 \text{ m}^2 * (443,15) \text{ K}$$

$$\mathbf{Q_{\text{perdido}} = 1\ 249,88 \text{ KJ} \cdot \text{m}^2/\text{h}}$$

Con la ecuación (15) encontramos el valor de la eficiencia del gasificador en frio

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}}}{\dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}}}$$

$$\eta_F = \frac{428,13}{75,18 + 355,86}$$

$$\eta_F = 99,32\%$$

A continuación, se obtiene el valor de la eficiencia del gasificador en calor, con la ecuación (16)

$$\eta_C = \frac{\dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}} + \dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}}}{\dot{m}_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}}}$$

$$\eta_C = \frac{428,13 + 157\ 841,80}{75,18 + 355,86}$$

$$\eta_C = 36 \%$$

4.3.3. Análisis cromatográfico del gas de viruta de eucalipto

Los análisis cromatográficos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio de análisis instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, dentro de la norma ASTM 1945. Los documentos originales y validados se encuentran en los anexos. Ver tabla 4-18; 4-19 y 4-20.

Tabla 4-18: Parámetros valorados en el análisis del gas de viruta de eucalipto

Condiciones de trabajo	
Parámetros	Valores
Temperatura	18°C
%HR	45%
Temperatura de la muestra	65,5 °F
Presión de la muestra	0,7 psi
Cromatografía	ASTM 1945
Procedimiento interno	PE-7.2 -0.1 PE - 7.2 - 0.2

Realizado por: Casillas, G.2023

Tabla 4-19: Composición de los análisis del gas de viruta de eucalipto

COMPOSICIÓN	Componentes	%Moles	Desv.Std
	Hidrógeno	29,50	0,147
	Oxígeno	2,57	0,082
	Nitrógeno	25,17	0,189
	Monóxido de carbono	29,25	0,055
	Metano	2,70	0,023
	Dióxido de carbono	19,56	0,331
	Etano	0,27	0,020
	Agua	0,95	0,216
	Propano	0,95	0,003

Realizado por: Casillas, G.2023

Tabla 4-20: Propiedades de los análisis del gas de viruta de eucalipto

PROPIEDADES	Componentes	Valores	Unidades
	Densidad relativa	0,90	-
	Peso molecular promedio	25,86	(g/mol)
	Densidad de la muestra	1,09	(g/L)
	Poder calorífico superior	7088,65	(kJ/m3)
	Poder calorífico inferior	6586,71	(kJ/m3)
	Factor de compresibilidad	1	(z)

Realizado por: Casillas, G.2022

Todos los resultados de esta sección serán analizados por comparación en el apartado de discusión de resultados

4.4. Discusión de resultados

El capítulo cuatro tiene como objetivo plasmar los resultados que se obtuvieron durante la investigación, es importante mencionar que el producto gaseoso de la gasificación de biomasa depende de varios factores como el agente gasificante, la temperatura, el diseño del gasificador, las propiedades químicas y físicas de la biomasa, etc. Para obtener un gas de calidad el principal factor es el agente gasificante con el cual se realiza el proceso, en este caso fue el aire. Ver tabla 4-21.

Tabla 4-21: Resultados obtenidos de la gasificación

Parámetros	Cascarilla de arroz	Viruta de eucalipto	Unidades
m_{at}	0,035	0,051	kg/kg
m_{ar}	0,052	0,076	kg/kg
m_{ag}	0,007	0,010	kg/kg
λ (coeficiente de aire en exceso)	1,48	1,49	kg/kg

Realizado por: Casillas, G.2022

En la gráfica se establece los valores de la Tabla 4-21: Resultados obtenidos de la gasificación que indica los resultados del proceso de gasificación, se observa que los valores son similares entre sí, además, la gasificación de las biomásas presento un coeficiente de aire en exceso mayor a 1 es decir que se obtuvo una mezcla de gas pobre con bajo poder calorífico, en otras palabras, la presencia del bajo poder calorífico se refiere a la baja densidad energética que tiene el gas, este fenómeno obliga a utilizar el gas directamente en unidades de combustión para obtener electricidad y vapor, debido a la presencia de nitrógeno que impide su transformación en productos nobles como el gas de síntesis, no se recomienda su almacenamiento o transporte.

Es importante recalcar que el agente gasificante del proceso fue el aire, asumiendo que en el proceso se inyectó vapor de agua como agente gasificante tendría una mayor cantidad de hidrogeno y el aumento del poder calorífico además de la posibilidad de transformarlo en combustible líquido (metanol, gasolinas) y aplicarlo como materia prima, cuya demanda actual es superior a la de los combustibles gaseosos. Ver ilustración 4-1; tabla 4-22; ilustración 4-2 y tabla 4-23.

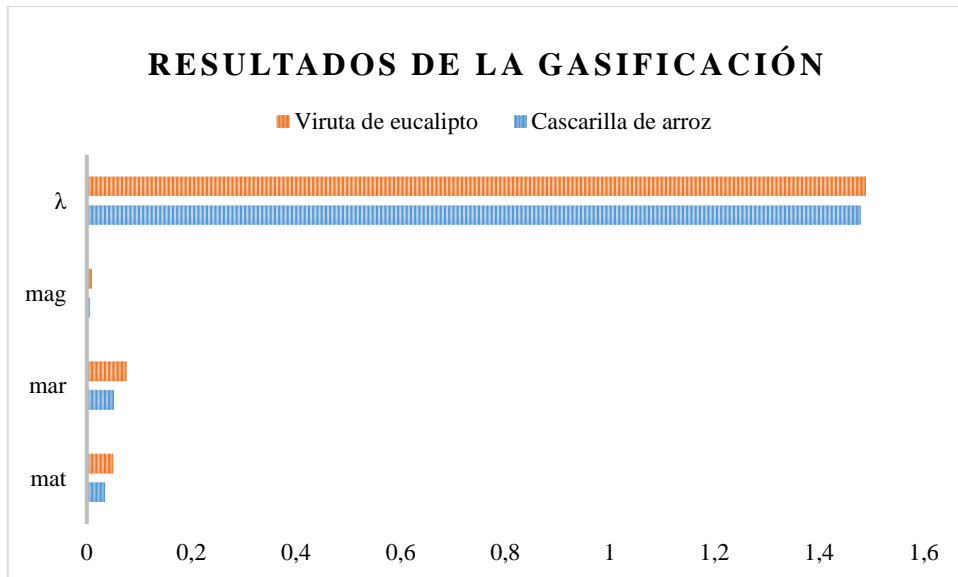


Ilustración 4-1: Resultados de la gasificación

Realizado por: Casillas, G.2022

Tabla 4-22: Resultados del balance de masa

Balance de masa			
	Cascarilla de arroz	Viruta de eucalipto	Unidades
Entradas	70,66	70,66	kg/h
Salidas	70,66	70,65	kg/h

