



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**“APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA
MEDIANTE GASIFICACIÓN PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN LA EMPRESA ARROCERA EL REY S.A”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: DANIELA ELIZABETH CASTRO LOZADA

DIRECTOR: Ing. MÓNICA LILIAN AVALOS Mgs.

Riobamba - Ecuador

2023

©2023, Daniela Elizabeth Castro Lozada

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

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

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

Riobamba, 22 de junio de 2023.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniela Castro', enclosed within a blue oval shape. The signature is stylized and cursive.

Daniela Elizabeth Castro Lozada

C. I: 180544352-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA MEDIANTE GASIFICACIÓN PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA ARROCERA EL REY S.A** , realizado por la señorita: **DANIELA ELIZABETH CASTRO LOZADA**, 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



2023-06-08

Ing. Mónica Lilian Andrade Avalos, Mgs.
DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-06-08

Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes, MsC.
ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-06-08

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia y a mis hermanas

Daniela

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi tutora la Ing. Mónica Andrade y a mi asesor el Ing. Paul Palmay, por el tiempo dedicado al desarrollo del proyecto, su apoyo, confianza y asesoría que ayudaron a mejorar mi comprensión del durante todo este proceso.

Daniela

ÍNDICE DE CONTENIDO

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

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DE PROBLEMA.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes investigativos.....	6
2.2. Referencias Teóricas.....	7
2.2.1. <i>Biomasa</i>	7
2.2.2. <i>Caracterización físico química de la cascarilla de arroz</i>	8
2.2.2.1. <i>Características físicas</i>	9
2.2.3. <i>Tipificación de la cascarilla de arroz como combustible sólido</i>	12
2.2.4. <i>Análisis Aproximado</i>	13
2.2.4.1. <i>Contenido de humedad</i>	13
2.2.4.2. <i>Porcentaje de cenizas</i>	14
2.2.4.3. <i>Porcentaje de material volátil</i>	15
2.2.4.4. <i>Porcentaje de carbono fijo</i>	15
2.2.5. <i>Análisis elemental</i>	15
2.2.6. <i>Poder calorífico</i>	16

2.2.7.	<i>Gasificación</i>	19
2.2.8.	<i>Reacciones de gasificación</i>	20
2.2.9.	<i>Determinación de las variables del diseño</i>	22
2.2.10.	<i>Syngas</i>	24
2.2.10.1.	<i>Utilización y pretratamientos del gas de síntesis</i>	25
2.2.10.2.	<i>Composición del syngas.</i>	27
2.2.10.3.	<i>Proceso para generar syngas</i>	27
2.2.11.	<i>Agentes gasificantes</i>	28
2.2.12.	<i>Tipos de gasificación: Diseños</i>	29
2.2.12.1.	<i>Gasificación en reactores de lecho fijo</i>	30
2.2.12.2.	<i>Gasificación en reactores de lecho fluidizado</i>	33
2.2.13.	<i>Modelos de gasificación de biomasa</i>	37
2.2.13.1.	<i>Modelos de tasa cinética</i>	37
2.2.13.2.	<i>Modelo de equilibrio termodinámico gasificación de biomasa</i>	39
2.2.14.	<i>Softwares utilizados para la modelación matemática.</i>	43

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	44
3.1.	Metodología para caracterización físico química de la cascarilla de arroz	44
3.1.1.	<i>Análisis de las propiedades y características fisicoquímicas cascarilla de arroz</i>	44
3.1.1.1.	<i>Densidad</i>	44
3.1.1.2.	<i>Porosidad</i>	45
3.1.2.	<i>Tipificación de la cascarilla de arroz</i>	47
3.1.2.1.	<i>Contenido de humedad</i>	47
3.1.2.2.	<i>Porcentaje de cenizas.</i>	48
3.1.2.3.	<i>Porcentaje de Materia Volátil</i>	49
3.1.2.4.	<i>Porcentaje de Carbono Fijo.</i>	50
3.1.3.	<i>Análisis último de la cascarilla de arroz</i>	50
3.2.	Metodología de desarrollo del modelo matemático para simulación del porcentaje de productos gaseosos obtenidos	55
3.2.1.	<i>Propiedades relacionadas con la gasificación</i>	55
3.2.2.	<i>Propiedades relacionadas con la biomasa</i>	55
3.2.3.	<i>Formula química de la biomasa</i>	55
3.2.4.	<i>Contenido de humedad</i>	56
3.2.5.	<i>Poder calorífico</i>	57
3.2.6.	<i>Relación de equivalencia</i>	57

3.2.7.	<i>Formulación del modelo matemático de gasificación</i>	58
3.2.8.	<i>Poder calorífico del gas producido</i>	61
3.2.9.	<i>Cálculo de constantes de equilibrio</i>	61
3.2.10.	<i>Determinación de porcentajes de productos gaseosos</i>	64
3.2.11.	<i>Solución del modelo en el software EES.</i>	65
3.2.12.	<i>Validación</i>	65
3.2.12.1.	<i>Comparación composiciones del gas</i>	66
3.3.	Metodología para el dimensionamiento proceso de aprovechamiento energético	66
3.3.1.	<i>Proceso de gasificación</i>	66
3.3.1.1.	<i>Altura cámara de residuos</i>	68
3.3.1.2.	<i>Altura del depósito de la biomasa</i>	69
3.3.2.	<i>Limpieza y acondicionamiento del gas</i>	69
3.3.3.	<i>Generación de energía eléctrica</i>	70
3.3.4.	<i>Metodología de alimentación para una planta de generación de energía térmica que utiliza cascarilla de arroz como combustible de biomasa</i>	70
3.3.4.1.	<i>Proceso de generación de energía de la central térmica de biomasa.</i>	71
3.3.4.2.	<i>Cálculos de la cantidad de cascarilla de arroz que se debe utilizar como biocombustible para generar electricidad.</i>	71
3.3.4.3.	<i>Análisis del ciclo Rankine:</i>	73
3.3.4.4.	<i>Balance térmico grupo horno-caldera:</i>	75

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	83
4.1.	Aplicación del modelo en gasificación de cascarilla de arroz	83
4.2.	Resultados obtenidos de la modelación	83
4.3.	Análisis de resultados	85

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
5.1.	Conclusiones	87
5.2.	Recomendaciones	89

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Características Químicas de la Cascarilla de Arroz.....	18
Tabla 2-2:	Composición elemental de biomosas en base seca y en porcentaje peso (%). ..	23
Tabla 2-3:	Base seca y libre de cenizas	23
Tabla 2-4:	Requerimientos de combustible versus diseño de gasificador.	24
Tabla 2-5:	Mezcla de gases obtenida del proceso de gasificación.....	29
Tabla 2-6:	Características de los gasificadores de lecho fijo.	33
Tabla 2-7:	Condiciones de operación de diferentes tipos de gasificadores	37
Tabla 2-8:	Comparación de los resultados del modelo modificado con los datos experimentales de para biomasa con diferente contenido de humedad (CM)...	41
Tabla 2-9:	Comparación entre resultados experimentales, modelo original y modelo modificado Jarunthammachote y Dutta (2008).	42
Tabla 3-1:	Análisis del contenido de humedad de la cascarilla de arroz de laboratorios de referencia.	48
Tabla 3-2:	Análisis del porcentaje de cenizas de la cascarilla de arroz de laboratorios de referencia.	48
Tabla 3-3:	Composición mineral de la ceniza de la cascarilla de arroz.	49
Tabla 3-4:	Análisis del porcentaje de volátiles de la cascarilla de arroz.	49
Tabla 3-5:	Análisis del porcentaje de carbono fijo de la cascarilla de arroz.....	50
Tabla 3-6:	Análisis último de la cascarilla de arroz.....	52
Tabla 3-7:	Análisis ultimo de cascarilla de arroz.....	53
Tabla 3-8:	Formula química de las biomosas usadas como referencia.	56
Tabla 3-9:	Dimensiones iniciales del tipo de gasificador elegido.....	67
Tabla 3-10:	Dimensiones finales del tipo de gasificador elegido.	68
Tabla 3-11:	Rendimiento global de planta equivalente para algunos procesos de conversión térmica de biomasa.	72
Tabla 3-12:	Valores de entalpia para los equipos que conforman el ciclo Rankine.	73
Tabla 4-1:	Análisis último y próximo de cascarilla de arroz.	83
Tabla 4-2:	Tabla de resultado de valores de la composición de gas	84

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1:	Tipos de biomasa según diferentes clasificaciones	8
Ilustración 2-2:	Estructura del grano de arroz y cascarilla de arroz.....	9
Ilustración 2-3:	Superficie exterior (izquierda) e interior (derecha) de la cascarilla vista al microscopio (X 500).....	10
Ilustración 2-4:	Esquema de una camada de cascarilla.....	10
Ilustración 2-5:	Cascarilla de arroz con poros internos y externos.....	11
Ilustración 2-6:	Pacas compactadas de cascarilla de arroz	12
Ilustración 2-7:	Pila de cascarilla de arroz.....	13
Ilustración 2-8:	Cascarilla de arroz húmeda (izquierda) y seca (derecha).....	14
Ilustración 2-9:	Cenizas de cascarilla.....	14
Ilustración 2-10:	Mufla de laboratorio.....	15
Ilustración 2-11:	Interpretación gráfica del poder calorífico superior (HHV).....	16
Ilustración 2-12:	Interpretación gráfica del poder calorífico inferior (LHV)	17
Ilustración 2-13:	Bomba calorimétrica digital (Modelo C2000 Control, Ike Werke)	17
Ilustración 2-14:	Esquemas de funcionamiento de gasificadores updraft, lecho fluidizado y downdraft (de izquierda a derecha).....	20
Ilustración 2-15:	Relación entre el contenido del agua (%) y la producción energética (kW) de diferentes biomásas	22
Ilustración 2-16:	Aplicaciones del gas de síntesis	25
Ilustración 2-17:	Tecnologías de conversión de gas de síntesis	26
Ilustración 2-18:	Flujograma de obtención del gas sintético (Syngas).....	28
Ilustración 2-19:	Gasificador y diagrama esquemático.....	30
Ilustración 2-20:	Diagrama de gasificador de tipo Updraft	31
Ilustración 2-21:	Tipos de gasificadores.....	32
Ilustración 2-22:	Gasificador crossdraft (izquierda) y de núcleo abierto (derecha).....	33
Ilustración 2-23:	Esquema de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.....	35
Ilustración 2-24:	Esquema de un gasificador de lecho fluidizado Circulante.....	36
Ilustración 2-25:	Diagrama de un gasificador DFB (derecha).....	36
Ilustración 3-1:	Digestor y un destilador de muestras	51
Ilustración 3-2:	Espectrómetro de UV	51
Ilustración 3-3:	Variación del $LHV_{b,h}$ según el contenido de humedad.....	54
Ilustración 3-4:	Dimensiones zona de combustión y reducción.....	67
Ilustración 3-5:	Diagrama del sistema de limpieza y acondicionamiento del gas	70
Ilustración 3-6:	Esquema de una central de generación termoeléctrica con biomasa.....	71

Ilustración 3-7:	Esquema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa mediante gasificación.....	72
Ilustración 3-8:	Modelo de Ciclo Rankine empleado para el dimensionamiento de la planta de biomasa.....	73
Ilustración 3-9:	Balance de energía típico de una caldera	77
Ilustración 4-1:	Resultados de contenido de agua (w) y m.....	84
Ilustración 4-2:	Resultados de cálculo de constantes de reacción k_1 y k_2	84
Ilustración 4-3:	Resultados de porcentajes en masa de cada una de las especies del gas producto.....	85

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

BFB:	Gasificador de lecho fluidizado burbujeante.
b.h.:	base húmeda.
b.s.:	base seca.
CFB:	Gasificador de lecho fluidizado circulante.
CGC:	limpieza de gases fríos.
CV:	valor calorífico.
DFB:	Gasificador de doble lecho fluidizado.
h:	Entalpía (kJ/kg)
HGC:	limpieza de gases calientes.
IGCC:	Gasificación integrada en ciclo combinado.
MC:	Contenido de humedad de biomasa.
MW_{th}:	Megavatio térmico.
Tn:	Tonelada (1000 kg)
WGC:	limpieza de gases cálidos.
ηCG:	eficiencia del gas frío.

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** CÓDIGO DE MODELACIÓN MATEMÁTICA EN EES UTILIZADO PARA LA PREDICCIÓN CARACTERÍSTICAS DEL SYNGAS.
- ANEXO B:** CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EMPRESA ARROCERA EL REY S.A
- ANEXO C:** ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ REALIZADO EN AGROCALIDAD (AGENCIA ECUATORIANA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGRO (5).
- ANEXO D:** ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ REALIZADO EN PRONACA (PROCESADORA NACIONAL DE ALIMENTOS) (5)
- ANEXO E:** EJEMPLO DE COMPARACIÓN DE COMPOSICIÓN EN BASE SECA DE GASES DE BIOMASA DE MADERA
- ANEXO F:** CROMATOGRAFÍA DE GASES OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

RESUMEN

Los avances tecnológicos requieren la investigación de nuevas tecnologías que ayuden al mejoramiento de la sociedad, el medio ambiente y la academia. Uno de los grandes problemas de la sociedad actual es la dependencia energética de los combustibles fósiles tradicionales (carbón, gas natural y petróleo) estas fuentes energéticas generan un impacto negativo en la salud y el medio ambiente. Es por ello que el presente trabajo tuvo por objetivo aprovechar energéticamente la biomasa mediante gasificación para generación de energía eléctrica en la empresa Arrocería El Rey S.A. Utilizando las metodologías necesarias para la caracterización físico química de la cascarilla de arroz, también para el modelo matemático desarrollados para el aprovechamiento energético por gasificación de biomasa, al comparar para ver cuál se adapta mejor como modelo de gasificador, para que posteriormente se pueda implementar en un modelo de planta de generación eléctrica. Además, se realizó una búsqueda bibliográfica para recopilar datos experimentales publicados sobre gasificadores de lecho fijo y de tiro descendente que utilizan diferentes biomásas y agentes gasificantes. Obteniendo como resultado que el modelo matemático propuesto se validó a través del software EES y por comparación con modelos similares con biomásas diferentes encontrando un error porcentual de 5%, y la validación económica del proceso el modelo propone una reducción de 10% del pago de energía eléctrica de la empresa por la transformación de biomasa en energía que da un valor económico residuo. Concluyendo que se aprovechó energéticamente la biomasa mediante un proceso de gasificación en un gasificador downdraft de lecho fijo en el que se obtuvo una mezcla de gases de H_2 , N_2 , O_2 , CH_4 , CO y CO_2 , para la generación de energía para la empresa Arrocería El Rey S.A. Recomendando seguir realizando el desarrollo de nuevos proyectos de investigación como la aplicabilidad de los residuos de la gasificación de biomásas.

Palabras clave: <APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO>, <BIOMASA>, <GASIFICACIÓN>, <GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA>, <CASCARILLA DE ARROZ>.

0791-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

Technological advances require research into new technologies that help to improve society, the environment and academia. One of the major problems of today's society is the energy dependence on traditional fossil fuels (coal, natural gas and oil), these energy sources generate a negative impact on health and the environment. That is why the objective of this work was to take advantage of biomass energy by gasification for electric power generation in the company Arrocería El Rey S.A. Using the necessary methodologies for the physical and chemical characterization of rice husks, also for the mathematical model developed for the energy use by biomass gasification, comparing to see which one is better adapted as a gasifier model, so that it can later be implemented in a model of an electric power generation plant. In addition, a bibliographic search was carried out to collect published experimental data on fixed-bed and downdraft gasifiers using different biomasses and gasifying agents. As a result, the proposed mathematical model was validated through the EES software and by comparison with similar models with different biomasses, finding a percentage error of 5%, and the economic validation of the process, the model proposes a 10% reduction of the company's electric energy payment for the transformation of biomass into energy, which gives a residual economic value. Concluding that the biomass was energetically exploited through a gasification process in a fixed bed downdraft gasifier in which a gas mixture of H₂, N₂, O₂, CH₄, CO and CO₂ was obtained, for the generation of energy for the company Arrocería El Rey S.A. Recommending to continue carrying out the development of new research projects such as the applicability of biomass gasification residues.

Key words: <ENERGY RECOVERY>, <BIOMASS>, <GASIFICATION>, <ENERGY GENERATION>, <RICE HUSK>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la conciencia sobre el agotamiento de los combustibles fósiles, la dependencia energética, la contaminación ambiental, las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático global ha llevado a explorar la posibilidad de una mayor participación de las fuentes de energía alternativas y renovables en la producción de energía global para satisfacer las necesidades cambiantes.

Gracias a la alta industrialización de las ciudades y la mejora de la calidad de vida, la demanda mundial de energía va en aumento. Las bajas emisiones netas de CO₂ son una ventaja importante de las fuentes de energía renovables, incluidas la solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la biomasa, de las cuales la biomasa es la más utilizada, ya que representa aproximadamente 9,6%, dentro de este porcentaje el 4% corresponde al uso técnico y el 5,6% al uso tradicional (U.S. Department of Energy, 2015) .

Existen varias tecnologías de conversión de biomasa, pero este proyecto se centra en la gasificación de biomasa, que es más eficiente y controlable que la combustión, debido a que es más eficiente en la producción de energía y tiene aplicaciones potenciales en la producción de productos químicos y combustibles. La gasificación de biomasa es un fenómeno complejo en el que se presenta transferencia y difusión de masa, transferencia de cantidad de movimiento y transferencia de energía, principalmente en forma de calor, esto ocurren simultáneamente. Es muy importante determinar las condiciones de operación del equipo para obtener gas combustible de alto poder calorífico ya los gases con esta característica pueden liberar más energía térmica cuando se queman.

El desarrollo de estas nuevas tecnologías abarca desde el análisis de procesos a escala de laboratorio hasta el diseño de plantas a escala piloto y la implementación de modelos a escala industrial. Estos prototipos también van acompañados de un enfoque de modelado matemático para describir los fenómenos fisicoquímicos, termodinámicos y térmicos que ocurren dentro del gasificador.

El uso de modelos matemáticos permite estudiar de forma rápida y práctica la influencia de los parámetros en el proceso, de igual manera la simulación del proceso de gasificación de biomasa es de gran interés como herramienta para mejorar la comprensión de este complejo. Al modelar este fenómeno de una manera más simple y manejable, se vuelve más fácil detectar sus puntos débiles y controlarlos. La biomasa se puede utilizar para que el carbono y el hidrógeno presentes

se conviertan predominantemente en H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 y H_2S , si la composición, temperatura de salida y poder calorífico se predicen con precisión.

El modelo matemático presentado en este trabajo se basa en un enfoque fundamental de balance masa-energía y utiliza constantes de equilibrio para las reacciones características del proceso de gasificación, y los valores de las constantes se compararon con los descritos en la literatura, el software utilizado para resolver el modelo es el EES (Engineering Equation Solver).

Este trabajo ha desarrollado un modelo matemático funcional simple para un gasificador de biomasa de flujo descendente “downdraft”, se consideran parámetros de entrada de combustible tales como contenido de humedad, composición elemental, relación de equivalencia y relación de reacción con el aire. Para predecir la composición inicial y la temperatura de los gases durante la gasificación, el modelo propuesto se resuelve con un sistema de ecuaciones no lineales. Los resultados generados por el modelo se compararon con datos experimentales presentados en la literatura técnica de referencia obtenidos al probar diferentes biomásas en gasificadores de configuraciones similares.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DE PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La empresa Arrocería El Rey S.A. surge por los años 50 de la visión de la pareja de Mentor Vargas y Regina Guevara con el inicio de un almacén de productos de primera necesidad en la ciudad de Ambato. En el año 1990 surgió la idea de construir una piladora propia para poder satisfacer la demanda del producto luego de la compra de 5 hectáreas de terreno en el kilómetro 13,5 de la vía Puntilla-Salitre cantón Daule, en el año 1996, inmediatamente se empezó la construcción de la piladora. Posteriormente en el mes de noviembre de 1997 se dio inicio a esta nueva empresa.

La Arrocería EL REY adquiere materia prima de la mejor calidad. Las mejores tierras para su producción en Ecuador se encuentran en la provincia del Guayaquil y es de ahí de donde el arroz proviene de plantaciones en: Samborombón, Daule, Salitre, Yaguachi y Jujan.

La empresa mencionada tiene una producción diaria aproximadamente 100 toneladas de arroz, de las cuales después del proceso de pilado la cascarilla representa el 16%, además consta de varias áreas que permiten la labor diaria, sin embargo, las que representan un mayor consumo de energía eléctrica son el área administrativa y el área de producción teniendo un aproximado de 66173 kWh en un horario laboral de 08h00 a 18h00, con un valor de consumo económico total de \$10455,42.