Realizado por: Casillas, G.2022

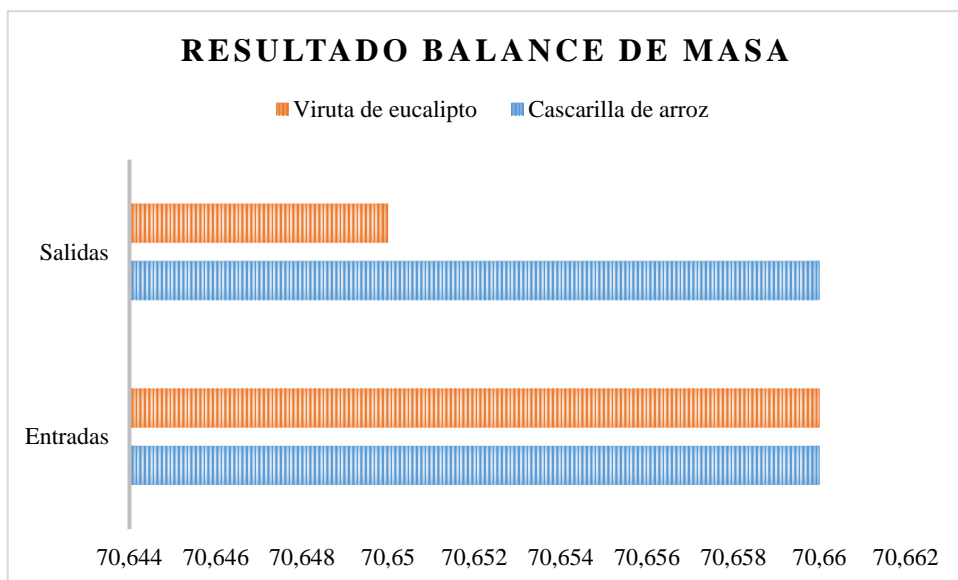


Ilustración 4-2: Resultado balance de masa

Realizado por: Casillas, G.2022

Tabla 4-23: Resultados del balance de energía

Balance de energía			
	Cascarilla de arroz	Viruta de eucalipto	Unidades
Entradas	26 871,00	431,04	kJ/h
Salidas	26 872,10	431,04	kJ/h
Q _{perdido}	-27 806,23	-158 491,69	kJ/h
Q _{perdido por convección}	1 244,24	1 249,88	kJ.m ² /h

Realizado por: Casillas G.,2022

4.4.1. Análisis de la composición elemental de la biomasa

La materia prima empleada en el proceso de gasificación debe cumplir con algunos requisitos relacionados con el contenido de humedad y el tamaño de las partículas, estas características pueden afectar el desempeño del proceso de gasificación con respecto a la conversión del producto gaseoso y la eficiencia de la producción del gas. El contenido de humedad inferior al 10%, así como el tamaño de partícula inferior a 38,10 mm y superior a 25,40 mm, son características comunes de la materia prima, incluso si la materia prima se encuentra procesada; con toda esta información preliminar se puede realizar el cálculo de HHV y determinar si se encuentra en las condiciones óptimas para gasificar.

4.4.2. Análisis de la cromatografía de gases

4.4.2.1. Composición elemental del gas de síntesis

La gasificación de biomasa es un proceso de conversión termoquímica que convierte la biomasa en gas combustible de energía con la ayuda de agentes gasificantes como el aire, vapor de agua, O_2 y CO_2 . Cambia un combustible sólido en gas de síntesis, compuesto principalmente por hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO) con cantidades menores de dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O), metano (CH_4), hidrocarburos superiores y compuestos contaminados no deseados como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y cloruro (HCL). El gas de síntesis es un intermediario importante en la elaboración de productos químicos como son el amoníaco, metanol, H_2 y biocombustibles; es por eso, que es importante lograr el mayor rendimiento de gas posible durante el proceso de gasificación. (Giglio *et al.* 2021, p. 9) El análisis del gas de síntesis que se realizó mediante un análisis cromatográfico ha permitido determinar las diferentes especies moleculares presentes en la mezcla gaseosa obtenida mediante la gasificación de la cascarilla de arroz y forestales (viruta de eucalipto). En la tabla 4-24 se identifica la diferencia de valores de los componentes entre la cascarilla de arroz y la viruta en porcentaje de moles. Ver tabla 4-24.

Tabla 4-24: Diferencias de la composición elemental del gas

Componentes	Cascarilla de arroz (%moles)	Viruta (%moles)
Hidrógeno (H_2)	12,22	29,50
Oxígeno (O)	2,72	2,57
Nitrógeno (N)	48,05	25,17
Monóxido de carbono (CO)	25,84	29,25
Metano (CH_4)	0,17	2,70
Dióxido de carbono (CO_2)	9,96	19,56
Agua (H_2O)	1,04	0,95
Etano (C_2H_6)	-	0,27
Propano (C_3H_8)	-	0,03

Realizado por: Casillas G.,2023

La concentración de cada componente de la mezcla de gases depende principalmente de las condiciones de trabajo, las condiciones locales, la composición química de la biomasa y la estructura de los gasificadores, también depende de algunas condiciones termodinámicas tales como la temperatura, caudal y el flujo masico de entrada y salida,

En cuanto a la primera gasificación que se combustionó la biomasa de cascarilla de arroz se puede observar en la ilustración que el porcentaje de N y CO han sido los componentes principales de este gas de síntesis, los gases intermedios son CO_2 y H_2 , finalmente seguidos por H_2O y O , es importante recalcar que en el gas no existe presencia de hidrocarburos alifáticos como C_2H_6 y C_3H_8 . Ver ilustración 4-3.

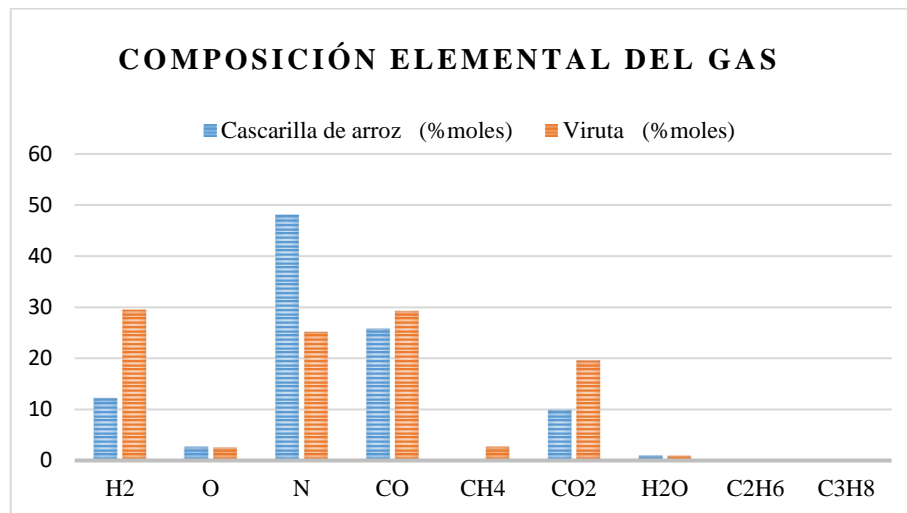


Ilustración 4-3: Composición del gas de síntesis

Realizado por: Casillas, G.2023

Según (Li *et al.* 2021, p. 5), indica que el aumento de temperatura facilita la producción de H_2 y CO , esto se puede atribuir a un aumento de temperatura favorable en la zona de reacción que genera la reacción de Bourdouard y la reacción de cambio de agua a gas. En la tabla 4-24 indica que la temperatura de gasificación de la cascarilla de arroz en los intervalos de tiempo t_9 y t_{11} que es

momento aproximado para la toma de muestra presenta temperaturas de 584°C a 898°C y como se observa en la ilustración 4-3 la cantidad de porcentaje con respecto a H_2 es bajo en comparación a la cantidad de porcentaje de la viruta. Por otro lado, el mismo fenómeno se observó en el estudio de (Kaushal, *et al.* 2011, p. 5), en el que los contenidos de H_2 y CO aumentaron del 13 a 31% y 2 a 18% a medida que aumentaba la temperatura respectivamente y se mantenía constante en un lapso de tiempo, se observa en la tabla.

De la gasificación de la viruta que en los mismos intervalos de tiempo t_9 y t_{11} se mantenía una temperatura constante de 800°C es por eso que en la ilustración es notable el aumento del porcentaje del contenido de H_2 . En lo que respecta al porcentaje de CO contenido en el gas presenta valores similares en las dos gasificaciones. Además, el alquitrán y los hidrocarburos de alto peso molecular se craquean a altas temperatura para producir H_2 . Nuevamente, (Shahbaz *et al.* 2016, p. 410) indica que el alto contenido de H_2 y CO en el gas también se puede convertir en metano mediante una reacción de metanización y el menor rendimiento del mismo se debe al cambio de reacción de gas a agua. La producción de CH_4 en la gasificación de cascarilla de arroz presenta un bajo contenido de 0,17%, de la composición del gas, según (Giglio *et al.* 2021, p. 7), informa que la minimización de la energía de Gibbs en base del enfoque de equilibrio conduce a un contenido de metano muy bajo porque, a alta temperatura, el grado de reformado de los hidrocarburos se desplaza termodinámicamente hacia la producción de hidrógeno; para el incremento del mismo va depender mucho de las características de composición de la biomasa y el flujo masico de biomasa que ingresa. En cuanto, a la gasificación de la viruta presenta un contenido mayor de CH_4 en 2,70%, y 29,50% en producción de H_2 , debido a que presenta diferentes características en composición de biomasa y en altas temperaturas si genera en cierta parte producción de metano.

4.4.2.2. Poder calorífico inferior y superior del gas de síntesis

En la siguiente tabla se pueda observar los valores de HLV y LHV de la composición del gas tanto para la cascarilla de arroz como para la viruta. (Li *et al.* 2021, p. 6), indica que la proporción de LHV se encuentra relacionado con la cantidad de CO y H_2 contenido en el gas de síntesis, además, la disminución de LVH se atribuyó a los bajos contenidos de H_2 y CO a temperatura inferiores de 750°C. Ver tabla 4-25 y ilustración 4-4.

Tabla 4-25: HLV - LHV de la biomasa

Componentes	Cascarilla de arroz (kJ/m3)	Viruta (kJ/m3)
Poder calorífico superior (HLV)	4644,99	7088,65
Poder calorífico inferior (LHV)	4390,17	6586,71

Realizado por: Casillas G.,2023

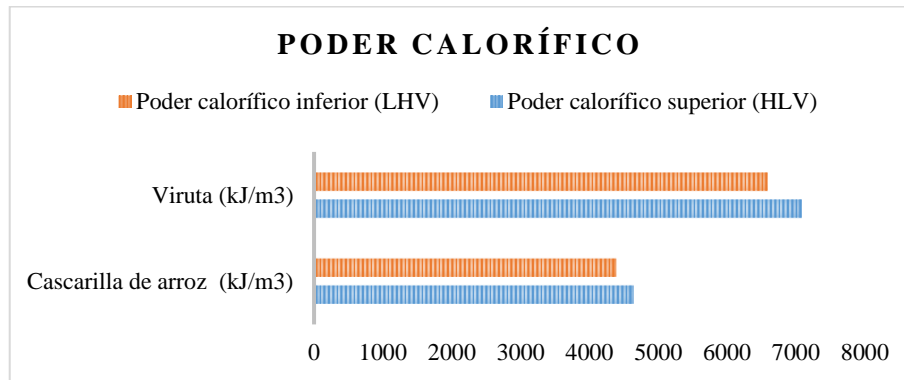


Ilustración 4-4: Resultado de poder calorífico

Realizado por: Casillas, G.2023

La composición elemental de la biomasa es directamente proporcional a los resultados de LHV, (Kartal y *et al.* 2020, p. 4) se refiere a que al evaluar los factores que influyen en el resultado del LHV a menudo se consideran los contenidos de C, H y O de la biomasa que se utiliza en el proceso de gasificación, por lo tanto, se realiza un análisis de correlación parcial para investigar la relación que existe entre el LHV y los contenidos de C, H y O. El LHV se encuentra relacionado de forma positiva con el contenido de H pero de forma negativa correlacionado con los contenido de O. En este contexto se observa en la tabla 8-4 que el porcentaje de la biomasa de cascarilla de arroz es de 35,05% y 5,38% de C e H respectivamente, por otro lado, los porcentajes de la biomasa de viruta son 49,01% C y 6,02% H, en consecuencia, el valor del LHV en la cascarilla de arroz es menor con respecto al valor del HLV debido a las condiciones mencionada en este párrafo.

CONCLUSIONES

Se obtuvo la valoración energética de la cascarilla de arroz y residuos forestales en un gasificador tipo Downdraft, para realizar el proceso de gasificación se tomó en cuenta varios aspectos como las condiciones de operación, las condiciones ambientales, la composición química de la biomasa, la estructura y diseño del gasificador, además, debe de cumplir con las condiciones termodinámicas adecuadas para que el proceso. El proceso de gasificación se desempeñó en las siguientes condiciones, temperatura de activación 500°C , presión de atmosférica de 72928 Pa , densidad del aire $0,86\text{ kg/m}^3$ y agente gasificante el aire. En este caso se obtuvo una mezcla de gas pobre debido a que el agente gasificante fue el aire.