La empresa ha efectuado análisis físico químicos de la cascarilla de arroz proveniente del proceso de pilado, sin embargo, de los resultados obtenidos la empresa no ha realizado ningún tipo de tratamiento para la utilización de esta biomasa.

1.2. Planteamiento del problema

Los avances tecnológicos requieren la investigación de nuevas tecnologías que ayuden al mejoramiento de la sociedad, el medio ambiente y la academia. Uno de los grandes problemas de la sociedad actual es la dependencia energética de los combustibles fósiles tradicionales (carbón, gas natural y petróleo) estas fuentes energéticas generan un impacto negativo en la salud y el medio ambiente, los recursos fósiles además traen consigo problemas como el impacto ambiental en la exploración, obtención y transporte. La liberación a la atmósfera de gases de efecto invernadero al momento de su combustión (carbono, almacenado naturalmente por millones de

años, en forma de CO₂) y, además, una creciente demanda combinada con una declinante oferta da como resultado aumentos en los precios. Lo que ha llevado a que se investiguen nuevas técnicas para aprovechar los residuos o materiales orgánicos que ayuden a la generación de energía, ésta se puede convertir mediante procesos bioquímicos, termoquímicos y fisicoquímicos. Hoy en día se busca reemplazar este tipo de combustibles y aumentar la participación de las energías alternativas y renovables en la producción de energía en el mundo, para suplir la demanda que cada vez es mayor. Dentro de las energías renovables se encuentran la solar, eólica, la biomasa y la hidráulica. Siendo la biomasa la que tiene más potencial energético tanto en países desarrollados como en vía de desarrollo.

En Ecuador existen estudios sobre la generación de biomasa residual se destaca la disponibilidad para su aprovechamiento energético el bagazo de caña, la cascarilla de arroz, la cascarilla de café, la fibra de palma de aceite, residuos madereros y residuos de cosechas. Una de las tecnologías que permite el adecuado aprovechamiento de la biomasa como fuente energética es la gasificación, pues en esta la combustión se hace de forma incompleta y controlada. Sin embargo, para que la generación a partir de la gasificación de biomasa sea económicamente rentable y técnicamente viable se requiere de un equipo capaz de transformar eficientemente la energía contenida en ella. Es por esto, que se plantea que la modelación matemática del proceso es una herramienta que permite observar de una forma aproximada el desarrollo del proceso y sus posibles puntos a mejorar; llegando, entonces, a ser un medio para mejorar la eficiencia del proceso y hacer de este una solución práctica y asequible para la población.

La empresa Arrocería El Rey S.A. tiene un alto consumo de energía eléctrica para el desarrollo de sus actividades tanto administrativas como en la producción diaria de aproximadamente 100 toneladas de arroz, de las cuales después del proceso de pilado la cascarilla representa el 16%. En la actualidad la empresa arrocería no realiza ningún proceso de recuperación o tratamiento de este residuo que tiene un alto valor calorífico debido a su composición de 9,28 % de humedad, 18,26% de cenizas, 7,05 % de carbono fijo y 15065,05 kJ/kg de poder calorífico como biomasa por lo que se ha decidido el desarrollo del presente trabajo para la presentación de una alternativa sustentable y viable para el aprovechamiento energético de esta biomasa mediante gasificación para generación de energía eléctrica.

1.3. Justificación

La cascarilla de arroz al ser considerado un residuo sin valor económico dentro de las industrias arroceras no se somete a una correcta disposición final o aprovechamiento y termina en los campos, ríos o se quema ocasionando contaminación. La empresa Arrocería El Rey S.A. debido a

la gran cantidad de cascarilla obtenida en su proceso de pilado, al alto consumo energético en el desarrollo de sus actividades y el impacto ambiental ocasionado por las emisiones de metano que se producen cuando estos desechos se utilizan en los abonos o se queman al aire libre desea la realización de un proyecto de aprovechamiento de biomasa mediante gasificación para generación de energía eléctrica para el posterior diseño de una planta lo que se considera como un ahorro económico para la empresa. Por lo tanto, de manera general el objetivo es aprovechar energéticamente la biomasa de la cascarilla de arroz a través del desarrollar un modelo matemático simple, para la predicción de las características básicas del gas obtenido en un gasificador de biomasa de lecho fijo tipo Downdraft.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Aprovechar energéticamente la biomasa mediante gasificación para generación de energía eléctrica en la empresa Arrocería El Rey S.A

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz.
- Determinar las variables del proceso para el aprovechamiento energético.
- Aplicar cálculos de ingeniería para el dimensionamiento del proceso de aprovechamiento energético.
- Validar a través de un software la factibilidad técnica y económica del proyecto.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes investigativos

Roca Pérez & otros en su artículo “Aprovechamiento de residuos orgánicos en distintos cultivos de Ecuador” (2017) (Roca Pérez , et al., 2017) que el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados por la agricultura constituye un aspecto básico a considerar para mejorar la viabilidad económica, el medioambiente y el propio sistema productivo en el Ecuador. El principal residuo generado por el cultivo del arroz en el campo es la paja (tallos y hojas de la planta), mientras que la cascarilla es el residuo agroindustrial generado en el proceso de limpieza, tamizado y molienda del grano, la ceniza de la cáscara del arroz se ha empleado como sustituto del cemento y en la preparación de pigmentos para los esmaltes cerámicos, en contraste la biomasa generada por la paja de arroz y la cascarilla se ha utilizado para la obtención de energía por distintos métodos como la combustión directa, gasificación, pirólisis o digestión anaerobia con el propósito de la obtención de metano o hidrógeno y producción de bioetanol mediante fermentación.

En el artículo de Baratieri & otros “El uso de gas de síntesis de biomasa en motores de combustión interna y plantas CCGT: un análisis comparativo” (Baratieri , et al., 2009) menciona que la biomasa ha recibido una atención considerable como un sustituto potencial de los combustibles fósiles en la generación de calor y energía, ya que permite reducir el impacto ambiental y ofrece una solución interesante para la eliminación de desechos además de que los estudios sobre el acoplamiento innovador entre la gasificación de biomasa y las pilas de combustible son varios, mientras que los trabajos sobre el acoplamiento con generadores de energía tradicionales, como motores IC y turbinas de gas, son relativamente escasos. En conclusión, han podido demostrar que la planta CCGT tiene la mejor eficiencia eléctrica (alrededor del 40%) y la mínima producción de energía térmica. Por otro lado, la configuración del motor IC se caracteriza por una importante fracción de energía térmica, que, en caso de ser explotada, permite alcanzar eficiencias energéticas globales superiores al 70%. Esta fracción de energía se libera a altas temperaturas en la línea de gas de síntesis y en la salida de escape del quemador dado que la mayor parte del calor se recupera de los escapes (a temperaturas más bajas), sería especialmente beneficioso aprovecharlo para alimentar una red de plantas de calefacción urbana. .

“Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso” (Lesme-Jaén , et al., 2016) menciona que de los procesos de conversión térmica de la biomasa la gasificación presenta grandes perspectivas, ya que ofrece entre otras ventajas,

una mayor eficiencia de conversión en comparación con la pirolisis y la combustión. En la práctica la gasificación puede convertir de un 60 % a un 90 % de la energía de la biomasa en energía del gas. El gas se produce en un reactor (gasificador), sus características dependen fundamentalmente del tipo de biomasa utilizada y del rango de potencia eléctrica. Este gas es sometido a un proceso de limpieza y luego suministrado al motor de combustión interna. Para la generación de electricidad a pequeña (< 1MW) los reactores más utilizados son los gasificadores downdraft, ellos son capaces de garantizar los requerimientos de calidad del gas a suministrar al motor.

En el trabajo de titulación de Echeverría y López titulado “Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica” (Echeverría Cruz & López Mena , 2010) concluyen que para abastecer la demanda de energía de las viviendas que no disponen de servicio eléctrico en el cantón Samborondón es necesario generar 1 MW de potencia desde una central termoeléctrica, que consume 1800 kg/h de cascarilla de arroz, lo cual producirá 8.3 T/h de vapor, considerando que a la salida de la caldera se tiene vapor sobrecalentado a una temperatura de 300°C y 1 MPa de presión, por lo cual en un año se debe emplear cerca de 13.200 TM de cascarilla, sin embargo la cascarilla disponible es aproximadamente 11.700 TM; por lo tanto existe un déficit del 11%, para ello se debe recolectar y transportar la cascarilla de arroz desde cantones vecinos para garantizar un abastecimiento sustentable de biomasa durante todo el año, lo cual implicará mayores costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. Por tanto, es de suma importancia la cuantificación de la cascarilla de arroz para determinar la producción neta de energía desde una central térmica.

2.2. Referencias Teóricas

2.2.1. Biomasa

Se define biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales (Roca Pérez , et al., 2017). Existen numerosas clasificaciones de biomasa, pero las más aceptadas, y fundamentadas en su composición, origen, y estado, son las que se reflejan en la ilustración 1.

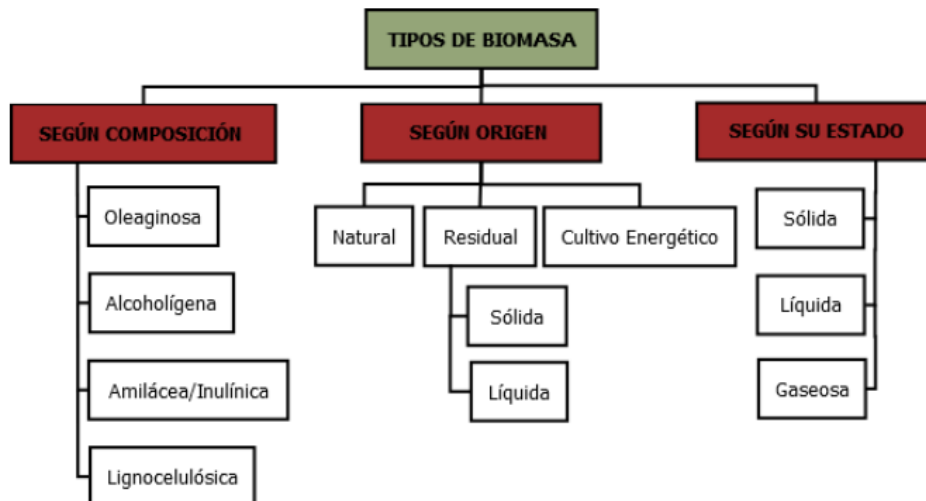


Ilustración 2-1: Tipos de biomasa según diferentes clasificaciones

Fuente: (Roca Pérez , et al., 2017)

La biomasa constituye el primer combustible utilizado por la humanidad .Actualmente en países en desarrollo el 90% de la energía total es proporcionado por la quema de biomasa (madera, carbón, residuos de cosechas y animales). El componente energético de la biomasa se origina por el proceso de fotosíntesis, al transformar la energía solar en materia orgánica, la cual debido a su composición química presenta un alto poder calorífico. Además, no existen emisiones adicionales de dióxido de carbono por combustión de biomasa, debido a que el CO₂ absorbido de la atmosfera por las plantas a través de la fotosíntesis, al ser la biomasa combustionada, es liberado nuevamente completándose el ciclo de carbono. De esta manera no existe emisión adicional de dióxido de carbono como la que se evidencia en la quema de combustibles fósiles (Hoeven , 2022).

En el Ecuador existe un vasto potencial de aprovechamiento de la biomasa como, por ejemplo: Desechos forestales y agrícolas (banano, cascarilla de arroz, bagazo de la caña de azúcar, flores, ganado, mataderos, palmito, entre otros), desechos sólidos urbanos, residuos industriales (Industria conservera, Industrias ligadas a los frutos secos, Industrias extractoras de aceites de semillas, Industrias de elaboración de alcoholes etílicos, Industria cervecera, entre otras)

2.2.2. Caracterización físico química de la cascarilla de arroz.

La cascarilla de arroz es la capa más externa del grano de arroz que se separa de los granos de arroz durante el proceso de molienda. Diversos autores coinciden que la cascarilla de arroz contiene en su estructura alrededor de 35 a 40% de celulosa, 15 a 20% de hemicelulosa y 20 a 25% de lignina (Gao, et al., 2018).

Entre sus características fisicoquímicas se menciona la densidad de 1125 kg/m³, con un poder calorífico de 1 kg de cascarilla de arroz de 3300 kcal, 6,62% de humedad y un área superficial de 272,50 m²/g.

La cascarilla del arroz durante el crecimiento representa baja densidad y gran volumen. Las capas de la cascarilla de arroz son de cuatro tipos: estructurales, fibrosas, esponjosas o celulares. La fracción inorgánica contiene entre un 95% y un 98% en peso de sílice hidratada amorfa en promedio (Fernandes , et al., 2016) .



Ilustración 2-2: Estructura del grano de arroz y cascarilla de arroz.

Fuente: (García Suárez, et al., 2012)

2.2.2.1. Características físicas

La cascarilla de arroz toma la forma del grano cariósido y su dimensión es variada por las numerosas variedades que existen, estas fluctúan en longitud de 4-14 mm, en ancho 2-4 mm, y un espesor promedio de 50µm.

A simple vista tiene una apariencia uniforme en la superficie exterior, pero al observarse al microscopio se aprecia una superficie rugosa con crestitas a diferencia de la interior que es lisa, como se ve en la ilustración 3-2, esto influye para que el aire quede atrapado en los intersticios exteriores e influya en la humedad de la cáscara.

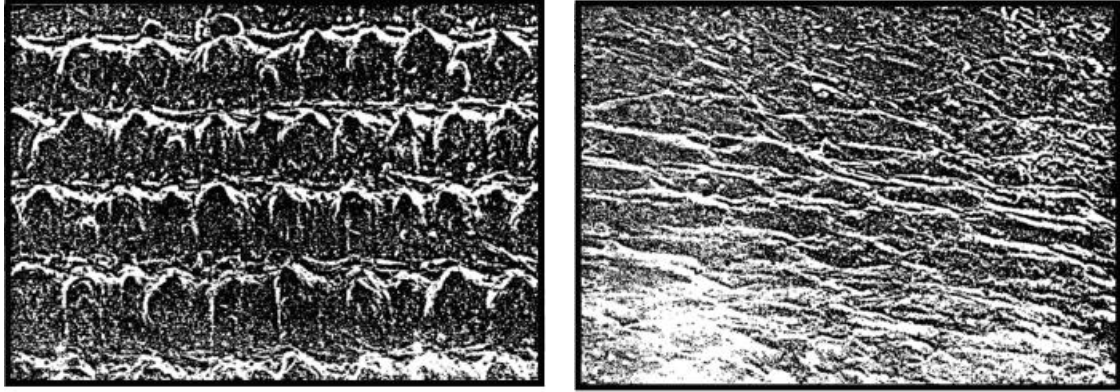


Ilustración 2-3: Superficie exterior (izquierda) e interior (derecha) de la cascarilla vista al microscopio (X 500)

Fuente: (Diaz , 1991)

- **Peso**

El peso (W) de un objeto en la tierra se define como la fuerza que actúa sobre el objeto debido a la gravedad de la tierra. Se puede medir con un dinamómetro calibrado y se lee en Newtons [N] (Moro , et al., 2007) .

- **Densidad**

Se refiere a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia o un objeto sólido (ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL, 2011). En la ilustración 4-2 se puede observar una sección del lecho de combustible en sus varias fases y en la ilustración 5-2 sus cuatro fases ya son identificadas completamente.



Ilustración 2-4: Esquema de una camada de cascarilla.

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

- a) La fase β tiene un volumen V_{β} , representa los espacios vacíos entre las cascarillas sueltas, son tratados como material no poroso.

- b) La fase α tiene un volumen V_{α} , es la region de a materia solida de la cascarilla de arroz más los poros internos y externos
- c) La fase γ tiene un volumen V_{γ} , es el total del volumen de los poros internos y externos de la cascarilla de arroz
- d) La fase σ representa verdaderamente el paste solido de la cascarilla de arroz.

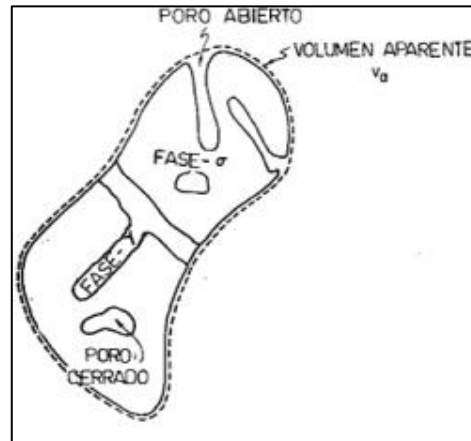


Ilustración 2-5: Cascarilla de arroz con poros internos y externos.

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Con estas fases diferenciadas se pueden definir fácilmente que para el caso de la cascarilla de arroz existen tres tipos de densidades, dependiendo del análisis que se realice a una misma muestra, de esa manera tenemos:

- **Densidad a granel o en masa**

La densidad a granel o en masa, es el valor que se tiene si se relaciona una cantidad de masa con un volumen determinado, el cual incluye la cascarilla, el espacio comprendido entre ellas y los poros internos y externos de la misma. Los factores que influyen en la densidad a granel son: sus diversos tamaños, el contenido de humedad y su grado de compactibilidad.

- **Densidad aparente**

Se obtiene si al volumen antes mencionado se le restan los espacios libres presentes en la camada.

- **Densidad verdadera**

Es la cantidad que resulta si al volumen de la materia sólida se le excluyen todos los poros internos y externos en la cascarilla.

- **Porosidad**

Los combustibles biomásico son medios porosos constituidos por:

- El combustible propiamente dicho, es decir, la fase sólida.
- El aire contenido en sus poros interiores y en los espacios intergranulares que se forman en el lecho.

Esta cantidad de aire se conoce como porosidad (E) y se considera entre el 30% - 40% de la masa total o volumen total del lecho.

La descomposición térmica, reducción de CO₂, reactividad, resquebrajamiento y el potencial de hollín son funciones principalmente de la composición química de la cascarilla de arroz, y el total de espacios disponibles para el oxígeno en el proceso de combustión. Si se compacta la cascarilla como pellets o briqueta (Ilustración 6-2), los espacios vacíos se reducen dificultando el intercambio con el oxígeno suministrado. Esto tiende a generar manchas incandescentes, de esta forma se podría crear una camada densa de combustible en la zona de reducción, lo cual permite una mejor reducción de CO₂ que la cascarilla suelta.



Ilustración 2-6: Pacas compactadas de cascarilla de arroz

Fuente: (Arias Ortiz & Meneses Cruz, 2016)

2.2.3. Tipificación de la cascarilla de arroz como combustible sólido.

Se entiende por tipificación de un combustible la caracterización del mismo utilizando ensayos establecidos en las normas internacionales correspondientes. Los datos procedentes de éstos son herramientas básicas en lo que se refiere a la evaluación de cualquier materia prima sólida destinada a la combustión en hogares domésticos o industriales.

En primer lugar, se realiza la selección de la muestra a estudiar y luego por el análisis inmediato y último se puede obtener una buena información general de la bondad del producto a usar. Así, por medio del análisis inmediato o aproximado nos da una idea del porcentaje por masa de la

humedad, cenizas, materias volátiles, carbón fijo y también el poder calorífico; a través del análisis último o elemental se determina los porcentajes de elementos químicos presentes por métodos analíticos directos.

- **Muestreo**

La representatividad de una muestra, permite extrapolar y por ende generalizar los resultados observados en ésta, a la población accesible (conjunto de sujetos que pertenecen a la población blanco, que están disponibles para la investigación); y a partir de ésta, a la población blanco. Es así como el análisis de una muestra permite realizar inferencias, extrapolar o generalizar conclusiones a la población blanco con un alto grado de certeza (Otzen & Manterola , 2017).



Ilustración 2-7: Pila de cascarilla de arroz.

Realizado por: Castro,Daniela,2023

Para ello, es fundamental, entre otras cosas definir los criterios de inclusión (características clínicas, demográficas, temporales y geográficas de los sujetos que componen la población a estudio) y de exclusión (características de los sujetos que pueden interferir con la calidad de los datos o la interpretación de los resultados (Arias Gómez , et al., 2016).

2.2.4.Análisis Aproximado

Esta práctica cubre la determinación de humedad, materia volátil y cenizas y el cálculo de carbono fijo en carbones y coques muestreados y preparados mediante métodos prescritos y analizados de acuerdo con los procedimientos establecidos por ASTM (ASTM Internacional, s.f.).

2.2.4.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como un porcentaje del peso. Para combustibles de biomasa, este es el factor más crítico, ya que

determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua, antes de que el calor esté disponible y, por eso, cuanto más alto sea el contenido de humedad, menos poder calorífico (Isem Hidalgo, s.f.).