La caracterización del gas se realizó en los laboratorios de la EPN, en donde se identificó que el gas de síntesis se encuentra compuesto principalmente por hidrógeno (H_2) y metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2), con cantidades menores de dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Además, en la gasificación de los residuos forestales hubo presencia de hidrocarburos alifáticos como etano C_2H_6 con 0,27 y propano C_3H_8 con 0,03; en la gasificación de la cascarilla de arroz estos valores fueron nulos. Los analitos de interés son el metano y el hidrogeno en este caso se obtuve valores de 0,17 y 12,22 respectivamente para la cascarilla de arroz, y valores de 2,70 y 29,50 para la viruta. La cantidad de energía producida en el gas, es decir quien presentó mayor cantidad de energía en su composición fue la viruta con $6586,7\text{ kJ/m}^3$ a relación de la cascarilla de arroz que obtuvo un valor menor a $4390,17\text{ kJ/m}^3$.

Se planteó un análisis estadístico al azar en el cual se estudió las variables de la biomasa de cascarilla de arroz y la viruta que mediante comparación se obtuvo como resultado que la biomasa que presentó mayor eficiencia energética es la viruta, en el análisis elemental de la biomasa identificó valores más cercanos para llevar a cabo una combustión completa, en este caso el porcentaje de carbono fue de 45,82% con respecto a la de cascarilla de arroz que obtuvo un valor de 37,26% y otro parámetro importante que influye en la cantidad de energía que presenta la biomasa es la humedad con un valor de 9,06% para la cascarilla de arroz y un valor mínimo de 4,60 para la viruta. El contenido de humedad debe cumplir con un valor inferior al 10%, así como el tamaño de partícula inferior a 38,10 mm y superior a 25,40 mm, son características comunes de la materia prima.

Se determinó que la biomasa con mayor rendimiento de energía aprovechable es la viruta, en su composición de gas presentó valores de hidrogeno de 29,50 % moles y de metano de 19,56 % moles; con los análisis de la composición de los gases y la composición elemental de la biomasa se determina que se obtuvo gas pobre debido a que el agente gasificante fue el aire. En este caso

se obtuvo un gas con baja eficiencia energética, pero al final es útil para el sector industrial porque se utiliza en hornos y motores de combustión.

Se caracterizó el gas de síntesis de la biomasa producida en el gasificador, los análisis cromatográficos del gas fueron analizados en los laboratorios de EPN dentro de la norma ASTM 1945. Se identificó que el gas de síntesis se encuentra compuesto principalmente por hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2), con cantidades menores de dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y metano (CH_4). Además, en la gasificación de los residuos forestales hubo presencia de hidrocarburos alifáticos como C_2H_6 y C_3H_8 que se forman a partir de la presencia de metano.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que, para una mejor eficiencia del gas, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos, empezando por el diseño del gasificador que presenta varias fugas de aire en las compuertas, equilibrar la ubicación adecuada de la tapa de la tolva y el flujo de salida de biomasa debe tener mayor dimensión para que la biomasa se despliegue uniformemente dentro del reactor. Tomar en cuenta las condiciones para gasificar, la temperatura de activación y la temperatura de la toma de muestra, en cuanto a la biomasa debe cumplir con los estándares establecidos principalmente de tener baja humedad, y las dimensiones adecuadas para que sea combustionada en su totalidad.

Se recomienda que la materia prima de arranque sea el carbón, debido a que genera una baja producción de alquitrán, de esta forma se evita una mayor cantidad de hidrocarburos tanto líquidos como pesado, además, favorece a que las instalaciones del gasificador no se dañen y que la limpieza del gasificador sea mucho más fácil.

Se recomienda que la biomasa se encuentre seca en su totalidad, para evitar que el gas pierda poder calorífico durante el proceso de gasificación, además la toma de muestra del gas que sea 10 minutos después que exista presencia del mismo, de esta forma se garantiza que se gasifique la biomasa y no la materia prima de arranque.

BIBLIOGRAFÍA

ARCONEL, B. Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Quito: La Agencia de Regulación y Control de Electricidad Retrieved from. [Consulta: 6 julio 2022]. Disponible en: [http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Estad% C3% ADstica-anualy-multianual-sectorel% C3% A9ctrico-2016.pdf](http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Estad%20C3%ADstica-anualy-multianual-sectorel%20C3%A9ctrico-2016.pdf), 2016.

AUGUSTO ESTRADA Carlos. “Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor” . S.l.: *Scientia Et Technica* [En línea] 2004 (Colombia) 2 (5) pp. 155. [Consulta: 6 julio 2022]. ISSN 0122-1701 Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/index>

AYALA ELIZABETH et al. “Revisión del cálculo de poder calorífico y punto de rocío del gas natural, y de la estimación de sus incertidumbres”. *Grupo de Investigación en Fluidos y Energía GIFE*. [En línea] 2016 (Colombia) 1 (2) pp. 5. [Consulta: 6 julio 2022]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5986/6263>

BARRAGAN ANTONIO et al. “Barriers to renewable energy expansion: Ecuador as a case study”. *Energy strategy reviews*. [En línea] 2022 (Ecuador) 43 (2) pp. 2-4. [Consulta: 9 julio 2022]. ISSN: 100-903. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22000979>

BASALO ALFREDO. *Cálculo de poder calorífico. Sustancias químicas puras.* (2006) [En línea] [Consulta: 9 julio 2022]. Disponible en: https://www.redproteger.com.ar/editorialredproteger/seriematafuego/29_Calculo_Poder_Calorifico_mar2006.pdf

BASU PRABIR. *Biomass gasification and pyrolysis*. [En línea] [Consulta: 9 julio 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123749888/biomass-gasification-and-pyrolysis#book-description>

BISWAS BIJOY. “Biomass characterization”. *Advanced biofuel* [En línea] 2022 (India) 1 (2) pp. 151-175. [Consulta: 11 julio 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323884273000143>

BRYNDA Jiří et al. “Wood chips gasification in a fixed-bed multi-stage gasifier for decentralized high-efficiency CHP and biochar production: Long-term commercial operation”. *Fuel*. [En línea] 2016 (Colombia) 281 (2) pp. 118637. [Consulta: 11 julio 2022]. ISSN 00162361 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120316331>

CABALLERO-CHAVARRÍA, Andrey, et al. Simulación de gasificación de biomasa enriquecida con hidrocarburos. *Revista Tecnología en Marcha*, 2019, vol. 32, no 4, p. 60-68. [Consulta: 13 julio 2022]. ISSN: 0379-3982. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822019000400060&script=sci_arttext