Ilustración 2-8: Cascarilla de arroz húmedo (izquierda) y seca (derecha).

Fuente: (CONtexto Ganadero , 2016)

2.2.4.2. Porcentaje de cenizas

Este ensayo permite conocer la cantidad de materia inorgánica presentes en estas condiciones de trabajo, es decir el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo del material, corresponde a los residuos minerales que se obtienen luego de la combustión completa de la muestra. En la cascarilla de arroz, la masa de la ceniza en su mayor porcentaje es sílice.



Ilustración 2-9: Cenizas de cascarilla.

Fuente: (Etsy, s.f.)

2.2.4.3. Porcentaje de material volátil

Permite estimar la cantidad de compuestos volátiles que evolucionan en las condiciones de este ensayo. La materia volátil es la pérdida de masa que sufre una muestra, cuando se sujeta a pruebas de temperaturas normalizadas en ausencia de aire (atmósfera inerte). Esta masa pérdida está formada por vapor de agua, hidrocarburos condensables, gases no condensables, etc. Para determinar los volátiles se emplea una mufla donde se calcina la muestra (Echeverría Cruz & López Mena , 2010).



Ilustración 2-10: Mufla de laboratorio.

Fuente: (TP-Laboratorio Químico , s.f.)

2.2.4.4. Porcentaje de carbono fijo

Su interés consiste en que esta cantidad representa aquellos compuestos que no son volatizados en las condiciones de C, es decir el carbono fijo es la cantidad de masa efectiva que puede quemarse como combustible después que ha ocurrido la salida de los volátiles. En general, el carbono fijo representa que proporción de combustible puede ser quemado en estado sólido, aunque también se produce en forma gaseosa como elemento formador de las moléculas de CO, CO₂, y otros (Echeverría Cruz & López Mena , 2010).

2.2.5. Análisis elemental

De aplicación aproximada a gases, líquidos y sólidos, consiste en una serie de ensayos a partir de los cuales se obtiene el porcentaje principal (porcentaje en masa) de los elementos químicos que componen la sustancia combustible, en los que se determina el carbono, el hidrógeno y el azufre. por combustión, el nitrógeno es igual a Kjeldahl y el oxígeno por diferencia, ya que no existe un método satisfactorio para la determinación directa del oxígeno. El porcentaje de oxígeno encontrado de esta manera puede estar sujeto a errores que se han cometido en otras determinaciones, y en particular debido a la variación de masa experimentada por los minerales formadores de cenizas durante la combustión. (ASTM, 2002).

Otros elementos presentes también pueden determinarse mediante métodos directos y analíticos, pero por definición no se incluyen en el análisis final, por ejemplo, los halógenos, si el material se considera inflamable y contiene halógenos, se descartan, ya que los resultados generalmente se expresan en una muestra seca y ceniza. Base libre, lo que significa más que la materia orgánica seca total. Se utilizan principalmente para calcular y dar una idea de la reactividad de un combustible utilizando la relación de hidrocarburos (H/C) y oxígeno-carbonos (O/C) (Echeverría Cruz & López Mena , 2010).

2.2.6. Poder calorífico

El poder calorífico también denominado valor calorífico, constituye la cantidad de calor que se desprende en la combustión completamente una cantidad de masa unitaria de combustible sólido o líquido. Se compone de calor de combustión más el calor de vaporización del agua que se forma en el proceso, así como la que ya contenía previamente. El vapor de agua presente entre los productos de la combustión depende de la temperatura de los mismos, de tal manera que puede permanecer como vapor, puede condensar parcialmente o condensar completamente. Como el vapor al condensar libera calor, mientras más condensado se forme mayor calor se estará obteniendo del combustible. Esto permite diferenciar entre Poder Calorífico Inferior (LHV) y Poder Calorífico Superior (HHV).

- **Poder calorífico superior**

Indica la cantidad de calor que puede proporcionar el combustible cuando toda el agua en los productos permanece como vapor, los gases de combustión no se enfrían, debido a la temperatura alta de escape de estos.



Ilustración 2-11: Interpretación gráfica del poder calorífico superior (HHV)

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

- **Poder calorífico inferior**

El Poder Calorífico Superior refleja el calor que puede liberar el combustible cuando toda el agua en los productos condensa por enfriamiento.

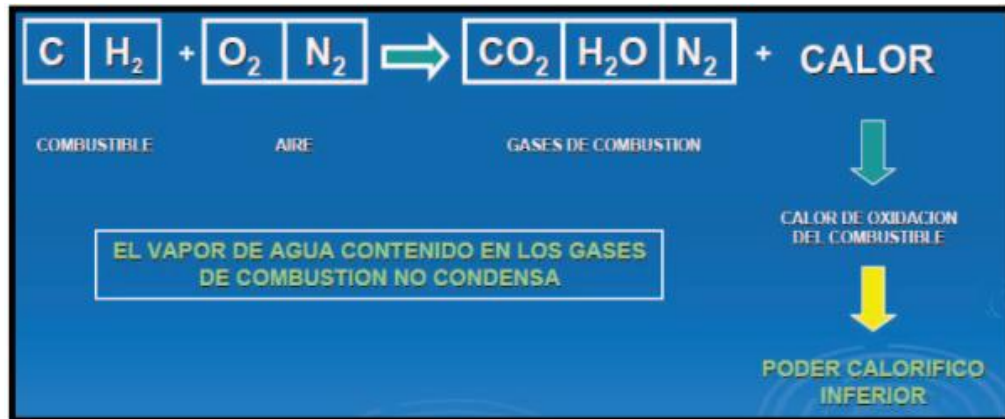


Ilustración 2-12: Interpretación gráfica del poder calorífico inferior (LHV)

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

a) Método Experimental (Bomba Calorimétrica).

La bomba calorimétrica se utiliza para determinar el poder calorífico del combustible quemado durante el proceso adiabático ya volumen constante en condiciones estándar.

- Se coloca de 1 a 1,5 gramos de cascarilla de arroz pulverizada en forma de pastilla en un crisol para combustible dentro de la bomba calorimétrica.
- La bomba calorimétrica se rodea de una camisa de agua que absorberá el calor liberado por el combustible. Todo esto se realiza dentro de una camisa adiabática para evitar fuga de calor que afecte el proceso.

En la ilustración 27-3 se muestra una bomba calorimétrica en la que se puede realizar la prueba.



Ilustración 2-13: Bomba calorimétrica digital (Modelo C2000 Control, Ike Werke)

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

b) Análisis Bromatológico

Para el contenido calórico en el análisis bromatológico, es necesario determinar algunas propiedades químicas de la cascarilla de arroz, como relación de fibra, relación de proteína, porcentaje de grasa y relación de carbohidratos por diferencia, además del porcentaje de humedad y cenizas se determinó en el análisis de aproximación.

La Tabla 12-3 muestra los porcentajes de fibra, proteína y grasa obtenidos en estudios realizados en cascarilla de arroz tanto en PRONACA como en AGROCALIDAD.

Tabla 2-1: Características Químicas de la Cascarilla de Arroz

Parámetros	Laboratorios		Promedio
	Pronaca	Agrocalidad	
% Humedad	8,41	6,40	7,41
% Ceniza	14,83	23,94	19,39
% Fibra (Celulosa)	32,02	58,74	45,38
% Proteínas	2,59	4,58	3,59
% Extracto con éter (Grasa)	0,20	0,59	0,40
% Carbohidratos Totales	73,97	64,49	69,23
Poder Calórico (MJ/KG)	12,89	11,79	12,04

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro, Daniela, 2023

Para calcular de del valor calorífico se emplea la siguiente ecuación:

$$HV \left(\frac{kcal}{100g} \right) = A + B + C$$

Ecuación 1-3.

Donde:

A = 4 kilocalorías * % Carbohidratos totales

B = 9 kilocalorías * % Grasa (Extracto Etéreo)

C = 4 kilocalorías * % Proteína

$$A = 4 \text{ kilocalorías} * 73,97 = 295,88 \text{ Kcal.}$$

$$B = 9 \text{ kilocalorías} * 0,20 = 1,80 \text{ Kcal.}$$

$$C = 4 \text{ kilocalorías} * 2,59 = 10,36 \text{ Kcal}$$

$$HV = 295,88 + 180 + 10,36 = 308,04 \frac{Kcal}{100g} * \frac{1000g}{1 Kg} = 3080,4 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$HV = 3080,4 \frac{Kcal}{Kg} = 12,89 \frac{MJ}{Kg}$$

$$HV = 12,9 \frac{MJ}{Kg}$$

2.2.7. Gasificación

Es un proceso termoquímico que convierte la biomasa sólida en un gas combustible bajo condiciones de alta temperatura y en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua, etc). Dependiendo del tipo de agente gasificante se obtienen diferentes calidades de gases. Si es aire se logra gas pobre y si es oxígeno se obtiene gas rico, con mayor poder calorífico, con independencia de que el lecho sea fluidizado o móvil, en sus variantes, la biomasa pasa por:

- Una primera etapa de calentamiento hasta 100 °C, que provoca el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en la misma, y que absorbe el calor sensible para elevar la temperatura, además del necesario para la evaporación del agua;
- La segunda etapa, que también absorbe calor, es la de pirólisis (ruptura por calor), en la que se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras de cadena más corta que, a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa;
- En los reactores “updraft” la tercera etapa es la reducción, por combinación del vapor de agua producido en la primera etapa, con el dióxido de carbono que viene arrastrado por la corriente del gasificante, desde la cuarta etapa (oxidación);
- La última etapa es la oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua). Siguiendo la reacción en el sentido del agente gasificante, las etapas son:
 - Oxidación parcial del residuo carbonoso y caliente de la biomasa, elevando mucho su temperatura, ya que las reacciones de oxidación son exotérmicas;
 - En la zona de reducción, la falta de oxígeno unida a la disponibilidad de carbono, CO₂ y vapor de agua, hace que se produzca una recombinación hacia hidrógeno molecular y monóxido de carbono;
 - La tercera etapa en el sentido del gas es el pirólisis en la que, por efecto del calor, los componentes más ligeros de la biomasa se rompen y convierten en gas, uniéndose a la corriente;
 - Por último, los gases calientes evaporan el agua contenida en la biomasa entrante.

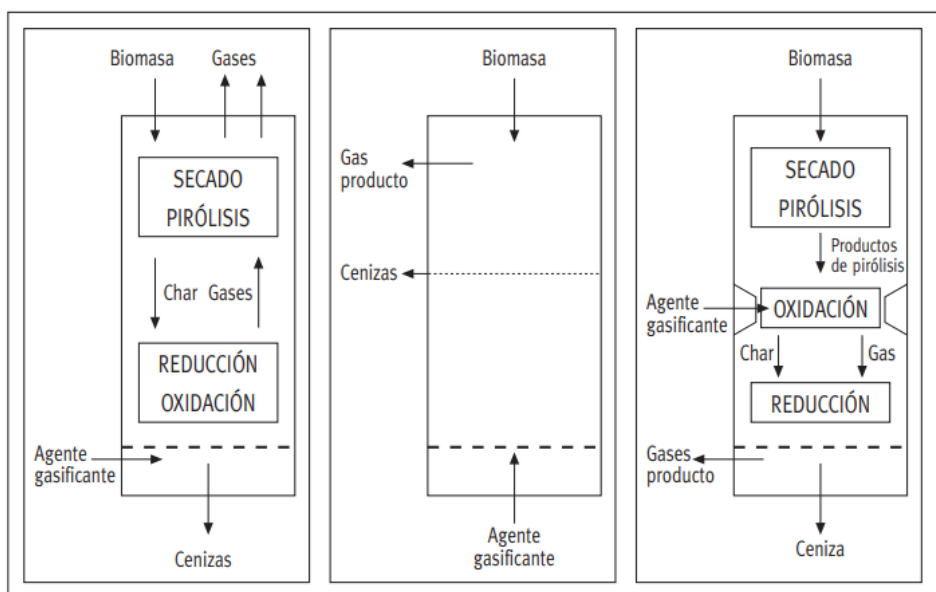


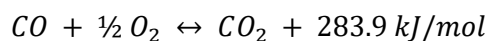
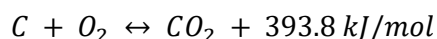
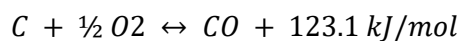
Ilustración 2-14: Esquemas de funcionamiento de gasificadores updraft, lecho fluidizado y downdraft (de izquierda a derecha)

Fuente: (IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, ES, 2007)

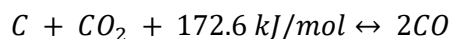
2.2.8. Reacciones de gasificación

Las reacciones químicas importantes que tienen lugar en el gasificador pueden resumirse como:

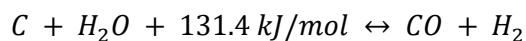
- **Reacciones de oxidación:**



- **Reacción de Bourdouard:**



- **Reacción agua-gas:**



- **Reacción de metanación:**

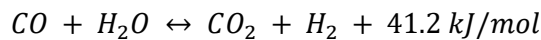


Las reacciones de oxidación son exotérmicas y proporcionan, por gasificación autotérmica, el calor necesario para las reacciones endotérmicas en las zonas de secado, pirólisis y reducción. La última de las reacciones de oxidación presentadas también produce calor, lo cual es beneficioso para el proceso de gasificación, pero no es deseable porque reduce el poder calorífico del gas productor.

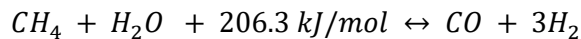
Las reacciones de reducción más importantes son la reacción agua-gas y la reacción de Bourdourd. Estas reacciones endotérmicas heterogéneas aumentan el volumen de gas de CO y H₂, a mayor temperaturas y presiones más bajas (una presión alta suprime el volumen de gases). Además de estas reacciones, también se tienen lugar otras reacciones de reducción, de las cuales la más importante es la reacción de metanación.

Las reacciones presentadas anteriormente (Ecuación 1-2 a 6-2) son reacciones heterogéneas, y las siguientes dos ecuaciones (Ecuación 7-2 y 8-2) presentan las reacciones homogéneas que se pueden obtener restando la reacción de Bourdourd de la reacción de agua-gas y restando la reacción de agua-gas de la reacción de metanación.

- **Reacción de metanación**



- **Reacción de reformado de metano**



En la práctica, la composición de equilibrio del gas sólo se alcanzará en los casos en que la velocidad de reacción y el tiempo de reacción sean suficientes. El equilibrio de cambio de gas de agua determina en gran medida la composición final del gas y depende de la temperatura. La velocidad de reacción disminuye con la caída de la temperatura por debajo de los 700 °C, la reacción de cambio de agua y gas procede tan lentamente que se dice que la composición del gas producto está “congelada”.

Una vez formados, los productos gaseosos ya no reaccionan entre sí. En los gasificadores de lecho fluidizado y de flujo arrastrado, todas las reacciones anteriores ocurren simultáneamente, además de las reacciones de descomposición primaria.

Se pueden producir tres calidades de gas producto a partir de la gasificación variando el agente gasificante, el método de operación y las condiciones de operación del proceso.

CV bajo	4-6 MJ/Nm ³	Uso de aire y vapor/aire
CV medio	12-18 MJ/Nm ³	Uso de oxígeno y vapor.
CV alto	40 MJ/Nm ³	Uso de hidrógeno e hidrogenación.

El gas de bajo poder calorífico se utiliza directamente en la combustión o en un combustible de motor, mientras que los gases de poder calorífico medio/alto se pueden utilizar como materia prima para su posterior conversión en productos químicos básicos, principalmente metano y metanol. Como el uso de oxígeno para la gasificación es caro, normalmente se utiliza aire para

procesos de hasta unos 50 MWth. La desventaja es que el nitrógeno introducido con el aire diluye el gas producto (Puig Arnavat , 2011)

2.2.9. Determinación de las variables del diseño

Para determinar las variables del diseño del proceso de aprovechamiento energético de la biomasa de la cascarilla de arroz, las características de la materia prima tienen un efecto significativo en el rendimiento del gasificador, especialmente las siguientes:

- **Contenido de humedad:** El combustible (biomasa) con un contenido de humedad superior al 30% dificulta la ignición y reduce el CV del gas producto debido a la necesidad de evaporar la humedad adicional antes de que pueda ocurrir la combustión/gasificación. El alto contenido de humedad reduce la temperatura alcanzada en la zona de oxidación, dando como resultado el craqueo incompleto de los hidrocarburos liberados de la zona de pirólisis.

El aumento de los niveles de humedad y la presencia de CO producen H₂ por la reacción de cambio de gas de agua y, a su vez, el mayor contenido de H₂ del gas produce más CH₄ por hidrogenación directa. Sin embargo, la ganancia de H₂ y CH₄ del gas producto no compensa la pérdida de energía debida al contenido reducido de CO del gas y, por lo tanto, da un gas producto con un CV más bajo.

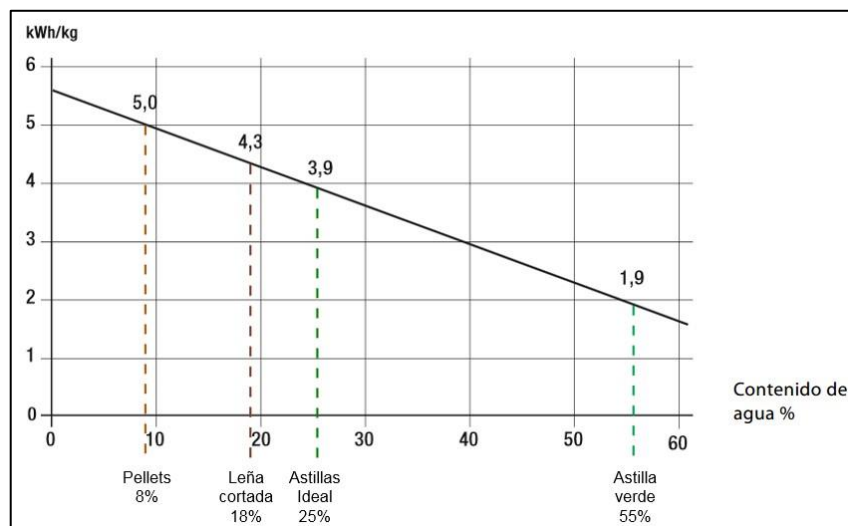


Ilustración 2-15: Relación entre el contenido del agua (%) y la producción energética (kW) de diferentes biomásas

Fuente: (Hargassner, 2015)

- **Contenido de cenizas:** Un alto contenido de materia mineral puede imposibilitar la gasificación debido a que la temperatura de oxidación suele estar por encima del punto de fusión de la ceniza de biomasa, lo que genera problemas de formación de clinker/escoria y los consiguientes bloqueos en la alimentación. El clínker es un problema para los contenidos

de ceniza por encima del 5 %, especialmente si la ceniza tiene un alto contenido de óxidos y sales alcalinos, lo que produce mezclas eutécticas con puntos de fusión bajos.

- **Composición elemental:** La composición elemental del combustible es importante con respecto al poder calorífico y los niveles de emisión en casi todas las aplicaciones.

La producción de compuestos de nitrógeno y azufre es generalmente pequeña en la gasificación de biomasa debido al bajo contenido de nitrógeno y azufre inicial.

Tabla 2-2: Composición elemental de biomazas en base seca y en porcentaje en peso (%).

Material (b.s)	Fuente	C	H	O	N	S	Cenizas
Madera	Zainal et al, 2001	50,0	6,0	44,0	-	-	-
Cascarilla de arroz		38,5	5,7	39,8	0,5	0	15,5
Papel		43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0
Residuos municipales		47,6	6,0	32,9	1,2	0,3	12,0
Residuos Sólidos	Jarunghammachote and Dutta, 2007	51,0	6,7	39,2	2,6	0,4	-
Madera de caucho	Jayah et al, 2003	50,6	6,5	42	0,2	-	0,7
Astillas de madera	Barrio M, 2002	50,7	6,9	42,4	<0,3	-	0,3

Realizado por: Castro, Daniela, 2023.

- **Poder calorífico:** El poder calorífico está determinado por la composición elemental, el contenido de cenizas de la biomasa y, en particular, por el contenido de humedad del combustible.

Sobre una base seca y libre de cenizas, la mayoría de las especies de biomasa tienen un poder calorífico de alrededor de 19 MJ/kg.

Tabla 2-3: Base seca y libre de cenizas

Fuente	Materia	HHV(kJ/kmol)
Zainal et al, 2001	Madera	449 568
	Cascarilla de arroz	402 133
	Papel	454 864
	Residuos municipales	433 034

Realizado por: Castro, Daniela, 2023

- **Compuestos volátiles:** Además de las condiciones de operación, diseños de reactores, etc. la cantidad de volátiles tiene un impacto en los niveles de producción de alquitrán en los gasificadores. El gasificador debe estar diseñado para destruir los alquitranes y los hidrocarburos pesados liberados durante la etapa de pirólisis del proceso de gasificación.
- **Densidad aparente y morfología:** La densidad aparente se refiere al peso del material por unidad de volumen. La biomasa de baja densidad aparente es costosa de manejar, transportar y almacenar. El tamaño de partícula del material de alimentación depende de las dimensiones de la chimenea, pero normalmente es del 10 al 20 % del diámetro de la chimenea. Las partículas más grandes pueden formar puentes que evitan que la alimentación se mueva hacia abajo, mientras que las partículas más pequeñas tienden a obstruir el vacío de aire disponible, lo que provoca una gran caída de presión y la consiguiente parada del gasificador.

Se requiere un pretratamiento y preparación de materia prima para casi todos los tipos de materiales de biomasa debido a una gran variedad de características físicas, químicas y morfológicas. El grado de pretratamiento de la materia prima de biomasa depende de la tecnología de gasificación utilizada y los requisitos de combustible para diferentes tipos de gasificadores son presentado en la tabla 1-2.

Tabla 2-4: Requerimientos de combustible versus diseño de gasificador.

Tipo de gasificador Propiedades	Downcraft	Updraft	Cama fluida	Flujo arrastrado
Tamaño (mm)	20-100	5-100	10-100	< 1
Contenido de humedad (% b.h)	< 1520	< 50	< 40	< 15
Contenido de cenizas (% b.s.)	< 5	< 15	< 20	< 20
Morfología	Uniforme	Casi uniforme	Uniforme	Uniforme
Densidad aparente (kg/m ³)	> 500	> 400	> 100	> 400
Punto de fusión de la ceniza (°C)	> 1250	> 1000	> 1000	> 1250

Fuente: (Knoef, 2005)

Realizado por: Castro, Daniela, 2023.

2.2.10. Syngas

El gas de síntesis o sintegás (syngas, en inglés) es un combustible gaseoso obtenido a partir de sustancias ricas en carbono (hulla, carbón, coque, nafta, biomasa) sometidas a un proceso químico a alta temperatura. Contiene cantidades variables de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2). En la ilustración 13-2 se muestran las principales aplicaciones del gas de síntesis, siendo la producción de amoníaco la aplicación más demandada, seguida en segundo lugar por el hidrógeno para las refinerías y, en tercer lugar, por la producción de metanol. Los productos derivados del

gas de síntesis pueden buscar uno de sus dos componentes principales o ambos: el hidrógeno y el monóxido de carbono. En el caso de la síntesis del amoníaco, se busca un gas de síntesis rico en hidrógeno, de hecho, de todo el hidrógeno producido, alrededor del 70% se emplea en la síntesis de amoníaco y el 30% restante se utiliza en los procesos de hidrotratamiento que se llevan a cabo en las refinerías

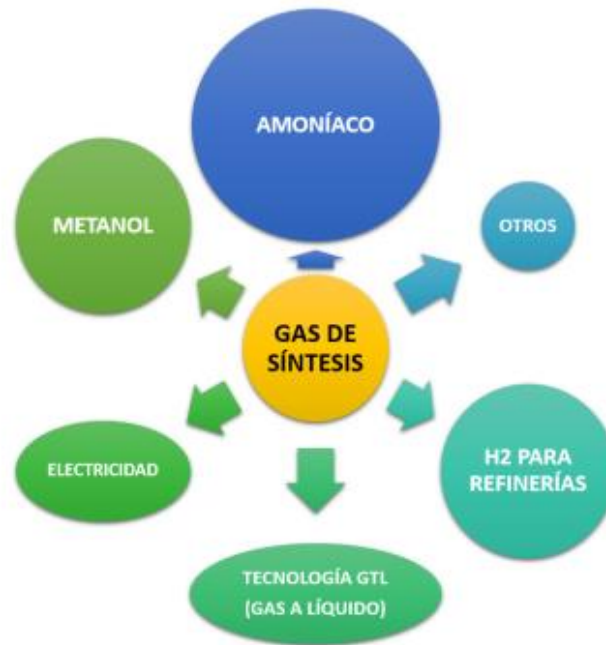


Ilustración 2-16: Aplicaciones del gas de síntesis

Realizado por: Castro, Daniela, 2023

2.2.10.1. Utilización y pretratamientos del gas de síntesis

El Syngas tiene muchos usos que van desde aplicaciones de calor o energía como IGCC hasta una variedad de combustibles sintéticos como se muestra a continuación (Ilustración 14-2), con tales aplicaciones, cada contaminante crea peligros específicos en las actividades posteriores. Estos incluyen ineficiencia del proceso, corrosión y obstrucciones de tuberías, así como fallas catastróficas, como la desactivación rápida y permanente de catalizadores (Woolcock & Brown, 2013).

Existe una multitud de tecnologías para purificar la corriente de gas de síntesis en bruto que se produce mediante la gasificación, algunos métodos son capaces de eliminar varios contaminantes en un solo proceso, como el lavado húmedo, mientras que otros se centran en la eliminación de un solo contaminante.

El gas de síntesis debe estar relativamente purificado de los contaminantes, específicamente partículas, alquitrán, H₂S, NH₃, formaciones alcalinas, haluros y trazas de contaminantes. Existen

numerosos procesos disponibles para proporcionar una corriente de gas de síntesis de H_2 y CO relativamente limpia. Estas tecnologías se pueden clasificar aproximadamente en tres regímenes según su temperatura operativa: limpieza de gas caliente (HGC), limpieza de gas frío (CGC) y limpieza de gas caliente (WGC).

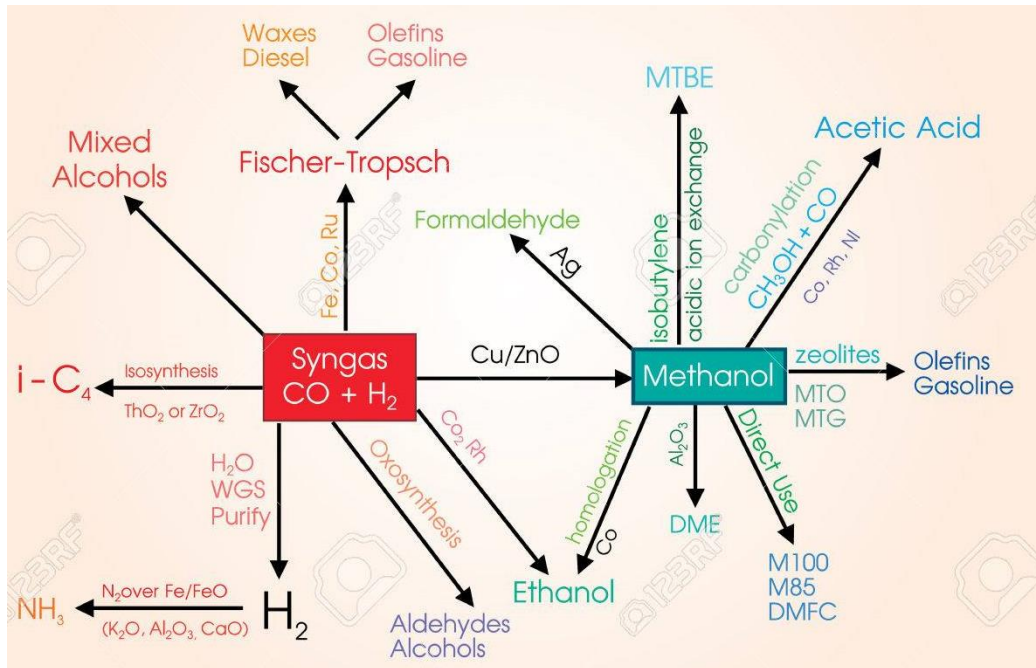


Ilustración 2-17: Tecnologías de conversión de gas de síntesis

Fuente: (Spath & Dayton , 2003)

El procedimiento HGC ha sido muy importante en los últimos años, especialmente para eliminar compuestos más ligeros por métodos térmicos y catalíticos. Las técnicas térmicas experimentan algunas pérdidas e ineficiencias al elevar la temperatura mediante la combustión parcial de la corriente de gas de síntesis. Por lo tanto, se han centrado investigaciones en superar los desafíos económicos, de desactivación y de coquización asociados con los métodos catalíticos para su uso a temperaturas ligeramente más bajas. La eliminación de azufre a altas temperaturas se realiza principalmente mediante adsorción con una variedad de adsorbentes sólidos.

Estos métodos pueden proporcionar ganancias en la eficiencia térmica, la simplicidad del proceso y el potencial de reducción de costos utilizando sorbentes regenerables, pero superar las pérdidas de actividad y aumentar la vida útil del sorbente sigue siendo un desafío.

El método de CGC es un área más investigada de limpieza de gas y normalmente utiliza absorción de agua o líquido para eliminar contaminantes, los depuradores húmedos son quizás los más comunes y son efectivos para eliminar casi todos los contaminantes. El azufre también ha sido un enfoque principal de CGC, y se han empleado tecnologías a nivel mundial que también recuperan

el azufre como subproducto. Las desventajas de la depuración de azufre CGC convencional han llevado a intentar combinar enfoques químicos rápidos y robustos con la rentabilidad de las aplicaciones biológicas.

En contraste, el WGC se está volviendo cada vez más importante con respecto a la eliminación de alquitrán y cloro, una nueva técnica de lavado a base de aceite es particularmente prometedora para la eliminación de alquitrán y partículas residuales. Este enfoque puede eliminar el tratamiento problemático de aguas residuales requerido con las técnicas de lavado actuales, al mismo tiempo que captura los componentes valiosos del alquitrán para su uso posterior.

2.2.10.2. *Composición del syngas*

Este gas de síntesis o syngas presenta en su composición H₂ (18-20 %), CO (18-20 %), CO₂ (8-10 %), CH₄ (2-3 %), trazas de hidrocarburos y agua, principalmente.

2.2.10.3. *Proceso para generar syngas*

La obtención del syngas requiere de un proceso de gasificación de la biomasa. Este proceso consiste en una oxidación parcial de la materia prima, mediante oxígeno, aire y/o vapor a una temperatura de 800 °C. Los materiales ideales para someter a este proceso de gasificación son aquellos orgánicos que se biodegradan lentamente:

- Residuos agrícolas y de jardinería, de cultivos herbáceos o leñosos.
- Residuos forestales.
- Combustible derivado de residuos (CDR), obtenido de la fracción resto de residuos municipales.
- Cultivos energéticos, agrícolas o forestales.
- Residuos de la industria agroalimentaria constituidos por compuestos lignocelulósicos (cáscaras de almendra u otros frutos secos, subproductos de la producción de vino o aceite, etc.).

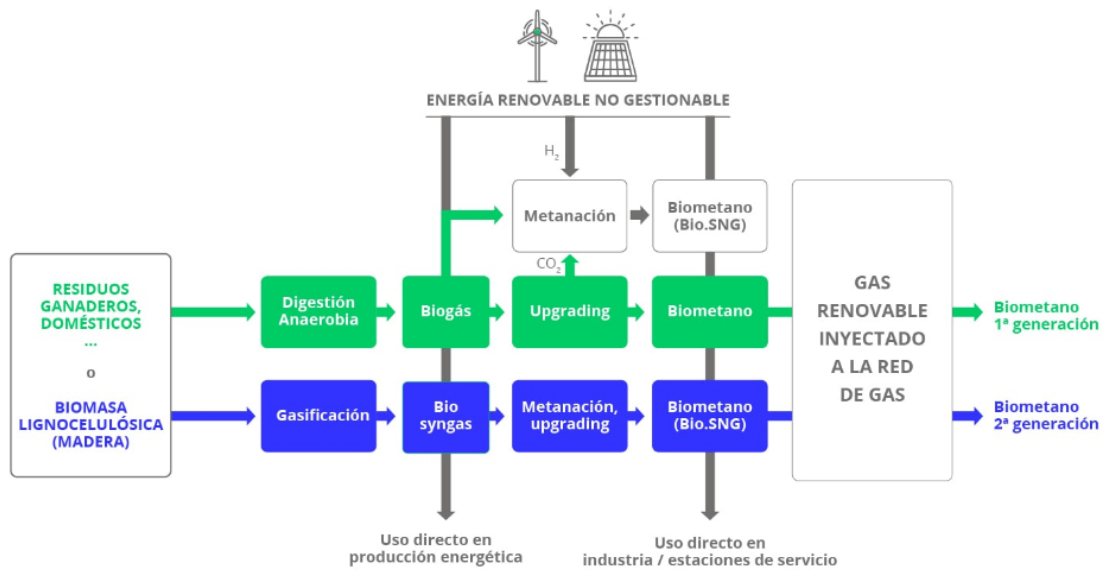


Ilustración 2-18: Flujograma de obtención del gas sintético (Syngas)

Fuente: (Anon., 2020)

2.2.11. Agentes gasificantes

Según el agente gasificante que se emplee se producen efectos distintos en la gasificación, y el syngas, producto final, varía en su composición y poder calorífico. Si se gasifica con aire, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto de la biomasa sufre la reducción. No obstante, el 50% del syngas es nitrógeno y, en términos de poder calorífico, el gas ronda los 5,5 MJ/Nm³. Este syngas es apropiado para motores de combustión interna convencionales, ya que como materia prima para la síntesis del metanol es un gas pobre.

La gasificación con vapor de agua u oxígeno, mejoran el rendimiento global y aumenta la proporción de hidrógeno en el syngas. Es el sistema más adecuado de producir syngas si se desea emplearlo como materia prima para producir metanol o gasolina sintética. Si bien el aire es gratuito y el vapor de agua se produce a partir del calor contenido en el gas de síntesis, el oxígeno tiene un coste energético y económico a tener en cuenta. La utilización de hidrógeno como agente gasificante permite obtener un syngas que puede sustituir al gas natural, pues puede alcanzar un poder calorífico de 30 MJ/kg. No obstante, el hidrógeno es el mejor de los combustibles, susceptible de usarse en cualquier dispositivo termoquímico o electroquímico, por lo que no es muy recomendable como gasificante en el ámbito industrial, excepto en los casos de excedentes de baja pureza, no aptos para otra aplicación como una pila de combustible.

Tabla 2-5: Mezcla de gases obtenida del proceso de gasificación.

Agente gasificante	HHV (MJ/m ³)	Composición del gas obtenido (% en volumen)						Uso
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	<6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3		Combustible gas de síntesis
Vapor de agua	10-20	50	20	22	6	-	2	Combustible gas de síntesis
Hidrógeno	>30							Sustituto del gas natural

Realizado por: CASTRO, Daniela. 2023

Fuente: (Alegria Castellanos, 2017)

2.2.12. Tipos de gasificación: Diseños

Los diseños de reactores se han investigado durante más de un siglo, lo que resultó en la disponibilidad de varios diseños a pequeña y gran escala. Los gasificadores se pueden clasificar de diferentes maneras (Rauch, 2003).

- Según el gasificador: gasificadores de aire, oxígeno o vapor.
- Según el calor para la gasificación: autotérmico (el calor lo proporciona la combustión parcial de la biomasa) o alotérmico (el calor lo proporciona una fuente externa).
- Según presión en el gasificador: atmosférica o presurizada
- Según el diseño del reactor: lecho fijo, lecho fluidizado, flujo arrastrado o lecho gemelo

A pesar de estas clasificaciones, existen cuatro principales tipos de gasificadores en la industria:

- Gasificadores de tiro descendente y de tiro ascendente, que se encuentran en la categoría de lecho fijo
- Gasificadores de lecho fluidizado, que consisten en gasificadores de biomasa de lecho fluidizado burbujeante (BFB) y gasificadores de lecho de biomasa fluidizado circulante (CFB).

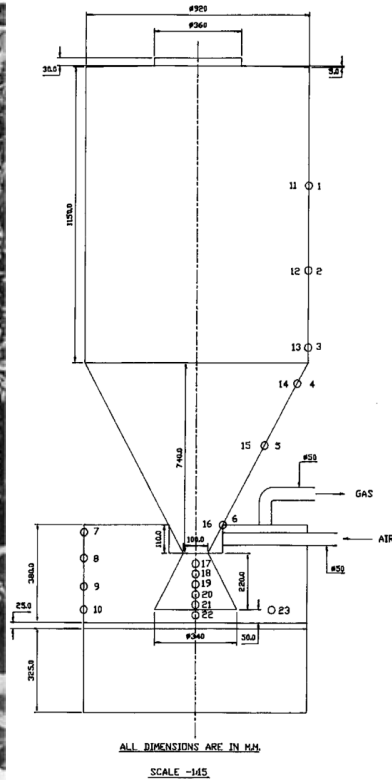
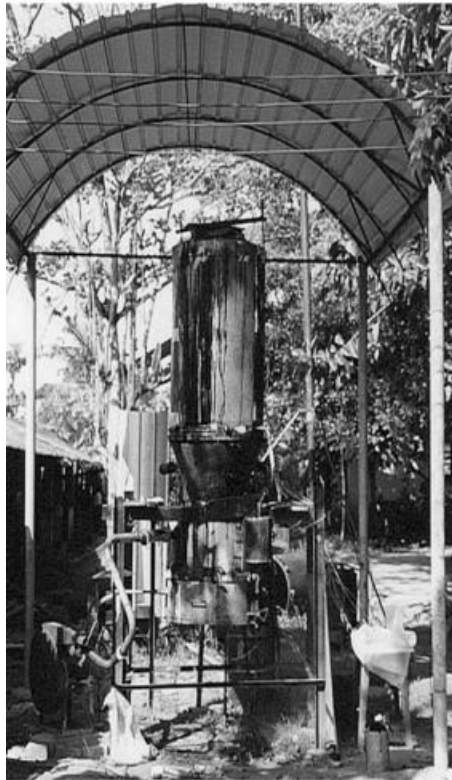


Ilustración 2-19: Gasificador y diagrama esquemático.

Fuente: (Jayah, et al., 2003)

2.2.12.1. *Gasificación en reactores de lecho fijo*

Estos reactores son bastante fáciles de construir y operar y están ampliamente disponibles, especialmente en los países en desarrollo. Son adecuados para aplicaciones a pequeña escala, pero tienen, en general, propiedades limitadas de aumento de escala.

Existen principalmente dos tipos de gasificadores de lecho fijo, dependiendo de si el agente gasificante se alimenta desde la parte superior del reactor, como biomasa (downdraft), o desde el fondo y por tanto a contracorriente del flujo de biomasa (updraft).

- **Gasificador de corriente ascendente (Updraft)**

Este es el tipo más simple de gasificador (Ilustración 17-2). La biomasa se mueve a contracorriente del flujo de gas y pasa por la zona de secado, la zona de pirólisis, la zona de reducción y la zona de oxidación.

Las principales ventajas de este tipo de gasificador son su sencillez, alto consumo de carbón vegetal e intercambio de calor interno que conduce a temperaturas de salida del gas relativamente bajas y altas eficiencias de gasificación. Debido al intercambio de calor interno, el combustible se seca en la parte superior del gasificador y, por lo tanto, se pueden utilizar combustibles con un alto contenido de humedad (hasta un 60 % p.e.). Además, este tipo de gasificador puede incluso

procesar partículas de combustible de tamaño relativamente pequeño y acepta algunos variación de tamaño en la materia prima de combustible.

Los principales inconvenientes son las altas cantidades de alquitrán y productos de pirólisis, porque el gas de pirólisis no se quema. Esto es de menor importancia si el gas se usa para aplicaciones de calor directo, en las que los alquitranes simplemente se queman. En caso de que el gas se utilice para la producción de energía, se requiere una limpieza exhaustiva del gas.

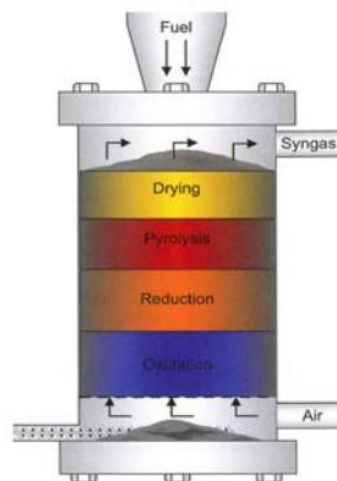


Ilustración 2-20: Diagrama de gasificador de tipo Updraft

Fuente: (Knoef, 2005)

- **Gasificador de tiro descendente (Downdraft)**

En el reactor de tiro descendente (Ilustración 18-2), el combustible y el gas se mueven en la misma dirección. Se pueden distinguir las mismas zonas que en el gasificador de tiro ascendente, aunque el orden es algo diferente.