CASTELLO BELMAR Angelo Michele. Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Chile .2014 . pp. 18 [Consulta: 13 julio 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132303/disenode-un-reactor-continuo-de-gasificacion-de-biomasa.pdf?sequence=1>

CASTRO MARTÍNEZ Sergio Omar. Instalación y arranque de un prototipo de gasificación [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México. 2015. pp. 21 [Consulta: 15 julio 2022]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7290/Instalacion%20y%20arranque%20de%20un%20prototipo%20de%20gasificacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

DOLF Gielen. “ The role of renewable energy in the global energy transformation” *Energy Strategy* [En línea] 2019 (Germany) 24 (5) pp. 38-50. [Consulta: 15 julio 2022]. ISSN 2211467 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300082>

EHSAN HOSSEINI Seyed “ Utilization of palm solid residue as a source of renewable and sustainable energy in Malaysia” *Renewable and sustainable energy reviews* [En línea] 2014 (Malasia) 40 (3) pp. 621-632. [Consulta: 15 julio 2022]. ISSN 1016 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114006741>

ESCALANTE Jamin. “ Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [En línea] 2022 (Taiwan) 169 (2) pp. 1-2. [Consulta: 20 julio 2022]. ISSN 03014215 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212200795X>

FURKAN KARTAL “A deep learning approach for prediction of syngas lower heating value from cfb gasifier in aspen plus®” *Energy* [En línea] 2020 (Turquia) 209 (9) pp. 118457 [Consulta: 20 julio 2022]. ISSN 03605442 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220315656>

GERARDO Gordillo “ Adiabatic fixed-bed gasification of coal, dairy biomass, and feedlot biomass using an air–steam mixture as an oxidizing agent ” *Renewable energy* [En línea] 2009 (Colombia) 34 (12). [Consulta: 1 agosto 2022]. ISSN 09601481 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148109002742>

GIGLIO Emanuele “Integration between biomass gasification and high-temperature electrolysis for synthetic methane production” *Biomass and bioenergy*. [En línea] 2021 (Italia) 148 (5) pp. 106017. [Consulta: 1 agosto 2022]. ISSN 09619534 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953421000544>

GIRALT ORTEGA Giselle “Characterization of Sawdust of different Woods” *Tecnologia Quimica* [En línea] 2016 (Colombia) 36 (3) pp. 469. [Consulta: 4 agosto 2022]. ISSN 2224-6185 Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&nrm=iso&tlng=en

GNANASEKARAN Lalitha “ The conversion of biomass to fuels via cutting-edge technologies: Explorations from natural utilization systems ” *Fuel*. [En línea] 2023 (Chile) 331 (5). [Consulta: 12 agosto 2022]. ISSN 00162361 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122024978>

Hong Guo “Biomass power generation in China: Status, policies and recommendations” *Energy reports*, [En línea] 2022 (China) 8 (3) pp. 687-696. [Consulta: 12 agosto 2022]. ISSN 23524847 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722015153>

HONGCAI Su “ Recent advances in supercritical water gasification of biowaste catalyzed by transition metal-based catalysts for hydrogen production” *Renewable and sustainable energy*

reviews [En línea] 2022 (China) 154 (3) pp. 10. [Consulta: 18 agosto 2022]. ISSN 310017
Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121010984>

JISHUO LI “ Prediction and optimization of syngas production from steam gasification: Numerical study of operating conditions and biomass composition” *Energy* [En línea] 2009 (China) 236 (5) pp. 708-714. [Consulta: 18 agosto 2022]. ISSN 03605442 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421002533>

KLIMANTOS P. “ Air-blown biomass gasification combined cycles (BGCC): System analysis and economic assessment” *Energy* [En línea] 2009 (Grecia) 34 (5) pp. 708-714. [Consulta: 23 agosto 2022]. ISSN 03605442 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544208001114>

MARTINEZ MAXIMILIANO. “Simulación del proceso de gasificación termoquímica para la obtención de gas combustible, aplicado a cascarilla de café”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Veracruzana Facultad De Ingeniería Mecánica Eléctrica. Veracruz-México. 2015. Pp. 28-50. [Consulta: 23 agosto 2022]. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41974/MartinezRuizesparzaMaximiliano.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MARTINEZ SUSANA. “Modelado y análisis de sistemas de co-gasificación de biomasa y residuos plásticos”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Zaragoza. Zaragoza-España. 2015. Pp. 28-50. [Consulta: 23 agosto 2022]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/30659/files/TESIS-2015-020.pdf>

MCKENDRY PETER. “Energy production from biomass”. *Bioresource technology*. [En línea] 2002 83 (1) pp. 37-46. [Consulta: 3 septiembre 2022]. ISSN: 0960-8524. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852401001183>

MEMBRILLERA BLANCA. “Aplicación de la biomasa a la generación de energía térmica. Análisis de instalaciones”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Maestría) Universidad de Sevilla Escuela Técnica Superior de Ingeniería Departamento de Ingeniería Energética Sevilla-España. 2018. Pp. 6. [Consulta: 3 septiembre 2022]. Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/81969/TFM-1148-MEMBRILLERA.pdf?sequence=1>

MOHAMED ANTAR et al. Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [En línea] 2011

(Canadá) 139 (2) pp. 2-10. [Consulta: 7 septiembre 2022]. ISSN: 110-691. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120309758>

MOHAMED ANTAR et al. Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [En línea] 2011 (Canadá) 139 (2) pp. 2-10. [Consulta: 3 septiembre 2022]. ISSN: 110-691. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120309758>

MONTOYA SERGIO. “Documentación de la técnica de cromatografía de gases en el análisis de hidrocarburos alifáticos en aguas residuales”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tecnólogo) Universidad Tecnológica De Pereira Facultad De Tecnología Escuela De Química Programa De Tecnología Química. Pereira-Colombia. 2012. Pp. 38-40. [Consulta: 6 septiembre 2022]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/6aee81c6-27fb-40aa-80e3-77cb81d5130b/content>

MOREIRA RUI et al. “Gasification of charcoal in air, oxygen, and steam mixtures over a γ - Al_2O_3 fluidized bed”. *Energy and fuels*. [En línea] 2018. 31 (1) pp. 496-415. [Consulta: 6 septiembre 2022]. ISSN 1520-5029. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/321366299_Gasification_of_Charcoal_in_Air_Oxygen_and_Steam_Mixtures_over_a_g-Al2O3_Fluidized_Bed

MOYA ROQUE et al. “Uso de la biomasa forestal y resultados de propiedades dendroenergéticas para especies de interés”. *BCIE*. [En línea] 2017. pp. 20. [Consulta: 12 septiembre 2022]. Disponible en: https://fondohondurasespana.bcie.org/fileadmin/fhe/espanol/archivos/publicaciones/Educacion_Superior/6_Intro_Uso_Biomasa_Forestal_Resultados_Dendroenerg.pdf