Los gasificadores de tiro descendente producen el nivel más bajo de alquitrán y, por lo tanto, son la mejor opción para aplicaciones de motores. Sin embargo, la ampliación de escala de este tipo de gasificador es limitada. A bajos niveles de carga, la temperatura disminuye y se producen más alquitranes.

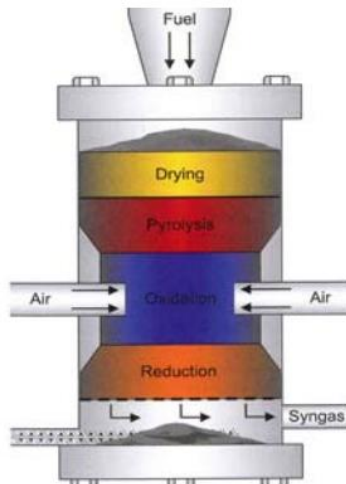


Ilustración 2-21: Tipos de gasificadores

Fuente: (Knoef, 2005)

Otros diseños de gasificadores de lecho fijo son:

- Gasificadores de núcleo abierto especialmente diseñados para gasificar materiales finos de baja densidad aparente, por ejemplo, cascarilla de arroz.
- Gasificador de tiro cruzado (Ilustración 19-2) adaptado para el uso de carbón vegetal que alcanza temperaturas muy altas (1500°C y superiores) en la zona de solera que pueden dar lugar a problemas materiales.
- Gasificador de doble fuego que es una combinación de gasificación de tiro descendente y de tiro ascendente. En la parte superior del gasificador se convierte el combustible mediante tiro descendente, pero se acumula una cierta cantidad de carbón sin reaccionar en la zona de reducción. El propósito de la gasificación de dos zonas es utilizar la gasificación de corriente ascendente para convertir este combustible residual en el área de la parrilla completamente en gas pobre.
- Sistemas de gasificación de lecho fijo por etapas basados en la separación de los procesos parciales de conversión termoquímica (secado, pirólisis, oxidación, reducción) en reactores separados. La separación de los pasos del proceso permite una mayor influencia sobre los pasos parciales.

Algunas características principales de los gasificadores de tiro ascendente, tiro descendente, tiro cruzado y núcleo abierto se presentan en la Tabla 4-2. Debido a la variedad de diseños de gasificadores, que se han desarrollado para cada tipo de gasificador, los datos mencionados son sólo indicaciones aproximadas. La eficiencia de un reactor gasificador se puede expresar sobre la base del gas frío o caliente. La eficiencia del gas frío (η_{CG}) es el contenido de energía química del gas productor dividido por el contenido energético de la biomasa, mientras que la eficiencia del gas caliente (η_{HG}) es el contenido de energía química y térmica del gas productor dividido

por el contenido energético de la biomasa. En reactores bien aislados, la eficiencia del gas caliente puede ser cercana al 100%.

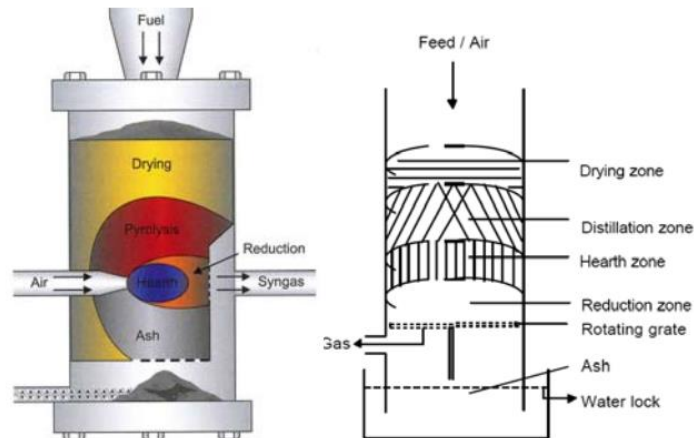


Ilustración 2-22: Gasificador crossdraft (izquierda) y de núcleo abierto (derecha)

Fuente: (Knoef, 2005).

Tabla 2-6: Características de los gasificadores de lecho fijo.

	Downdraft	Updraft	Crossdraft	Núcleo abierto
Combustible (madera)			carbón	
Contenido de humedad % (b.h)	12 (max. 25)	43 (max. 60)	10 – 20	7 – 15 (max.15)
Contenido de cenizas % (b.s)	0.5 (max. 6)	1.4 (max. 25)	0.5 – 1.0	1 – 2 (max. 20)
Tamaño (mm)	20 – 100	5 – 100	5 – 20	1 – 5
Temperatura del gas de salida (°C)	700	200 – 400	1250	250 – 500
Alquitranes (g/Nm ³)	0.015 – 0.5	30 – 150	0.01 – 0.1	2 – 10
Sensibilidad a las fluctuaciones de carga	Sensible	Insensible	Sensible	Insensible
Carga completa	85 – 90	90 – 95	75 – 90	70 – 80
Carga completa	65 – 75	40 – 60	70 – 85	35 – 50
LHV del syngas (MJ/Nm ³)	4.5 – 5.0	5.0 – 6.0	4.0 – 4.5	5.5 – 6.0

Fuente: (Puig Arnavat , 2011)

Realizado por: Castro, Daniela, 2023.

2.2.12.2. Gasificación en reactores de lecho fluidizado

Los reactores de lecho fluidizado funcionan con una mezcla fluidizada de material de lecho y biomasa. El medio de gasificación fluye a través del fondo de la boquilla y fluidifica el material del lecho.

Este puede ser inerte, como por ejemplo arena de cuarzo o también catalíticamente activo con respecto a la conversión de contaminantes orgánicos en el gas bruto a través de posibles reacciones posteriores en las fases gaseosas. Para ello se pueden utilizar sustancias como la dolomita o el olivino. El aire pasa hacia arriba a través del lecho, y cuando el punto donde la caída de presión iguala la fuerza de gravedad de las partículas, las partículas quedan suspendidas y fluidizadas a la velocidad mínima de fluidización. Este es un parámetro importante en el diseño de reactores de lecho fluido. Un mayor aumento de la velocidad del aire hace que las partículas se muevan más y más vigorosamente, asemejándose a un líquido hirviendo.

Debido a la intensa mezcla, las diferentes zonas (secado, pirólisis, oxidación, reducción) no se pueden distinguir como en los gasificadores de lecho fijo; la temperatura es uniforme en todo el lecho. A diferencia de los gasificadores de lecho fijo, la relación aire-biomasa se puede cambiar y, como resultado, se puede controlar la temperatura del lecho, generalmente entre 700 a 900°C. Las ventajas de los reactores de lecho fluidizado en comparación con los reactores de lecho fijo son:

- Construcción compacta debido al alto intercambio de calor y velocidades de reacción debido a la mezcla intensiva en el lecho.
- Flexible a los cambios en las características del combustible, como la humedad y el contenido de cenizas; capacidad para manejar materiales esponjosos y de grano fino con alto contenido de cenizas y/o baja densidad aparente.
- Se permiten puntos de fusión de cenizas relativamente bajos debido a las bajas temperaturas de reacción.

Pero los inconvenientes son:

- Alto contenido de alquitrán y polvo del gas producido.
- Altas temperaturas de los gases productores que contienen metales alcalinos en estado de vapor.
- Quemado de carbono incompleto.
- Operación compleja por la necesidad de controlar el suministro tanto de suministro de aire como de combustible sólido.
- La necesidad de consumo de energía para la compresión de la corriente de gas.

Los principales diseños de reactores de lecho fluidizado son:

- **Lecho fluidizado burbujeante (BFB)**

El gasificador BFB (Ilustración 22-2) es bien conocido y de uso común debido a sus sólidas propiedades. El BFB utiliza la velocidad de fluidización mínima del material del lecho para lograr el estado de fluidización y tiene una interfaz distinta entre el francobordo sobre la superficie del

lecho y la zona de reacción del lecho fluidizado. La producción de alquitrán es de ~ 1% a 2% porque la unidad opera como un reactor térmico agitado continuo, por lo que hay algo de biomasa y barbotina de alquitrán.

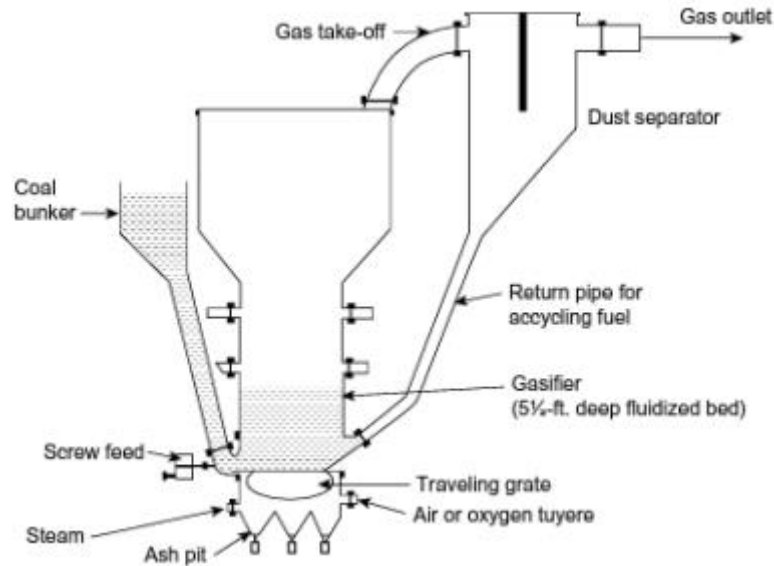


Ilustración 2-23: Esquema de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.

Fuente: (Basu, 2010).

- **Lecho fluidizado circulante (CFB)**

El gasificador CFB (Ilustración 23-2) no tiene una interfaz distinta entre el lecho de arena fluidizado y el francobordo. Utiliza una velocidad superior a la velocidad mínima de fluidización y requiere un separador ciclónico para transportar el material del lecho elutriador de vuelta al gasificador. CFB opera con velocidades superficiales más altas, típicamente en el rango de 2-5 m/s, mientras que la velocidad en BFB es solo 0.5-2 m/s, manteniendo la relación de combustible a gas de fluidización (Gómez - Barea, et al., 2010). Este tipo de gasificador aumenta la tasa de gasificación, tiene una alta tasa de conversión de alquitrán y es adecuado para la generación de energía a gran escala.

La quema de carbono en los gasificadores de lecho fluidizado circulante es considerablemente mejor que en los lechos fluidizados burbujeantes.

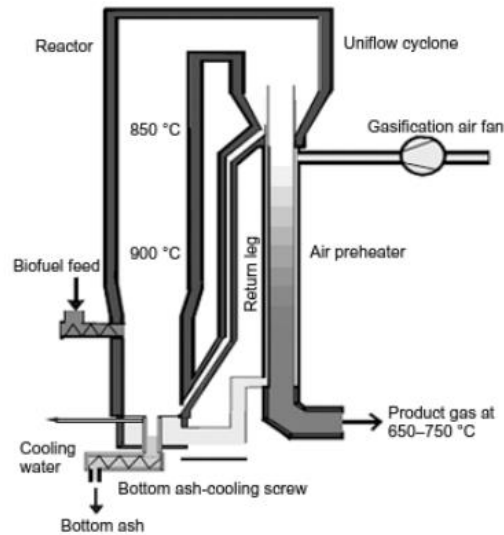


Ilustración 2-24: Esquema de un gasificador de lecho fluidizado Circulante.

Fuente: (Basu, 2010)

- **Doble lecho fluidizado (DFB)**

Este sistema tiene dos cámaras (un gasificador y una cámara de combustión). La biomasa se introduce en la cámara de gasificación de CFB/BFB y se convierte en gas de síntesis libre de nitrógeno y carbón usando vapor. El carbón se quema en el aire en la cámara de combustión CFB/BFB, calentando las partículas del lecho que lo acompañan. Este material de la cama caliente se retroalimenta en la cámara de gasificación, proporcionando el calor de reacción indirecta. Este reactor opera a temperaturas por debajo de los 900°C para evitar que las cenizas se derritan y se peguen.

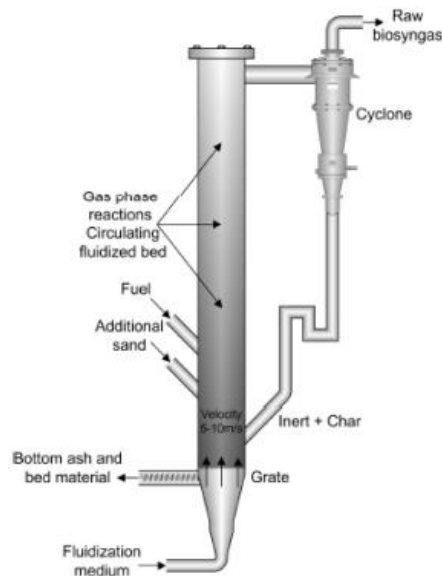


Ilustración 2-25: Diagrama de un gasificador DFB (derecha)

Fuente: (Knoef, 2005)

En la siguiente tabla (Tabla 5-2) se presentan y comparan las condiciones generales de operación de los cuatro tipos principales de gasificadores presentados anteriormente en donde se detalla la temperatura, cantidad de alquitrán que producen, el nivel de control que necesitan, la escala de Megavatios térmicos que llegan a producir y la calidad de materia prima que se debe introducir para su funcionamiento.

Tabla 2-7: Condiciones de operación de diferentes tipos de gasificadores

	Downdraft	Updraft	BFB	CFB
T (°C)	700 – 1200	700 -900	< 900	< 900
Alquitranes	Bajo	Alto	moderado	Moderado
Control	Fácil	Muy fácil	Moderado	Moderado
Escala (MW _{th})	<5	< 20	10 -100	20 -??
Materia Prima	Muy critica	Crítica	Baja crítica	Baja crítica

Fuente: (Puig Arnavat , 2011)

Realizado por: Castro,Daniela,2023

2.2.13. Modelos de gasificación de biomasa

El funcionamiento eficiente de un gasificador de biomasa depende de una serie de reacciones químicas complejas, incluida la pirólisis rápida, la oxidación parcial de productos de pirólisis, gasificación del carbón resultante, conversión de alquitrán e hidrocarburos inferiores, y la reacción de desplazamiento agua-gas. Estos complicados procesos requieren el desarrollo de modelos matemáticos que puedan evaluar la influencia de las principales variables de entrada, como el contenido de humedad, la relación aire/combustible en la composición del gas productor y el poder calorífico del gas productor, para lo cual existen varios tipos de modelos que se pueden aplicar en dependencia de las variables de entrada y salida. A continuación, se presenta una revisión bibliográfica de dos de los tipos de modelos más utilizados y en los cuales se basará el desarrollo del modelo matemático para el aprovechamiento energético de este trabajo.

2.2.13.1. Modelos de tasa cinética

Los modelos cinéticos brindan información esencial sobre los mecanismos cinéticos para describir la conversión durante la gasificación de biomasa, lo cual es crucial para diseñar, evaluar y optimizar los gasificadores ya que mejoran los modelos de equilibrio termodinámico, permitiendo relacionar los parámetros de diseño del gasificador con la composición final del gas producido así como velocidad de reacción, tiempo de residencia e hidrodinámica del reactor (Velocidad superficial, velocidad de difusión y la longitud del gasificador). Este tipo de modelo ofrece un campo amplio de investigación sobre el comportamiento de un gasificador a través de

la simulación y aunque son más precisos en los resultados, computacionalmente son más complejos (Sharma, 2008).

El modelo cinético propuesto por Wang y Kinoshita en 1993 (Wang & Kinoshita, 1993) se basa en un mecanismo de reacciones superficiales en la zona de reducción asumiendo un tiempo de residencia y una temperatura de reacción dados.

En el 2000 Di Blasi (Di Blasi, 2000) desarrolló un modelo de gasificación estacionario, inestable y unidimensional con modelo de gasificación estratificada. El modelo proporciona un conjunto generalizado de ecuaciones para todas las zonas del gasificador, incluido el balance de masa y energía en las fases sólida y gaseosa, secado, pirólisis, combustión y reacciones en la gasificación de carbono (char). Además, la evaporación del agua se considera un proceso limitado por difusión representado por la expresión empírica de la presión de vapor, la zona de pirólisis está representada por una reacción global en una etapa, que produce fracciones de gas, alquitrán y carbón. Para modelar el proceso de gasificación se requiere conocer la composición del gas producido en la zona de pirólisis. Las reacciones de combustión y reducción del carbón son heterogéneas y se describen mediante el modelo de núcleo sin reaccionar. En este estudio, se supuso que el carbón producido era carbono puro y que el producto de la combustión era solo dióxido de carbono.

Giltrap, McKibbin y Barnes en 2003 (Giltrap, et al., 2003) propusieron un modelo de gasificación cinético estático para predecir la composición y la temperatura del gas durante la gasificación utilizando los parámetros de reacción cinética desarrollados por Wang y Kinoshita. Este modelo fue desarrollado específicamente para la reducción y asume que todos los productos de pirólisis están completamente disociados, por lo que la reacción en esta región no se incluye en el modelo y se supone que la velocidad de reacción tiene una dependencia de la temperatura de tipo Arrhenius proporcional a la diferencia entre la relación real de reactivo/producto y la relación de equilibrio correspondiente. El sistema de nueve ecuaciones diferenciales se ha resuelto utilizando la función ODE45 del paquete MATLAB.

En el mismo año Jayah et. al (Jayah, et al., 2003) desarrollaron un modelo cinético con dos submódulos, pirolisis flameante y gasificación. En la zona de pirolisis flameante, se utiliza para determinar la temperatura máxima y la composición de los gases que salen de esta zona, teniendo en cuenta los equilibrios en las reacciones químicas con el balance de masa y energía. La región de gasificación se presenta como un modelo unidimensional de una sola partícula a lo largo del eje axial, con una descripción fisicoquímica del proceso, ecuaciones de flujo, fenómenos de transporte y reglas de conservación. El modelo se calibró utilizando los valores obtenidos durante las pruebas.

En el 2008 Melgar, Pérez y Horrillo (Melgar , et al., 2007) desarrollaron un modelo estacionario-1D en un gasificador downdraft de lecho fijo. El modelo tiene en cuenta la mayoría de los fenómenos que ocurren durante la gasificación, como la evaporación de la humedad de la biomasa, las reacciones heterogéneas del carbón con el vapor de agua, el dióxido de carbono, el hidrógeno y el oxígeno, la combustión de sustancias volátiles, reacciones homogéneas, reacciones del metano y el alquitrán. La fase gaseosa incluyó H_2O , H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , $C_6H_{6,2}O_{0,2}$, O_2 y N_2 , y la fase sólida incluye biomasa vegetal, carbón y cenizas. El modelo utiliza el método de Shell para equilibrar las ecuaciones del comportamiento de las partículas, la pérdida de energía y la presión a lo largo del reactor, teniendo en cuenta las ecuaciones de conservación de energía en cada fase la transferencia de energía y calor debido a la conducción entre fases. y paredes del gasificador, con conductividad eléctrica en las direcciones axial y radial. La caída de presión a lo largo del yacimiento se describe mediante las ecuaciones propuestas por Ergun. El modelo se probó con diferentes tamaños de biomasa y diferentes velocidades del aire en la superficie.

En el 2009 los autores Di Blasi y Branca (Di Blasi & Branca , 2013) propusieron un modelo matemático de gasificación de pellets de madera en un gasificador de núcleo abierto con dos tomas de aire. La influencia del número y ubicación de las entradas secundarias en el perfil de temperatura y conversión de alquitrán y carbón fue analizada para un reactor piloto previamente desarrollado por Barrio, Fossum y Hustad en el 2001 (Barrio , et al., 2001) .Las ecuaciones de conversión para las fases sólida y gaseosa se escriben en forma unidimensional, no estacionaria y reducida. La solución del modelo de ecuaciones se implementa mediante el procedimiento de operador de división y aproximación de diferencias finitas, lo cual se confirma con los datos experimentales presentados por Barrio, Fossum y Hustad en el 2001 (Barrio , et al., 2001) donde las predicciones son generalmente aceptadas, excepto para el rendimiento de metano.

2.2.13.2. *Modelo de equilibrio termodinámico gasificación de biomasa*

Los modelos de tasa cinética siempre contienen parámetros que limitan su aplicabilidad a diferentes plantas. Por lo tanto, los cálculos de equilibrio termodinámico, que son independientes del diseño del gasificador, pueden ser más adecuados para estudios de procesos sobre la influencia de los parámetros más importantes del proceso de combustible. En equilibrio químico, el sistema de reacción tiene la composición más estable y este estado se alcanza cuando la entropía del sistema es máxima y su energía libre de Gibbs es mínima. Sin embargo, no se pudo alcanzar el equilibrio termodinámico, principalmente debido a la temperatura de operación relativamente baja (temperatura de salida del gas entre 750 °C y 1000 °C) (19). Sin embargo, los modelos basados en el equilibrio termodinámico son ampliamente utilizados.