OROZCO LENIN. “levantamiento y análisis del potencial energético aprovechable de la biomasa forestal en el cantón riobamba y su viabilidad a través de gasificación tipo downdraft”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Maestría) Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Mecánica. Quito-Ecuador. 2017. Pp. 15-18. [Consulta: 14 septiembre 2022]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18894/1/CD-8286.pdf>

PATRAS TAPAS et al. “Biomass gasification models for downdraft gasifier: a state-of-the-art review”. *Renewable and sustainable energy reviews*. [En línea] 2015 50(1) pp. 20. [Consulta: 14 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115004700>

PEREZ TOBIO et al. Simulación del proceso de gasificación de biomásas a partir de *Jatropha curcas* y *Dichrostachys cinerea*. *Afinidad* 591. [En línea] 2020 77 (591) pp. 231. [Consulta: 17 septiembre 2022]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/377424>

PRIYANKA KAUSHAL “Application of a detailed mathematical model to the gasifier unit of the dual fluidized bed gasification plant” *Biomass and bioenergy* [En línea] 2011 (Austria) 35 (7) pp. 2491-2498. . [Consulta: 17 septiembre 2022]. ISSN 09619534 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411000262>

PROENZA NESTOR. “Gas pobre: factibilidad de su uso en los motores”. *Ingeniería energética*. [En línea] 2011 3 (1) pp. 3 [Consulta: 22 septiembre 2022]. ISSN: 1815-5901. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127748001.pdf>

RAJU ARUN et al. “Synthesis gas production using steam hydrogasification and steam reforming”. *Fuel processing technology*. [En línea] 2009 90 (2) pp. 330-336. [Consulta: 22 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382008002518>

RAMIREZ ANGIE et al. “. Alternatives for the use of rice husks as an energy source”. *Fuentes el reventon energetico*. [En línea] 2021 19 (2) pp. 69-81 [Consulta: 1 octubre 2022]. ISSN: 2145-8502. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjipveYlbrAhWlbTABHskKDokQFnoECA4QAAQ&url=https%3A%2F%2Frevistas.uis.edu.co%2Findex.php%2Frevistafuentes%2Farticle%2Fdownload%2F12981%2F11945%2F87918&usg=AOvVaw1E1B5FziPc-Xr2I9mnl5EC>

RAMIREZ SANTIAGO et al. “Gasificación a partir de materia orgánica residual”. *Ingeniería e investigación*. [En línea] 2022 21 (2) pp. 6 [Consulta: 1 octubre 2022]. ISSN: 0120-5609. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-56092011000300003&lng=e&nrm=iso&tlng=es

RODRÍGUEZ, Damián Copena; FERNÁNDEZ, Xavier Simón. La producción de energía eléctrica a partir de la biomasa forestal primaria: análisis del caso gallego. *Revista galega de economía*, 2014, vol. 23, no 2, p. 91-111. [Consulta: 5 octubre 2022]. ISSN: 0379-3982. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/391/39138754005.pdf>

ROMO LUZ et al. “Analysis of the spanish scientific production in re-newable energy, sustainability and the environment in the global context”. *Investigacion biotecnica*. [En línea] 2013 27 (60) pp. 127 [Consulta: 5 octubre 2022]. ISSN: 2448-8321. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-358X2013000200007&lng=es&nrm=i&tlng=en

SELLERGRÉN, Börje; HALL, Andrew J. Fundamental aspects on the synthesis and characterisation of imprinted network polymers. En *Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry*. Elsevier, 2001. p. 21-57. [Consulta: 9 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166526X19300467>

SERRANO JOSE. “Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador”. *Revista de la facultad de ciencias químicas*. [En línea] 2017 17 (1) pp. 21-57 [Consulta: 9 octubre 2022]. ISSN: 1390-1869. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/29791/1/4.%201592-4835-1-PB.pdf>

SHAHBAZ MUHAMMAD et al. “Parametric study and optimization of methane production in biomass gasification in the presence of coal bottom ash”. *Procedia engineering*. [En línea] 2016 148 (1) pp. 409-416. [Consulta: 11 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816308980>

SHETH PRATIK et al. “Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier”. *Bioresource technology*. [En línea] 2009 100 (12) pp. 3127-3133. [Consulta: 11 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852409000480>

SIKARWAR VINEETE et al. “An overview of advances in biomass gasification”. [En línea] 2016 10 (1) pp. 3 [Consulta: 15 octubre 2022]. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c6ee00935b>

SIMON CHRISTOPHER et al. “Introduction to renewable energy: an interdisciplinary approach”. *Annual conference and exposition, conference proceedings*. [En línea] 2010 1 (2) pp. 16 [Consulta: 15 octubre 2022]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjB8Lfnbr_AhXtj2oFHQ6DD3QQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fpeer.asee.org%2Fintroduction-to-renewable-energy-an-interdisciplinary-approach.pdf&usg=AOvVaw117hFuSFtl2QqGho2XtsE-

SPANAVELLO ROLANDO. “Fuentes alternativas de materia prima”. *Educ. Quím.* [En línea] 2010 1 (2) pp. 45 [Consulta: 17 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-educacion-quimica-78-articulo-fuentes-alternativas-materia-prima-S0187893X13725059>

TUAN HOANG Anh “ Insight into the recent advances of microwave pretreatment technologies for the conversion of lignocellulosic biomass into sustainable biofuel” *Chemosphere*, [En línea] 2021 (Inglaterra) 281 (3) pp. 3-4. [Consulta: 26 octubre 2022]. ISSN 18791298 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521013497>

TURARE C. Biomass gasification technology and utilisation. Institute university of Flensburg–Germany [http. mitglied. lycos. de/cturare/bio. htm.](http://mitglied.lycos.de/cturare/bio.htm) [Consulta: 26 octubre 2022].