Los modelos de equilibrio tienen dos enfoques generales: estequiométrico y no estequiométrico.

- El enfoque estequiométrico requiere un mecanismo de reacción claramente definido que incorpore todas las reacciones químicas y especies involucradas y se basa en seleccionar aquellas especies que están presentes en mayor cantidad, es decir, aquellas que tienen el valor más bajo de energía libre de formación.
- En el enfoque no estequiométrico, no hay especies o mecanismos de reacción particulares involucrados en la simulación numérica. La única entrada necesaria para especificar la alimentación es su composición elemental, que puede obtenerse fácilmente a partir de datos de análisis final (Anon., 2004) y se basa en minimizar la energía libre de Gibbs en el sistema sin especificar las posibles reacciones que se producen (Mathieu & Dubuisson, 2002)

Como señalaron (Prins, et al., 2003) y (Desrosiers, 1979) en condiciones de gasificación (con temperaturas entre 600 K y 1500 K) las únicas especies presentes en concentraciones superiores al 10-4% mol son CO, CO₂, CH₄, H₂, N₂, H₂O y sólido carbono (grafito). Para este sistema de especies existen tres reacciones químicas independientes (Reacciones 3-2, 4-2, 6-2). Para el sistema homogéneo que consta de CO, CO₂, CH₄, H₂, N₂ y H₂O, existen dos reacciones químicas independientes, resultantes de la combinación de la Reacción 3-2 y la Reacción 4-2 y también de la Reacción 3-2 y la Reacción 6-2.

Como muestran varios autores los dos enfoques (estequiométrico y no estequiométrico) son esencialmente equivalentes. Un modelo estequiométrico también puede usar datos de energía libre para determinar las constantes de equilibrio de un conjunto propuesto de reacciones (Jarunthammachote & Dutta, 2006).

Los modelos de equilibrio se basan en algunos supuestos generales que concuerdan mejor con algunos tipos específicos de reactores para los cuales los modelos de equilibrio tienen mejores capacidades predictivas, Prins et al. (2007) (Prins, et al., 2007) presentó estos supuestos:

- El reactor se considera implícitamente de dimensión cero.
- El gasificador se considera a menudo como un aparato perfectamente aislado, es decir, se desprecian las pérdidas de calor. En la práctica, los gasificadores tienen pérdidas de calor al medio ambiente, pero este término se puede incorporar en el balance de entalpía del modelo de equilibrio.
- Se asume una mezcla perfecta y una temperatura uniforme para el gasificador, aunque en la práctica se observan diferentes hidrodinámicas, dependiendo del diseño del gasificador.
- El modelo asume que las velocidades de reacción de gasificación son lo suficientemente rápidas y el tiempo de residencia es lo suficientemente largo para alcanzar el estado de equilibrio.

- El modelo no proporciona información sobre las rutas de reacción y la formación de intermediarios.
- Los alquitranes no están modelados.

Debido a estos supuestos, los modelos de equilibrio producen grandes desacuerdos en algunas circunstancias. Los errores típicos a temperaturas de gasificación relativamente bajas son la sobreestimación de los rendimientos de H₂ y CO y la subestimación de CO₂, metano, alquitranes y carbon (de hecho, valores nulos para estos tres últimos componentes por encima de los 800 °C) (Villanueva Perales , et al., 2008). Por esta razón, y como se detalla a continuación, varios autores han modificado y corregido el modelo de equilibrio o han utilizado el enfoque de temperatura de cuasi-equilibrio (QET).

Zainal y otros (Zainal , et al., 2001) modelaron el proceso de gasificación de biomasa sobre la base del equilibrio termodinámico estequiométrico. Predijeron la composición del gas productor para diferentes materiales de biomasa. Jarunthammachote y Dutta (2007) (Jarunthammachote & Dutta, 2006) desarrollaron el modelo de equilibrio termodinámico basado en la constante de equilibrio para predecir la composición de un gas productor en un gasificador de downdraft. Usaron coeficientes para corregir la constante de equilibrio de la reacción de cambio de agua-gas y la reacción de metano para mejorar el modelo. Esos coeficientes se obtuvieron de la comparación entre el modelo y los resultados de los experimentos de otros investigadores.

Tabla 2-8: Comparación de los resultados del modelo modificado con los datos experimentales de para biomasa con diferente contenido de humedad (CM).

Composición del gas (% mol b.s.)	Datos del modelo (Jarunthammachote y Dutta, 2007)		Datos experimentales Jayah et al. (2003)	
	MC (16%)	MC (14)	MC (16%)	MC (14)
H ₂	16.81	16.80	17.00	12.50
CO	17.86	18.52	18.40	18.90
CH ₄	1.05	1.06	1.30	1.20
CO ₂	12.10	11.68	10.60	8.50
N ₂	52.18	51.94	52.70	59.10
m	0.4472	0.4415	0.3361	0.3927

Fuente: (Jayah, et al., 2003) (Jarunthammachote & Dutta, 2006)

Realizado por: Castro Daniela, 2023.

Jarunthammachote y Dutta (2008) aplicaron el modelo de equilibrio no estequiométrico a tres tipos de gasificadores: un lecho con chorro de chorro central, un lecho con chorro dividido circular y un lecho de fluido con chorro. Los resultados de la simulación del modelo mostraron una desviación significativa de los datos experimentales, especialmente para el CO y el CO₂ y un factor

importante fue la conversión de carbono, por lo tanto, el modelo se modificó para considerar el efecto de la conversión de carbono en el cual los resultados mejoraron y se acercaron más a los datos experimentales (Tabla 7-2). Sin embargo, este modelo no pudo dar resultados con alta precisión para el proceso de gasificación de lecho en chorro. Igualmente, el poder calorífico también fue un parámetro importante porque generalmente se usa para estimar la energía que se podría obtener al usar ese gas productor. El modelo modificado predijo valores caloríficos que en general eran más altos que los de los experimentos debido a la predicción excesiva del contenido de CO en el gas pobre.

Tabla 2-9: Comparación entre resultados experimentales, modelo original y modelo modificado Jarunthammachote y Dutta (2008).

	H ₂ (vol %)	CO ₂ (vol %)	CO (vol %)	CH ₄ (vol %)	N ₂ (vol %)	O ₂ (vol %)	HHV (MJ/Nm ³)
Central jet spouted bed at 1323.3 K							
Experiment	12.56	14.56	14.97	0.7	54.96	2.27	3.906
Original model	11.08	2.6	30.36	~0	55.96	-	5.44
Modified model	13.55	8.73	19.18	~0	58.53	-	4.302
Circular split spouted bed at 1388.3 K							
Experiment	10.98	13.7	16.41	0.88	57.47	0.55	3.961
Original model	10.26	3.17	29.23	~0	57.34	-	5.183
Modified model	12.45	9.16	18.15	~0	60.22	-	4.022
Spout-fluid bed ER=0.35 at 1148.7 K							
Experiment	8.43	14.95	11.61	2.52	61.55	-	3.891
Original model	14.99	10.42	20.68	~0	53.9	-	4.688
Modified model	16.07	14.42	13.71	~0	55.8	-	3.917
Spout-fluid bed ER=0.30 at 1127.65 K							
Experiment	11.86	14.48	13.03	2.95	56.87	-	4.01
Original model	15.45	10.43	21.08	~0	53.3	-	4.801
Modified model	16.72	14.5	13.76	~0	55.02	-	4.01

Fuente: (Jarunthammachote & Dutta, 2006)

Esta revisión de la literatura ha demostrado que los modelos de equilibrio son herramientas útiles para la comparación preliminar, pero que no pueden dar resultados muy precisos para todos los casos. Como se mencionó anteriormente, los modelos de equilibrio termodinámico no requieren ningún conocimiento de los mecanismos de transformación. Además, son independientes del reactor y no se limitan a un rango específico de condiciones de operación. Son valiosos porque predicen los límites termodinámicos del sistema de reacción de gasificación. Por lo tanto, para describir con mayor precisión el comportamiento de los gasificadores, se han realizado modificaciones en los modelos de equilibrio.

2.2.14. Softwares utilizados para la modelación matemática.

En este trabajo, varias propiedades de la gasificación como parámetros de la biomasa y los sólidos generados, la relación de equivalencia (ϕ) y otras han sido identificadas y calculadas conforme lo requiere el modelo. Éste consiste en un modelo que tiene como referencia la generación de syngas, fue modelado usando el equilibrio termodinámico estequiométrico con reacciones características del proceso de gasificación. Por lo cual se necesita una herramienta o software adecuado para solución, manipulación y recolección de datos.

Los más utilizados y reportados en la literatura son Excel (VBA), FORTRAN, MATLAB, EES y programas comerciales similares, para nuestro caso se seleccionó EES, debido a su fácil acceso, su capacidad para resolver sistemas de ecuaciones complejos, facilidad para interactuar con su interfaz y disponibilidad.

EES (Engineering Equation Solver) es un solucionador de ecuaciones generales que puede resolver miles de ecuaciones diferenciales y algebraicas no lineales relacionadas numéricamente, el programa también se puede utilizar para resolver ecuaciones diferenciales e integrales, realizar optimizaciones, analizar la incertidumbre, realizar regresiones lineales y no lineales, convertir unidades, probar la consistencia de las unidades y generar gráficos de calidad de publicación. Una característica importante de EES es una base de datos muy precisa de propiedades termodinámicas y de transporte incluida que proporciona la información de cientos de sustancias de una manera que permite su uso con capacidades de resolución de ecuaciones.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se revisan las metodologías necesarias para la caracterización físico química de la cascarilla de arroz y también para el modelo matemático desarrollados para el aprovechamiento energético por gasificación de biomasa.

Luego, se comparan para ver cuál se adapta mejor como modelo de gasificador, para gasificadores de tiro descendente y de lecho fijo, para que posteriormente se pueda implementar en un modelo de planta de generación eléctrica. Además, se realiza una búsqueda bibliográfica para recopilar datos experimentales publicados sobre gasificadores de lecho fijo y de tiro descendente que utilizan diferentes biomásas y agentes gasificantes. Estos datos se utilizarán luego para desarrollar y validar el modelo de gasificador.

3.1. Metodología para caracterización físico química de la cascarilla de arroz

En esta sección se estudian las características físicas y propiedades químicas de la cascarilla de arroz mediante pruebas de laboratorio y cálculos. Con el análisis inmediato o aproximado de la cascarilla se determina el contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo de la muestra, y en el análisis último de la cascarilla de arroz, se establecen los porcentajes en masa de los elementos químicos de la muestra como son carbono, nitrógeno, hidrógeno y otros elementos que constituyen la sustancia combustible. Finalmente, el poder calorífico se calcula por tres métodos, bomba calorimétrica, análisis bromatológico y análisis último siendo el punto de partida para la transformación de la biomasa arroceras (cascarilla de arroz) en energía termoeléctrica.

3.1.1. *Análisis de las propiedades y características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz.*

Para asegurar una correcta caracterización de la cascarilla de arroz (tamo) es necesario determinar las propiedades fisicoquímicas del producto y establecer que estas son iguales o superiores a las que se usan actualmente, y de esta manera encontrar la forma correcta para lograr una combustión eficiente.

3.1.1.1. *Densidad*

Con las fases diferenciadas se pueden definir fácilmente que para el caso de la cascarilla de arroz existen tres tipos de densidades, dependiendo del análisis que se realice a una misma muestra, de esa manera tenemos:

- **Densidad a granel o en masa**

$$\rho_b = \frac{M_{TOTAL}}{V_{TOTAL}}$$

Ecuación 2-3

M_{total} de una muestra de cascarilla de arroz suelta = 10 g.

V_{total} (cascarillas de arroz + espacio comprendido entre ellas + poros internos y externos de la misma) = 98 cm³

$$\rho_b = \frac{10 \text{ g}}{98 \text{ cm}^3} = 0,12 \text{ g/cm}^3$$

- **Densidad aparente**

$$\rho_a = \frac{M_{TOTAL}}{V_a}$$

Ecuación 3-3.

$V_a = V_{total}$ – Volumen de los espacios libres presentes en la camada de cascarilla.

$$V_a = 98 \text{ cm}^3 - 82,6 \text{ cm}^3 = 15,4 \text{ cm}^3$$

$$\rho_a = \frac{M_{TOTAL}}{V_a} = \frac{10 \text{ g}}{15,4 \text{ cm}^3} = 0,649 \text{ g/cm}^3$$

- **Densidad verdadera**

$$\rho_t = \frac{M_{TOTAL}}{V_\sigma}$$

Ecuación 4-3.

$V_\sigma = V_a$ – Volumen de los poros internos y externos de la cascarilla de arroz

$$V_\sigma = 15,4 \text{ cm}^3 - 8,35 \text{ cm}^3 = 7,05 \text{ cm}^3$$

$$\rho_t = \frac{M_{TOTAL}}{V_\sigma} = \frac{10 \text{ g}}{7,05 \text{ cm}^3} = 1,418 \text{ g/cm}^3$$

3.1.1.2. Porosidad

Se define la porosidad de un combustible sólido como:

$$E_T = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t}$$

Ecuación 5-3.

Donde

E_T : Total de porosidad del combustible.

ρ_a : Densidad aparente.

ρ_t : Densidad verdadera

El total de porosidad de combustible (ET), no representa necesariamente el volumen de los poros disponibles portadores de oxígeno, debido a que nuevos poros son generados a través del pirólisis antes que la cascarilla logre quemarse. En el caso de la cascarilla de arroz, la difusión del aire en los microporos no se alcanza completamente en el instante de permanencia del fuego, porque su consumo es rápido. Otras ecuaciones de interés son:

- **Fracción de espacios vacíos**

$$E_V = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a}$$

Ecuación 6-3.

- **Fracción de volumen total en fase gaseosa**

$$E_g = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}$$

Ecuación 7-3.

Los valores obtenidos de las densidades de la cascarilla de arroz tanto en pellets (compactada) como suelta que se utilizan reemplazando valores en la ecuación 12-3,13-3 y 14-3 y se obtienen la porosidad de la cascarilla de arroz, la fracción de espacios libres y la fase gaseosa teórica respectivamente.

Cascarilla compacta

$$E_T = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} = 1 - \frac{1,18}{1,60} = 1 - 0,7375 = 0,2625$$

$$E_V = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a} = 1 - \frac{0,58}{1,18} = 1 - 0,4915 = 0,5084$$

$$E_g = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} = 1 - \frac{0,58}{1,60} = 1 - 0,3625 = 0,6375$$

Cascarilla suelta

$$E_T = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} = \frac{0,65}{1,42} = 1 - 0,4577 = 0,5422$$

$$E_V = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a} = 1 - \frac{0,10}{0,65} = 1 - 0,1538 = 0,8461$$

$$E_g = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} = 1 - \frac{0,10}{1,42} = 1 - 0,0704 = 0,9296$$

Además de las propiedades físicas mencionadas de la cáscara de arroz, también hay propiedades y características químicas que deben determinarse para las propiedades energéticas de las cáscaras de arroz que deben determinarse.

3.1.2. Tipificación de la cascarilla de arroz

Después de retirar el agua de la muestra, se divide en cuatro fracciones y se procesa hasta obtener un material granular, sobre el cual se realizarán una serie de determinaciones, formando un análisis direccional.

Para hacer esto, se muestrea 1 gramo y se calienta a diferentes temperaturas y tiempos hasta obtener una masa constante calculando la pérdida de masa. Por análisis aproximado o directo de la cáscara se obtiene la siguiente información:

El Análisis Aproximado de la cascarilla de arroz se realizó en el laboratorio de la Facultad de Ciencia de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Anexo B) y también se comparó los datos obtenidos con referencias bibliográficas de análisis similares realizados en laboratorios de AGROCALIDAD y PRONACA Procesadora Nacional de Alimentos Puenbo (Anexo C).

3.1.2.1. Contenido de humedad

Se determina por la diferencia de peso, la muestra se somete a calor mientras se retira de la carga, la muestra se seca en porcelana a 104 – 107 °C durante una hora para evitar pérdidas de material por salpicaduras.

$$MC \% = \frac{A - B}{A} * 100$$

Ecuación 8-3.

Donde:

A= peso del combustible húmedo

B= peso del combustible seco.

El contenido de humedad se vuelve a determinar incluso si la muestra se ha secado previamente, ya que de manera desconocida aumenta la humedad cuando se manipula para reducir el tamaño.

El contenido de humedad que obtiene la cascarilla de arroz, por ser un combustible de biomasa, por su grosor y tamaño, depende de la humedad relativa del ambiente.

La presencia no deseable de humedad tiene un efecto negativo ya que disminuye el poder calorífico y reduce la cantidad de combustible efectivo.

Tabla 3-1: Análisis del contenido de humedad de la cascarilla de arroz de laboratorios de referencia.

Parámetros	Laboratorio Pronaca	Laboratorio Agrocalidad
Humedad (%)	8,41	6,40

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023.

3.1.2.2. Porcentaje de cenizas

Se trabajó sobre una muestra húmeda en una cápsula de porcelana y a un ritmo controlado durante 2 horas y la temperatura debe alcanzarse a 750 °C y mantenerse durante otras 2 horas.

$$cenizas(\% b. h) = \frac{A - B}{C} * 100$$

Ecuación 9-3.

Donde:

A- B = Peso de las cenizas.

A = Peso de cenizas + cápsula

B = Peso cápsula.

C = Peso de la muestra húmeda seca

Tabla 3-2: Análisis del porcentaje de cenizas de la cascarilla de arroz de laboratorios de referencia.

Parámetros	Laboratorio Pronaca	Laboratorio Agrocalidad
Cenizas (%)	14,83	23,94

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023.

En los procesos involucrados en la quema de biomasa, el conocimiento del porcentaje de formación de cenizas es importante y su composición, ya que en algunos casos se puede utilizar por ejemplo las cenizas de cáscara de arroz como adyuvante de mezclas de hormigón o para la fabricación de filtros de carbón activado.

La composición mineral de la ceniza de cascarilla de arroz se puede observar en la Tabla 8-3, la cual fue determinada con base en el análisis de cenizas en los laboratorios de Agrocalidad.

Tabla 3-3: Composición mineral de la ceniza de la cascarilla de arroz.

Laboratorio Agrocalidad	
Composición	Fracción en peso (%)
Sílice (SiO)	90 - 97
Óxido de Calcio (CaO)	0,2 - 1,5
Óxido de Magnesio (MgO)	0,1 - 2,0
Óxido de Potasio (K ₂ O)	0,6 - 1,6
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	Trazas - 1,75
Óxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	0,3
Sulfatos (SO ₃)	0,10 - 1,13
Cloro (Cl)	0,15 - 0,40
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	Trazas - 0,40
Óxido de Manganeso (MnO ₂)	Trazas

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023.

3.1.2.3. Porcentaje de Materia Volátil

Para este análisis se utiliza una cápsula o boquilla recubierta de platino y la muestra se expone durante 7 minutos a una temperatura de 950 °C.

$$Materia\ volátil\ \% = A - B$$

Ecuación 10-3.

Donde:

A = % pérdida de peso

B = % humedad

Desde un punto de vista cuantitativo, la materia volátil representa la cantidad de gas en el combustible, lo que afecta el diseño volumétrico de la cámara del horno de camisa de combustión, lo que permite la eliminación adecuada de los gases de combustión.

La Tabla 2.6 muestra el porcentaje de volátiles en cascarilla de arroz obtenidos en los laboratorios de Agrocalidad y Pronaca.

Tabla 3-4: Análisis del porcentaje de volátiles de la cascarilla de arroz.

Parámetros	Laboratorio Pronaca	Laboratorio Agrocalidad
Materia Volátil (%)	61,34	52,85

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023.

3.1.2.4. Porcentaje de Carbono Fijo.

Este ensayo no se realiza experimentalmente, se determina por cálculo de diferencia con la siguiente ecuación.

$$\text{Carbono Fijo \%} = 100 - (\text{humedad} + \text{cenizas} + \text{materia volátil})$$

Ecuación 11-3.

La importancia del porcentaje de carbono fijo representa las relaciones que no se evaporan en condiciones de C, es decir, el carbono fijo es la masa efectiva que se puede quemar como combustible después de la evaporación.

Tabla 3-5: Análisis del porcentaje de carbono fijo de la cascarilla de arroz.