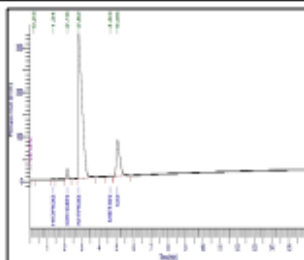
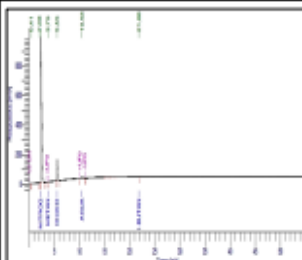

URIEN ANDREA. “Obtención de biocarbonos y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Maestría) Universidad Nacional de Educación a Distancia Facultad de Ciencias Departamento de Ciencias Analíticas. 2013. Pp. 15-18. [Consulta: 3 noviembre 2022]. Disponible en: https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf

YUYA Kajikawa “ Structure of research on biomass and bio-fuels: a citation-based approach” *Technological forecasting and social change* [En línea] 2008 (Japon) 75 (9) pp. 1349-1359. [Consulta: 18 noviembre 2022]. ISSN 00401625 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162508000917>

ZHANG ZIBIN et al. “Food versus fuel: what do prices tell us”. *Energy policy.* [En línea] 2010 38 (2) pp. 445-451 [Consulta: 12 diciembre 2022]. ISSN: 0301-4215. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421509007174>

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DE LA BIOMASA DE CASCARILLA DE ARROZ

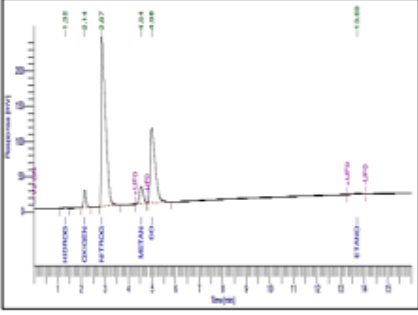
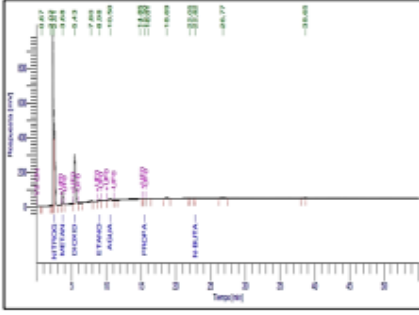

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	1 de 1	
		FPT-7.8-03-04		
INFORME No. I-LAI-022-85-01				
INFORMACION CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Graciela Casillas	Persona de contacto:	Ing. Paúl Palmay	
Dirección / Tel.:	Av. 11 de noviembre y José de Villamil - Riobamba / 098 463 8498	E-mail:	graciela.casillas@esPOCH.edu.ec	
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-022-85-01	Fecha de muestreo:	* 12/1/2023	
Tipo de muestra:	Gas de síntesis/ Biomasa de cascarilla de arroz	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente	
Tipo de contenedor:	Bolsa teflar	Fecha inicio del ensayo:	13/1/2023	
Fecha de recepción:	13/1/2023	Fecha entrega informe:	20/1/2023	
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	17,0 °C	45,0 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	66,0 °F	0,7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01
	18,9 °C	4895,3 Pa		PE-7.2-02
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		12,22	0,06
	Oxígeno		2,72	0,07
	Nitrógeno		48,05	0,84
	Monóxido de carbono		25,84	0,44
	Metano		0,17	0,00
	Dióxido de carbono		9,96	0,20
PROPIEDADES	Agua		1,04	0,08
	Densidad relativa		0,92	
	Peso molecular promedio [g/mol]		26,50	
	Densidad de la muestra [g/L]		1,12	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		4644,99	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		4390,17	
Factor de compresibilidad (z)		1,0000		
CROMATOGRAMA				MUESTRA
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)		Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.			
Elaborado por:			Revisado y aprobado por:	
	Ing. Gabriela Pérez ANALISTAS DE LABORATORIO		Ing. Andrés Chico, MSc. COORDINADOR DEL LABORATORIO	



ANEXO B: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DE LA BIOMASA DE VIRUTA

	INFORME DE RESULTADOS	Página: 1 de 1 FPT-7.8-03-04	
---	------------------------------	--	---

INFORME No. I-LAI-022-85-02

INFORMACIÓN CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Graciela Casillas	Persona de contacto:	Ing. Paúl Palmay	
Dirección / Telf.:	Av. 11 de noviembre y José de Villamil – Riobamba / 098 463 8498	E-mail:	graciela.casillas@esPOCH.edu.ec	
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-022-85-02	Fecha de muestreo:	* 26/1/2023	
Tipo de muestra:	Gas de síntesis/ Residuos forestales	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente	
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar	Fecha inicio del ensayo:	30/1/2023	
Fecha de recepción:	27/1/2023	Fecha entrega informe:	2/2/2023	
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	18,0 °C	45,0 %	Norma de referencia: ASTM D 1945: Cromatografía	
Temperatura y Presión de muestra:	65,5 °F 18,6 °C	0,7 psi 4895,3 Pa	Procedimiento interno: PE-7.2-01 PE-7.2-02	
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		29,50	0,147
	Oxígeno		2,57	0,082
	Nitrógeno		25,17	0,189
	Monóxido de carbono		29,25	0,055
	Metano		2,70	0,023
	Dióxido de carbono		19,56	0,331
	Etano		0,27	0,020
	Agua		0,95	0,216
	Propano		0,03	0,003
PROPIEDADES	Densidad relativa		0,90	
	Peso molecular promedio [g/mol]		25,86	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,09	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		7088,65	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		6586,71	
Factor de compresibilidad (z)		1,0000		
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)		Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.			
Elaborado por:		Revisado y aprobado por:		
Ing. Gabriela Pérez ANALISTAS DE LABORATORIO		Ing. Andrés Chico, MSc. COORDINADOR DEL LABORATORIO		

ANEXO C: TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA (CALORES ESPECÍFICOS) -
CENGEL

TABLA A-1

Masa molar, constante de gas y calores específicos de ciertas sustancias

Sustancia	Masa molar M , kg/kmol	Constante de gas R , kJ/kg · K*	Calores específicos a 25°C		
			c_p , kJ/kg · K	c_v , kJ/kg · K	$k = c_p/c_v$
Aire	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Amoniaco, NH ₃	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argón, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromo, Br ₂	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
Isobutano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
<i>n</i> -Butano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Carbono, bióxido de, CO ₂	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Carbono, monóxido de, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Cloro, Cl ₂	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Clorodifluorometano (R-22), CHClF ₂	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Etano, C ₂ H ₆	30.070	0.2765	1.744	1.468	1.188
Etileno, C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Fluoruro, F ₂	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helio, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
<i>n</i> -Heptano, C ₇ H ₁₆	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
<i>n</i> -Hexano, C ₆ H ₁₄	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hidrógeno, H ₂	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Kriptón, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Metano, CH ₄	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Neón, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrógeno, N ₂	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Óxido nítrico, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Nitrógeno, bióxido de, NO ₂	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Oxígeno, O ₂	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
<i>n</i> -Pentano, C ₅ H ₁₂	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propano, C ₃ H ₈	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propileno, C ₃ H ₆	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Agua, H ₂ O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Sulfuro, bióxido de, SO ₂	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Tetraclorometano, CCl ₄	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluoroetano (R-134a), C ₂ H ₂ F ₄	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluoroetano (R-143a), C ₂ H ₃ F ₃	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Xenón, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

*La unidad kJ/kg · K es equivalente a kPa · m³/kg · K. La constante de gas se calcula de $R = R_u/M$, donde $R_u = 8.31447$ kJ/kmol · K es la constante de gas universal y M la masa molar.