Parámetros	Laboratorio Pronaca	Laboratorio Agrocalidad
Carbono Fijo (%)	15,42	16,81

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023.

Los datos que se obtienen del análisis aproximado, y de los porcentajes de cenizas, volátiles y carbón fijo se calcula en función del total de uso de humedad especificado. A efectos de cálculo, es conveniente expresarlos en términos de masa seca (excluida la humedad) para obtener, junto con los datos de humedad total, los valores del combustible en el momento de su retirada de la carga (contenido total).

3.1.3. Análisis último de la cascarilla de arroz

Los equipos empleados para determinar los porcentajes en masa de los elementos químicos son un digestor y un destilador de muestras

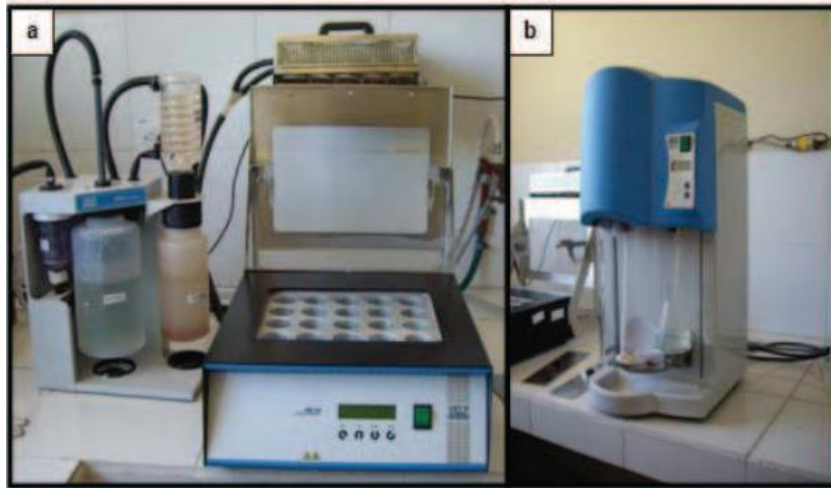


Ilustración 3-1: Digestor y un destilador de muestras

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

En la ilustración 25-3 se puede observar el fermentador de muestras, como su nombre indica, descompone la muestra y por otro lado el destilador de muestras, cuya combinación determina el método analítico Kjeldahl, que se utiliza para determinar el porcentaje de nitrógeno total y el porcentaje de proteína en la muestra.

El espectrómetro de absorción atómica se muestra en la Fig. 2.12.usando el método de la llama, el mismo método para determinar el porcentaje en masa de Ca, Mg, Fe, Cu y Mn presentes en la muestra por análisis calorimétrico.



Ilustración 3-2: Espectrómetro de UV

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

En la Ilustración 26-3 muestra el espectrómetro de UV visible determinando el porcentaje de fósforo en una muestra mediante calorimetría analítica.

En la tabla 13-3 se muestra un análisis ultimo de referencia realizado a la cascarilla de arroz en los laboratorios de Agrocalidad

Tabla 3-6: Análisis último de la cascarilla de arroz.

Elementos	Simbolo	Fracción de masa en base seca (%) Agrocalidad
Carbono	C	39,60
Oxígeno	O	37,52
Silicio	Si	15,21
Hidrogeno	H	4,94
Potasio	K	0,25
Nitrógeno	N	1,83
Azufre	S	0,40
Fosforo	P	0,05
Calcio	Ca	0,09
Sodio	Na	0,035
Hierro	Fe	0,006
Magnesio	Mg	0,06
Zinc	Zn	0,0059

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023

- **Poder calorífico**

También conocido como valor calorífico, es la cantidad de calor que se libera cuando una unidad de masa de combustible sólido o líquido se quema por completo. Está formado por el calor de combustión más el calor de vaporización del agua generada en el proceso, más el calor contenido previamente.

El vapor de agua presente entre los productos de la combustión depende de su temperatura de tal forma que puede existir en forma de vapor, el cual puede condensarse parcial o totalmente. Dado que el vapor libera calor a medida que se condensa, cuanto más condensado se forma, más calor se elimina del combustible. Esto permite distinguir entre valor calorífico neto (PCI) y valor calorífico total (PCS).

El poder calorífico de una sustancia que se puede utilizar como combustible, puede calcularse en base de 3 técnicas

c) Análisis de su composición química (Análisis Ultimo)

Con el análisis final de la tabla 2.9, se puede determinar el poder calorífico del combustible. Este valor está directamente relacionado con los respectivos porcentajes de carbono, hidrógeno y oxígeno (C-H-O). El poder calorífico superior del combustible de biomasa se puede expresar mediante la fórmula:

$$\text{HHV}(\text{KJ}/\text{kg}) = -8419,7 + 479,3 (\text{C}) + 667,6 (\text{H}) + 58,8 (\text{O}) - 1207,7 (\text{S})$$

Donde C, H, O y S son porcentajes en masa de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, respectivamente, se determinan sobre la base del peso seco y se dividen por el peso molecular de cada uno puede encontrar su molaridad.

Tabla 3-7: Análisis último de cascarilla de arroz

Elemento	% Peso	Peso Molecular	Moles
C	39,6	12	3,30
H	4,94	1	4,94
O	37,52	16	2,345
S	0,40	32	0,0125

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023

Así que la cáscara de arroz tiene la fórmula $\text{C}_{3,3} \text{H}_{4,94} \text{O}_{2,345}$ y el peso es de 39,6%C; 4,94%H; 37.52% O y dado que el aporte de azufre es tan pequeño no se considera por ser inerte en la reacción química de la combustión. Entonces, sustituyendo el porcentaje de masa de cada elemento en la Ecuación 19-3, se tiene:

$$\text{HHV} (\text{KJ}/\text{kg}) = -8419,7 + 479,3 (39,6) + 667,6 (4,94) + 58,8 (37,52) - 1207,7 (0,4)$$

$$\text{HHV} (\text{KJ}/\text{kg}) = 15581,62 \text{ KJ}/\text{kg} = 15,58 \text{ MJ}/\text{kg}.$$

$$\text{HHV} (\text{KJ}/\text{kg}) = 15,58 \text{ MJ}/\text{kg}.$$

Considerando que todo el hidrógeno se combina con el oxígeno durante la combustión para formar agua, se producirán un total de 0,514 kg de agua/kg de cascarilla de arroz, requiriendo 1,16 MJ por cada kg de cascarilla de arroz evaporado. Esto nos da un valor del poder calorífico inferior (LHV).

Cascarilla de arroz: $\text{C}_{3,3} \text{H}_{4,94} \text{O}_{2,345} = 82,06 \text{ Kg}$ de cascarilla seca.

Asumiendo: $\text{H} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$.

$$82,06 \text{ Kg}_{\text{cascarilla}} \rightarrow 2,345 * 18 = 42,21 \text{ Kg}_{\text{H}_2\text{O}}.$$

Calor de vaporización del agua a 1 atm = 2,258 MJ/kg.

$$LHV = HHV - \left(\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de cascarilla}} * (\text{calor de vaporización de agua}) \right)$$

Ecuación 12-3.

Reemplazando los valores se obtiene

$$LHV = 15,58 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} - \left(\frac{42,21}{82,06} * 2,258 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$LHV = 15,58 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} - \left(0,514 * 2,258 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$LHV = 15,58 \frac{MJ}{Kg} - 1,16 \frac{MJ}{Kg}$$

$$LHV (b.s) = 14,42 \frac{MJ}{Kg}$$

El contenido de humedad del combustible tiene un doble efecto en la reducción del poder calorífico, ya que es necesario evaporar el agua contenida en los poros internos del sólido, por otro lado, reduciendo también la cantidad de biomasa aprovechable. Por ejemplo, un kg de biomasa con un 10 % de humedad rinde 0,90 kg de fibra y 0,10 kg de agua.

Por lo tanto, el poder calorífico inferior en base húmeda se calcula de la siguiente manera:

$$LHV_{\text{Base Húmeda}} (\text{MJ/kg}) = LHV_{(b.s)} * (\% \text{ fibra seca}) - (\text{calor evaporación agua})$$

Ecuación 13-3.

Si se expresa en función de la húmeda se obtiene:

$$LHV_{b.h.} (\text{MJ/kg}) = LHV_{(b.s)} * (1 - MC/100) - 2,26 (MC /100)$$

$$LHV_{b.h.} = HHV * [1 - (MC /100)] - 2,258 * (MC /100) - 2,258 * (H/100) * 9,01 [1 - (MC /100)]$$

Ecuación 14-3.

Donde MC es el contenido de humedad y H el porcentaje en peso de hidrógeno del análisis último de la cascarilla de arroz.

A continuación, se muestra un gráfico (Ilustración 2.17) donde se puede observar de mejor manera la variación del poder calorífico en función del porcentaje de humedad.

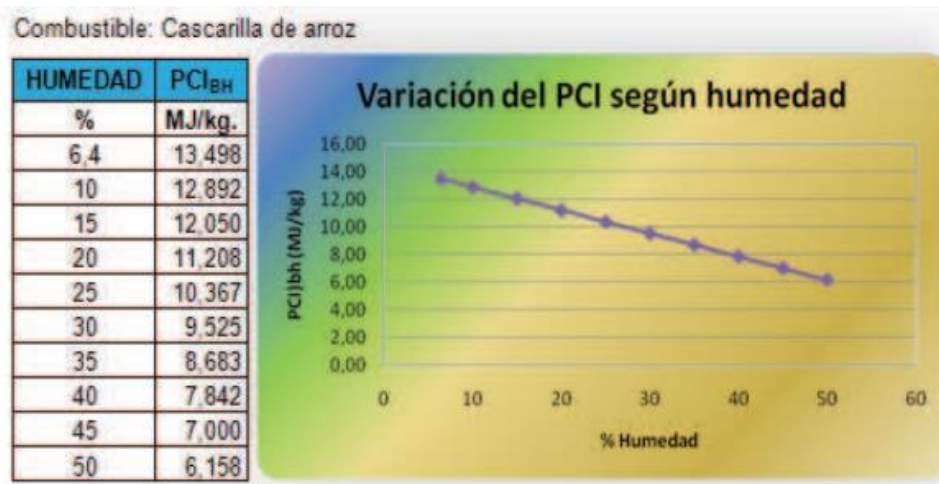


Ilustración 3-3: Variación del $LHV_{b.h.}$ según el contenido de humedad.

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

3.2. Metodología de desarrollo del modelo matemático para simulación del porcentaje de productos gaseosos obtenidos

3.2.1. Propiedades relacionadas con la gasificación

Las propiedades de la biomasa y del aire alimentadas al proceso junto con varias propiedades características operacionales de la gasificación se identifican en esta sección. Los parámetros o valores pueden no encontrarse en un formato requerido por el modelo, por lo que es muy importante y crucial para manipular los datos requeridos.

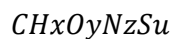
3.2.2. Propiedades relacionadas con la biomasa

La biomasa es una mezcla compleja de compuestos orgánicos que componen en principalmente de carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Los correspondientes parámetros elementales se archivan en forma de análisis último. A partir de este análisis, se puede determinar la mayoría de las propiedades de la biomasa como la formula química y el poder calorífico de ésta.

3.2.3. Formula química de la biomasa

Debido a la alta complejidad para determinar la formula química de la biomasa se han desarrollado diversos métodos para determinar la formula aproximada equivalente. Uno de los métodos más utilizados se basa en la utilización de las composiciones elementales de la biomasa en base seca En las ecuaciones (6.01 a la 6.05) se muestra las expresiones.

Formula general de la biomasa:



Se toma como base un átomo de carbón:

$$C = 1$$

$$x = \frac{H\% * PM_C}{C\% * PM_H}$$

$$y = \frac{O\% * PM_C}{C\% * PM_O}$$

$$z = \frac{N\% * PM_C}{C\% * PM_N}$$

$$u = \frac{S\% * PM_C}{C\% * PM_S}$$

C%, H%, O%, N% y S% corresponden a la composición elemental de cada elemento en la biomasa reportados en el análisis último, en la tabla 6 reportan los valores de la formula química de la biomasa utilizada por los autores de referencia.

Tabla 3-8: Formula química de las biomásas usadas como referencia

Biomasa	Análisis último [%]						CcHxOyNzSu				
	C	H	N	O	Ash	S	c	x	y	z	U
Pellets de madera (Barrio M. , 2002)	50,7	6,9	0,3	41,7	0,39	0	1	1,62	0,62	0,005	0
Madera de caucho (Jayah,Aye, Fuller, & Stewart, 2003)	50,6	6,5	0	42,2	0,7	0	1	1,53	0,63	0	0
Cascarilla de arroz	50,6	6,5	0	42,2	0,7	0	1	1,53	0,63	0	0

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

Realizado por: Castro Daniela,2023

3.2.4. Contenido de humedad

El contenido de humedad de la biomasa normalmente se presenta en fracción másica. Sin embargo, la cantidad de agua por kilo mol de biomasa es requerida para cálculos estequiométricos. Cuando el contenido de humedad (MC) de la biomasa es conocido, la cantidad de agua (w) que ingresa al sistema puede ser determinada de la siguiente manera.

$$MC = \frac{m_{H_2O}}{m_{bms}} * 100 = \frac{m_{H_2O}}{m_{bms,seca} + m_{H_2O}} * 100 = \frac{w * PM_{H_2O}}{m_{bms} * PM_{bms} + w * PM_{H_2O}} * 100$$

Ecuación 15-3.

Finalmente,

$$w = \frac{PM_{bms} * MC}{PM_{H_2O} * (1 - MC)}$$

Ecuación 16-3.

El peso molecular de la biomasa se calcula de la siguiente forma:

$$PM_{bms} = C * PM_C + x * PM_H + y * PM_O + z * PM_N + u * PM_S$$

Ecuación 17-3.

Donde PM_C , PM_H , PM_O , PM_S y PM_N es el peso molecular de cada uno de los elementos que componen la biomasa

Los pellets de madera tienen un contenido de humedad del 18.5% en peso, la cantidad de agua (w) estimado para esta biomasa es 0,2973, y para cascarilla de arroz w es 0.297.

3.2.5. Poder calorífico

El poder calorífico en la biomasa es la cantidad que libera de calor durante combustión completa, existen varios métodos aproximados para calcular el poder calorífico como son los métodos experimentales y las correlaciones unificadas basadas en el análisis último de la biomasa. Esta característica depende del contenido de humedad de la biomasa, debido que el contenido de humedad es una característica muy importante para el proceso de gasificación no es relevante para calcular el poder calorífico experimental de la biomasa. Por lo tanto, el valor de poder calorífico para la biomasa puede calcularse utilizando las correlaciones desarrolladas por (Channiwala & Parikh, 2002) que se muestran en las ecuaciones 26-3.

$$HHV \left[\frac{kJ}{kmol} \right] = 0,3491C\% + 1,1783H\% + 0,1005S\% - 0,1034O\% - 0,0151N\% - 0,0211ASH\%$$

Ecuación 18-3.

De esta manera el valor de poder calorífico corresponde al poder calorífico superior (HHV) que puede ser suministrada por la combustión, el autor de esta correlación afirmó la exactitud de su correlación para predecir el poder calorífico para combustible sólidos.

Con el HHV calculado se puede obtener el poder calorífico inferior (LHV), con la ecuación 27-3 que se muestra a continuación.

$$LHV = HHV - 9 * H\% - \Delta H_{vap, H_2O}$$

Ecuación 19-3.

3.2.6. Relación de equivalencia

La relación de equivalencia hace referencia a la razón entre la relación aire combustible real (A/F)*real* y la relación aire-combustible estequiométrica, (A/F)*estequiométrica*, como ya se mencionó anteriormente.

La relación aire combustible alimentada es un parámetro operacional para el modelo, puede ser manipulada con fines experimentales, mientras la relación aire combustible estequiométrica es una constante para la biomasa y se calcula con la ecuación 28-3.

$$A/F \text{ estequiométrico} = \left(1 + \frac{x}{4} + \frac{z}{2} + \frac{y}{2} \right) * (1 + 3,76)$$

Ecuación 20-3.

Donde $\left(1 + \frac{x}{4} + \frac{z}{2} + \frac{y}{2}\right)$ es la cantidad de oxígeno requerido para combustión completa, en base molar es el oxígeno requerido por 1 mol de biomasa.

Cuando la relación de equivalencia es conocida, es posible estimar la cantidad de aire alimentada en base molar como precursora para la ecuación estequiométrica para calcular la cantidad de aire que se muestra a continuación.

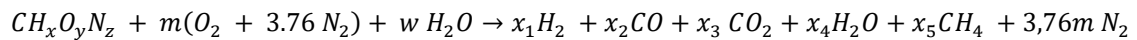
$$m = \left(1 + \frac{x}{4} + \frac{z}{2} + \frac{y}{2}\right) * \varphi$$

Ecuación 21-3.

Así, con una relación de equivalencia de 0,326, la cantidad de oxígeno alimentada es de 0,3594 kmol de O₂ para los pellets de madera y 0.3497 kmol de O₂ para la madera de caucho

3.2.7. Formulación del modelo matemático de gasificación

En este modelo se aborda a través de la consideración de equilibrio termodinámico estequiométrico, la formulación del proceso de gasificación se basa en suposiciones empíricas que fueron apoyados por resultados experimentales de gasificación de biomasa. De acuerdo con la bibliografía, la reacción química que rige el proceso de gasificación se define como:



Ecuación 22-3.

Aplicando el principio de conservación de masa, se llevaron a cabo los balances de masa para la ecuación 30-3 para cada uno de los componentes de la biomasa C, H, N, O y S.

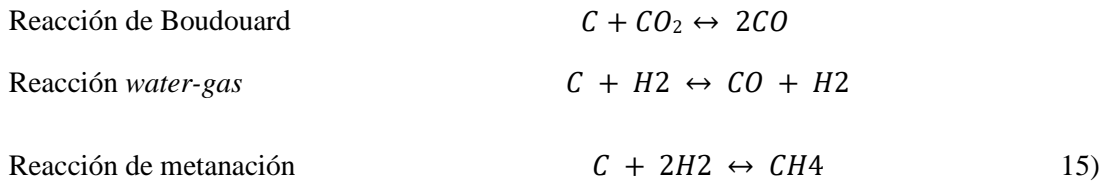
Balance de Carbono	$1 = x_1 + n_{co2} + n_{ch4}$
Balance de Hidrogeno	$x + 2w = 2n_{h2} + 2n_{h2o} + 4n_{ch4} + 2n_{h2s}$
Balance de Oxígeno	$y + 2m + w = n_{co} + 2n_{co2} + n_{h2o}$
Balance de Nitrógeno	$z + 3,76 2m = 2nn2$
Balance de azufre	$u = n_{h2s}$

Para el oxígeno, los reactivos aparecen tanto en la biomasa como en el aire y a la salida en CO, CO₂ y H₂O, como el proceso de gasificación se lleva a cabo con deficiencia de oxígeno se considera que a la salida del gas pobre no hay existencia alguna de oxígeno (O₂).

El equilibrio químico se explica generalmente ya sea con la minimización de la energía libre de Gibbs o mediante el uso de constantes de equilibrio.

Para llevar a cabo la minimización se requieren teorías matemáticas complejas. Por esta razón, el presente modelo se desarrolló sobre las contantes de equilibrio, dos ecuaciones adicionales se

obtuvieron de las constantes de equilibrio de las reacciones que se producen en la zona de gasificación como se muestra a continuación:



Algunos autores como (Zainal, Ali, Lean, & Seetharamu, 2001) (Zainal, et al., 2001) y (Higman & Van der Burgt, 2003), presentan las ecuaciones de las reacciones de Boudouard y de *wáter-gas* que combinadas en una reacción conocida como *water-gas shift reaction*, ésta se muestra en la reacción siguiente:



En el presente modelo, el equilibrio termodinámico se supuso para todas las reacciones químicas en la zona de reducción. Todos los gases se asumieron como ideales y todas las presiones se llevan a cabo a 1 atm. Por lo tanto, las constantes de equilibrio que son funciones de la temperatura para la *water-gas shift reaction* y la reacción de metanación son:

La constante de equilibrio para la *water-gas shift reaction*

$$K_1 = \prod_i (x_i)^{v_i} \left(\frac{P}{p^0}\right)^{\sum_i v_i} = \frac{n_{CO_2} * n_{H_2}}{n_{CO} * n_{H_2O}}$$

$$K_1 = \frac{x_5}{x_1^2}$$

Ecuación 23-3.

La constante de equilibrio para la reacción de metanación

$$K_2 = \prod_i (x_i)^{v_i} \left(\frac{P}{p^0}\right)^{\sum_i v_i} = \frac{n_{CH_4} * n_{Total}}{(n_{H_2})^2}$$

$$K_2 = \frac{x_1 x_3}{x_2^2 x_4}$$

Ecuación 24-3.