Fuente: Valores de calores específicos se obtuvieron principalmente de rutinas de propiedad preparadas por The National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.

ANEXO D: PROPIEDADES DEL AIRE - CENGEL

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

ANEXO E: CALORES ESPECÍFICOS - CENGEL

TABLA A-11

Masa molar, constante de gas y calores específicos de ciertas sustancias

Sustancia	Masa molar, <i>M</i> , lbm/lbmol	Constante de gas <i>R</i> *		Calores específicos a 77°F		
		Btu/ lbm · R	psia · ft ³ / lbm · R	<i>c_p</i> , Btu/lbm · R	<i>c_v</i> , Btu/lbm · R	<i>k</i> = <i>c_p</i> / <i>c_v</i>
Aire	28.97	0.06855	0.3704	0.2400	0.1715	1.400
Amoniaco, NH ₃	17.03	0.1166	0.6301	0.4999	0.3834	1.304
Argón, Ar	39.95	0.04970	0.2686	0.1243	0.07457	1.667
Bromo, Br ₂	159.81	0.01242	0.06714	0.0538	0.04137	1.300
Isobutano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.03415	0.1846	0.3972	0.3631	1.094
<i>n</i> -Butano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.03415	0.1846	0.4046	0.3705	1.092
Carbono, bióxido de, CO ₂	44.01	0.04512	0.2438	0.2016	0.1564	1.288
Carbono, monóxido de, CO	28.01	0.07089	0.3831	0.2482	0.1772	1.400
Cloruro, Cl ₂	70.905	0.02802	0.1514	0.1142	0.08618	1.325
Clorodifluorometano (R-22), CHClF ₂	86.47	0.02297	0.1241	0.1552	0.1322	1.174
Etano, C ₂ H ₆	30.070	0.06604	0.3569	0.4166	0.3506	1.188
Etileno, C ₂ H ₄	28.054	0.07079	0.3826	0.3647	0.2940	1.241
Fluoruro, F ₂	38.00	0.05224	0.2823	0.1967	0.1445	1.362
Helio, He	4.003	0.4961	2.681	1.2403	0.7442	1.667
<i>n</i> -Heptano, C ₇ H ₁₆	100.20	0.01982	0.1071	0.3939	0.3740	1.053
<i>n</i> -Hexano, C ₆ H ₁₄	86.18	0.02304	0.1245	0.3951	0.3721	1.062
Hidrógeno, H ₂	2.016	0.9850	5.323	3.416	2.431	1.405
Kriptón, Kr	83.80	0.02370	0.1281	0.05923	0.03554	1.667
Metano, CH ₄	16.04	0.1238	0.6688	0.5317	0.4080	1.303
Neón, Ne	20.183	0.09838	0.5316	0.2460	0.1476	1.667
Nitrógeno, N ₂	28.01	0.07089	0.3831	0.2484	0.1774	1.400
Óxido nítrico, NO	30.006	0.06618	0.3577	0.2387	0.1725	1.384
Nitrógeno, bióxido de, NO ₂	46.006	0.04512	0.2438	0.1925	0.1474	1.306
Oxígeno, O ₂	32.00	0.06205	0.3353	0.2193	0.1572	1.395
<i>n</i> -Pentano, C ₅ H ₁₂	72.15	0.02752	0.1487	0.3974	0.3700	1.074
Propano, C ₃ H ₈	44.097	0.04502	0.2433	0.3986	0.3535	1.127
Propileno, C ₃ H ₆	42.08	0.04720	0.2550	0.3657	0.3184	1.148
Agua, H ₂ O	18.015	0.1102	0.5957	0.4455	0.3351	1.329
Sulfuro dióxido de, SO ₂	64.06	0.03100	0.1675	0.1488	0.1178	1.263
Tetraclorometano, CCl ₄	153.82	0.01291	0.06976	0.1293	0.1164	1.111
Tetrafluoroetano (R-134a), C ₂ H ₂ F ₄	102.03	0.01946	0.1052	0.1991	0.1796	1.108
Trifluoroetano (R-143a), C ₂ H ₃ F ₃	84.04	0.02363	0.1277	0.2219	0.1983	1.119
Xenón, Xe	131.30	0.01512	0.08173	0.03781	0.02269	1.667

*La constante de gas se calculó de $R = R_u/M$, donde $R_u = 1.9859 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R} = 10.732 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R}$ es la constante de gas universal y M es la masa molar.

Fuente: Valores de calores específicos se obtuvieron principalmente de rutinas de propiedad preparadas por The National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.

ANEXO F: CALORES ESPECÍFICOS DE GAS IDEAL – CENGEL

TABLA A-2

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (continuación)

b) A diversas temperaturas

Temperatura, K	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k
	kJ/kg · K	kJ/kg · K		kJ/kg · K	kJ/kg · K		kJ/kg · K	kJ/kg · K	
	<i>Aire</i>			<i>Dióxido de carbono, CO₂</i>			<i>Monóxido de carbono, CO</i>		
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398
400	1.013	0.726	1.395	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395
450	1.020	0.733	1.391	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392
500	1.029	0.742	1.387	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387
550	1.040	0.753	1.381	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376
650	1.063	0.776	1.370	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370
700	1.075	0.788	1.364	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364
750	1.087	0.800	1.359	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358
800	1.099	0.812	1.354	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353
900	1.121	0.834	1.344	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343
1000	1.142	0.855	1.336	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335
	<i>Hidrógeno, H₂</i>			<i>Nitrógeno, N₂</i>			<i>Oxígeno, O₂</i>		
250	14.051	9.927	1.416	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398
300	14.307	10.183	1.405	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395
350	14.427	10.302	1.400	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389
400	14.476	10.352	1.398	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382
450	14.501	10.377	1.398	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373
500	14.513	10.389	1.397	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365
550	14.530	10.405	1.396	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358
600	14.546	10.422	1.396	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350
650	14.571	10.447	1.395	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343
700	14.604	10.480	1.394	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337
750	14.645	10.521	1.392	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332
800	14.695	10.570	1.390	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327
900	14.822	10.698	1.385	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319
1000	14.983	10.859	1.380	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313

Fuente: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4a. ed., Nueva York, McGraw-Hill, 1983, p. 783, Tabla A-4M. Publicada originalmente en *Tables of Thermal Properties of Gases*, NBS Circular 564, 1955.

ANEXO G: ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE CENIZAS DEL RESIDUO SÓLIDO



ANEXO H: ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DEL ALQUITRÁN



ANEXO I: ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA BIOMASA





epoch

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

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

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 07 / 07 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Graciela Nicole Casillas Caza
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniera Química
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1256-DBRA-UPT-2023