Donde x_i es la fracción molar de las especies i en la mezcla de gas producido, v es el número estequiométrico, p^0 es la presión estándar, 1 atm, y n_{total} es el total de moles producidas. Las ecuaciones (6.17) y (6.18) expresadas en forma de igualdad se muestran a continuación:

$$0 = K_1(n_{CO})(n_{H_2O}) - (n_{CO_2})(n_{H_2})$$

$$0 = K_2(n_{H_2})^2 - (n_{CH_4})(n_{Total})$$

El valor de las constantes de equilibrio K1 y K2 fueron definidos considerando la función de Gibbs como:

La energía libre de Gibbs para una especie en particular se establece como:

$$\ln K = -\frac{\Delta G_T^o}{RT}$$

$$\Delta G_T^o = \sum_i v_i \Delta g_{f,T,i}^o$$

La energía libre de Gibbs para una especie en particular se establece como

$$g_j^o = h_i(T) - T s_j(T)$$

Donde h es la entalpía y s es la entropía.

Para el sistema considerado, la ecuación (6.22) se puede suponer que es igual a la siguiente.

$$\Delta G_o = \sum_{i=1} v_i \{ [h_o + (h_i(T) - h_t(298K))] - T [S_o + (S_i(T) - S_t(298K))] \}$$

Donde h_f^o es la entalpía estándar de formación, s_f^o es la entropía estándar de formación, el Cp es el calor específico a presión constante para cada uno de los compuestos, todos estos valores termodinámicos fueron calculados con las bases de datos del programa EES.

Las constantes de equilibrio y las propiedades termodinámicas necesarias para resolver el modelo del gasificador son dependientes de la temperatura. Para el cálculo de la temperatura es necesario el planteamiento de un balance de energía del proceso, éste se observa a continuación

$$HR = h_{f,bms}^o m_{bms} + m h_{f,o_2}^o + 3,76 m h_{f,N_2}^o + w h_{f,H_2O}^o$$

$$HP = n_{CO}(h_{f,CO}^o + Cp \Delta T) + n_{CO_2}(h_{f,CO_2}^o + Cp \Delta T) + n_{H_2}(h_{f,H_2}^o + Cp \Delta T) + n_{H_2O}(h_{f,H_2O}^o + Cp \Delta T)$$

$$+ n_{CH_4}(h_{f,CH_4}^o + Cp \Delta T) + n_{N_2}(h_{f,N_2}^o + Cp \Delta T) + n_{H_2S}(h_{f,H_2S}^o + Cp \Delta T)$$

Ecuación 25-3.

Y $HR = HP$, todas las entalpías de los gases productos y reactivos fueron tomadas como ya se mencionó anteriormente del programa EES, La entalpía de la biomasa fue calculada según (Li X., Grace, Watkinson, Lim, & Ergüdenler, 2001):

$$h_{f,bms,298}^o = HHV - (327,63C\% + 1417,94H\% + 92,57S\% + 158,67MC)$$

Ecuación 26-3.

Ya con los balances de masa, energía y las constantes de equilibrio se puede predecir las composiciones y la temperatura de salida, utilizando el programa EES.

3.2.8. Poder calorífico del gas producido

El poder calorífico del gas depende de la composición de éste, para su cálculo se lleva a combustión completa los gases obtenidos en el proceso de gasificación, una vez se tiene esto se realiza otro balance de masa y energía similar al que se realiza en el capítulo anterior, para la predicción de la composición de los productos de combustión como son CO₂, H₂O, N₂. Ya con estas concentraciones conocidas se plantean balances de energía.

La ecuación para calcular el poder calorífico inferior y superior del gas se muestra a continuación.

$$LVH_{syngas} = \frac{HR_C - HP_C}{v_{tot}}$$

Donde,

$$v_{tot} = \frac{n_{tot} * R * T_n}{P_o}$$

Donde v_{tot} es el flujo volumétrico normal de gas producido, n_{tot} moles de “syngas” producido por kmol de biomasa equivalente, R es la constante universal de los gases (8.314510 J/mol-K), P_o y T_n son las condiciones normales de un gas y según IUPAC es $T = 0^\circ\text{C}$ y $P = 1 \text{ atm}$.

El poder calorífico del gas se calcula según la ecuación (5.04).

$$HHV_{syngas} = LVH_{syngas} + \left(n_{H_2O,comb} * \frac{\Delta h_{vap}}{v_{Tot}} \right)$$

Con el valor de poder calorífico calculado, puede determinar la eficiencia de gas frío según (Basu, 2013), la relación se muestra a continuación:

$$n_{cg} = \frac{LVH_{syngas} v_{tot}}{LVH_{bms} f_{bms} PM_{bms}} * 100$$

3.2.9. Cálculo de constantes de equilibrio

El modelo de equilibrio asume que todas las reacciones están en equilibrio termodinámico. Se espera que el producto de pirólisis se queme y alcance el equilibrio en la zona de reducción antes de salir del gasificador, por lo que se puede usar un modelo de equilibrio en el gasificador de tiro descendente. Las reacciones son las siguientes:



Las ecuaciones (1) y (2) se pueden combinar para dar la reacción de cambio



La constante de equilibrio para la formación de metano, ecuación (3) es:

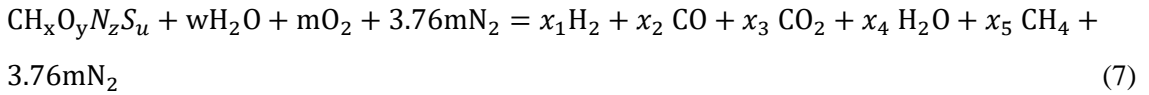
$$K_1 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})} \quad (5)$$

Y la constante de equilibrio para la reacción de desplazamiento es:

$$K_2 = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \quad (6)$$

Como referencia la fórmula química típica de la madera, basada en un solo átomo de carbono, es $CH_{1.44}O_{0.66}$

La reacción de gasificación global se puede escribir de la siguiente manera:



Una vez que se conoce la humedad, el valor de w se convierte en una constante.

De las reacciones globales, hay seis incógnitas x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 y m , que representan las cinco especies desconocidas del producto y el contenido de oxígeno para la reacción. Por lo tanto, se requieren seis ecuaciones, las cuales se formulan en base a lo siguiente:

$$1 = x_2 + x_3 + x_5 \quad (8)$$

Balance de hidrógeno:

$$2w + 1.44 = 2x_1 + 4x_5 \Rightarrow w + 0.72 = x_1 + x_4 + 2x_5 \quad (9)$$

Balance de oxígeno:

$$w + 0.66 + 2m = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (10)$$

Constante de equilibrio de formación de metano (Eq. (5)):

$$K_1 = \frac{x_5}{x_1^2} \quad (11)$$

La constante de equilibrio de la reacción de cambio (Eq. (6)):

$$K_2 = \frac{x_1 x_3}{x_2 x_4} \quad (12)$$

La ecuación para el balance de calor para el proceso de gasificación, asumiendo que es adiabático, es:

$$H_{f,wood}^0 + w(H_{f,H_2O(1)}^0 + H_{(vap)}) + mH_{f,O_2}^0 + 3.76mH_{f,N_2}^0 = x_1H_{f,H_2}^0 + x_2H_{f,CO}^0 + x_3H_{f,CO_2}^0 + x_4H_{f,H_2O(vap)}^0 + x_5H_{f,CH_4}^0 + \Delta T(x_1C_{PH_2} + x_2C_{PCO} + x_3C_{PCO_2} + x_4C_{pH_2O} + x_5C_{pCH_4} + 3.76mC_{PN_2}) \quad (13)$$

Se considera $H_{f,H_2}^0, H_{f,N_2}^0, H_{f,O_2}^0$ como cero a temperatura ambiente de 25 °C, por lo que la Eq. (13) se reduce a:

$$\begin{aligned} H_{f,biomasa}^0 + w(H_{f,H_2O(l)}^0 + H_{(vap)}) \\ = x_2H_{f,CO}^0 + x_3H_{f,CO_2}^0 + x_4H_{f,H_2O(vap)}^0 + x_5H_{f,CH_4}^0 \\ + \Delta T(x_1C_{PH_2} + x_2C_{PCO} + x_3C_{PCO_2} + x_4C_{pH_2O} + x_5C_{pCH_4} + 3.76mC_{PN_2}) \end{aligned} \quad (14)$$

Donde $H_{f,biomasa}^0$, es a la entalpía de formación de la biomasa, $H_{f,H_2O(1)}^0$, es la entalpía de formación del agua líquida, $H_{(vap)}$, la entalpía de vaporización del agua, $H_{f,H_2O(vap)}^0$, la entalpía de formación

del agua en vapor, H^0_{fCO} , $H^0_{fCO_2}$, $H^0_{fCH_4}$, son las entalpías de formación de los productos de gases, C_{pH_2} , C_{pCO} , C_{pH_2} , C_{pH_4} , C_{pN_2} , son las entalpías específicas de los productos gaseosas. $\Delta T = T_2 - T_1$, T_2 , es la temperatura de gasificación en la zona de reducción; T_1 es la temperatura ambiental en la zona de reducción.

Eq. (13) se puede simplificar a:

$$dH_{wood} + wdH_{H_2O(1)} = x_1 dH_{H_2} + x_2 dH_{CO} + x_3 dH_{CO_2} + x_4 dH_{H_2O(1)} + x_5 H_{CH_4} + 3.76mdH_{N_2} \quad (15)$$

Donde dH (para cualquier gas), es la formación de calor + cambio de entalpía

$$dH_{(for any gas)} + H_f^O + \Delta H, \quad \Delta H = \Delta T(C_{p(g)}), \quad (16)$$

$$dH_{H_2O(l)} = H_{fH_2O(1)}^O + H_{vap},$$

$$dH_{biomasa} = H_{fbiomasa}^O.$$

Eqs. (8)-(12) y (15) representan seis ecuaciones con seis incógnitas. Dos de las ecuaciones. (11) y (12), son ecuaciones monolineales mientras que el resto son ecuaciones lineales. Las ecuaciones del sistema anterior se pueden reducir a sus conjuntos de ecuaciones, una lineal y dos ecuaciones monolineales.

$$x_5 = 1 - x_2 - x_3. \quad (17)$$

De la eq. (8) se obtiene:

$$x_4 = w + 0.72 - x_1 - 2x_5. \quad (18)$$

Sustituyendo la Eq. (17) en la Eq. (18) resulta:

$$x_4 = w + 0.72 - x_1 - 2(1 - x_2 - x_3) \Rightarrow x_4 + 2x_2 + 2x_3 + w - 1.28. \quad (19)$$

De la Eq. (10) se obtiene:

$$m = 1/2(x_2 + 2x_3 + x_4 - w - 0.66) \quad (20)$$

La sustitución en la Eq. (20) resulta:

$$m = 1/2(-x_2 + 2x_3 - x_1 + 2x_2 + 2x_3 + w - 1.28 - w - 0.16) \Rightarrow m = 1/2(-x_1 + 3x_2 + 4x_3 - 1.94) \quad (21)$$

De la Eq. (11),

$$x_5 = x_1^2 K_1. \quad (22)$$

Sustituyendo la Eq. (17) en la Eq. (22) nos da:

$$1 - x_2 - x_3 = x_1^2 K_1 \Rightarrow x_1^2 K_1 + x_3 + x_3 - 1 = 0 \quad (23)$$

De la Eq. (12),

$$x_3 x_3 = x_2 x_4 K_2 \quad (24)$$

Sustituyendo la Eq. (18) en la Eq. (24) resulta:

$$x_3 x_3 - x_2(-x_1 + 2x_2 + 2x_3 + w - 1.28)K_2 = 0 \\ \Rightarrow -K_2(x_2 x_1) + (w - 1.28)K_2(x_2) + 2K_2(x_2)^2 - (x_2 x_3) + 2K_2(x_2 x_3) = 0 \quad (25)$$

Sustituyendo la Eqs. (17), (19) y (21) en la Eq. (15) resulta:

$$\begin{aligned}
& x_1 dH_{H_2} + x_2 dH_{CO} + x_3 dH_{CO_2} + (-x_1 + 2x_2 + 2x_3 + w - 1.28)dH_{H_2O(g)} \\
& \quad + (1 - x_2 - x_3)dH_{CH_4} + 3.76 \frac{1}{2}(-x_1 + 3x_2 + 4x_3 - 1.94)dH_{N_2} - dH_{wood} \\
& \quad - wdH_{H_2O(1)=0} \\
\Rightarrow & (dH_{H_2} - dH_{H_2O(g)} - 1.88dH_{N_2})x_1 + (dH_{CO} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 5.64dH_{N_2})x_2 + \\
& (dH_{CO_2} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 7.52dH_{N_2})x_3 (dH_{H_2O(g)} - dH_{H_2O(1)})w + x_1 dH_{CH_4} - \\
& 1.28dH_{H_2O(g)} - 3.6472dH_{N_2} - dH_{wood} = 0 \tag{26}
\end{aligned}$$

Se puede simplificar la Eq. (26), las constantes conocidas se simplifican de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
A &= dH_{H_2} + dH_{H_2O(g)} - 1.88dH_{N_2} \\
B &= dH_{CO} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 5.56dH_{N_2} \\
C &= dH_{CO_2} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 7.52dH_{N_2} \\
D &= dH_{H_2O(g)} - 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 7.52dH_{N_2} \\
E &= dH_{CH_4} - 1.28dH_{H_2O(g)} - 3.6472dH_{N_2} - dH_{wood}
\end{aligned}$$

Por lo tanto, Eq. (26) se simplifica a:

$$Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 + Dw + E = 0 \tag{27}$$

Los sistemas de ecuaciones restantes son 3, dos ecuaciones no lineales (23) y (25), y una ecuación lineal (27). El conjunto de ecuaciones se resuelve utilizando el método de Newton-Raphson en el software EES.

3.2.10. Determinación de porcentajes de productos gaseosos

Se determina las presiones parciales de los gases en los productos de la reacción con una presión total de 101,325 kPa.

$$P_{xi} = P_{tot} * (n_{xi}/n_{tot})$$

Ecuación 27-3.

Estas presiones junto con el balance de masa realizado en el punto 3.2.7, por despeje de ecuaciones se obtienen el número de moles presentes en la mezclade gases productos.

Posterior junto con el las fórmulas del cálculo de K1 y K2 en función del número de moles se plantea la fórmula de las cantidades máxicas existentes en cada especie gaseosa en la mezcla de gases producido en el proceso de gasificación, en kg por kmol de biomasa (kg/kmol biomasa)

$$m_{xi} = n_{xi} * (masa molar de x_i)$$

Ecuación 28-3.

Para el cálculo final de la cantidad porcentual de cada uno de los productos se debe considerar que la masa total de los productos es la suma individual de cada uno de sus masas previamente calculadas con la ecuación 36-3.

$$m_{tot} = m_{H_2} + m_{CO} + m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{CH_4} + m_{H_2S} + m_{N_2} + m_{O_2}$$

Ecuación 29-3.

Finalmente, el cálculo porcentual de cada una de las especies se realiza en base a la ecuación siguiente:

$$X_i(\%) = \frac{m_{xi}}{m_{tot}} * 100$$

Ecuación 30-3.

3.2.11. Solución del modelo en el software EES.

EES es un programa general de resolución de ecuaciones que puede resolver numéricamente miles de ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales acopladas.

El programa también puede utilizarse para resolver

- Ecuaciones diferenciales e integrales,
- Hacer optimización,
- Proporcionar análisis de incertidumbre,
- Realizar regresiones lineales y no lineales,
- Convertir unidades,
- Verificar la coherencia de la unidad y
- Generar una ventana de resultados
- La resolución se realiza solo si el número de incógnitas es igual al número de ecuaciones planteadas.

Una característica importante del software EES es la base de datos termodinámica de alta exactitud y propiedades de transporte que se proporciona para cientos de sustancias de una manera que permite que se utilice con la capacidad de resolución de ecuaciones (Engineering Equation Solver, 2016).

El planteamiento con el cual se desarrolló el modelo matemático se encuentra en el ANEXO A.

3.2.12. Validación

La extensión, desarrollo y utilidad del modelo matemático puede ser evaluado comparando los resultados arrojados por el modelo con datos experimentales obtenidos bajo parámetros similares. En este modelo, los parámetros que gobiernan el proceso son el contenido de humedad (MC) y la relación aire combustible o relación de equivalencia (ER ó ϕ). Por ende, el rendimiento del modelo se basa en la predicción de la composición del gas de síntesis, el poder calorífico y la temperatura de gasificación y se confrontaron los resultados con los reportados en la literatura de referencia descrita en el capítulo 2.

3.2.12.1. Comparación composiciones del gas

La composición del gas producido es determinada principalmente por la composición química de la biomasa, contenido de humedad y la relación de equivalencia. Así, con parámetros de procesos y composiciones químicas de biomasa similares, un modelo matemático puede predecir composiciones y temperatura de proceso similares a los datos experimentales.

Los resultados del modelo muestran que la composición del gas producido es H₂, CO, CO₂, CH₄, N₂ y H₂O. La composición molar o volumétrica del gas xi se determinó para facilitar los cálculos y la comparación con datos experimentales empleados de la literatura técnica como una mezcla de gases seca, sin embargo, la composición de N₂ no se puede descartar ya que está desempeña un papel importante en la dilución del gas producido.

La variación del siguiente modelo se prueba con varios parámetros de un proceso experimental, los resultados se presentan en la tabla 17-3. Los datos arrojados por el modelo tienen un error promedio <10%, este error se calculó utilizando la ecuación (5.02).

$$error (\%) = \frac{|n_{i, modelo} - n_{i, experimental}|}{n_{i, experimental}}$$

Ecuación 31-3.

3.3. Metodología para el dimensionamiento del proceso de aprovechamiento energético

Par el dimensionamiento del proceso en general del aprovechamiento energético se tuvieron en cuenta aspectos como: sencillez y tiempo de construcción, así como la accesibilidad en función del tamaño del equipo y los requisitos de material óptimos para la implementación y generación y producción suficiente de gas para hacer funcionar el motor en caso de falla.

3.3.1. Proceso de gasificación

Las principales características del generador de gas son:

- Entrada de aire central, ubicada en la parte superior de la unidad, donde la tubería utilizada puede moverse libremente verticalmente para ajustar la distancia entre la salida del gasificador y el extremo del tubo de entrada de aire del gasificador.
- La cámara de combustión y el reductor, así como el cilindro interior, están hechos de acero A-36 de 4 mm de espesor.
- El material refractario se coloca entre el cilindro y la cámara de combustión y el reductor.

- La rejilla de la cámara reductora se puede mover verticalmente fácilmente para cambiar la altura de la cámara.
- La válvula de compuerta de alimentación de biomasa y la válvula de compuerta de eliminación de cenizas tienen un sistema de bridas para evitar fugas de gas.

Para la propuesta de construcción de las cámaras de combustión y reducción se determinó un consumo de biomasa de 25 kg/h en proceso discontinuo, una capacidad de producción de gas 7 a 60 m³/h, con base a estas consideraciones, se tiene las siguientes dimensiones de cámara de combustión y reducción.

Tabla 3-9: Dimensiones iniciales del tipo de gasificador elegido

Tipo de gasificador	Principales dimensiones del corazón y la zona de reducción (mm)							Producción del gas (m ³ /h)		Consumo de biomasa en carga máxima (kg/h)
	Dh	dt	Hnt	hr	N	Dn	Ln	Max	Min	
Dowdraft	370	80	125	205	7	9	60	60	7	25

Fuente: (FAO, 1986, p. 53)

Además, la cámara de combustión debe tener una pendiente de 45° a 60° para un mejor flujo de biomasa hacia la garganta y para evitar el bloqueo de la garganta. La razón por la cual el ángulo de la cámara de combustión es de 60°.

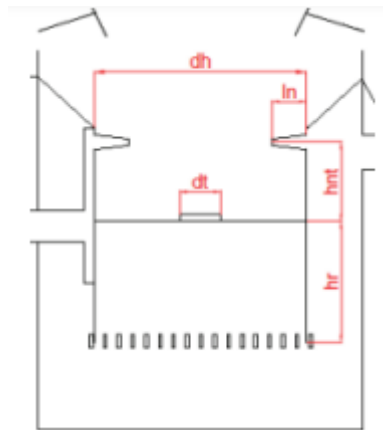


Ilustración 3-4: Dimensiones zona de combustión y reducción.

Donde:

Dh = diámetro de la cámara de combustión

dt = diámetro de la garganta

Hnt = altura de las toberas que inyectan aire al gasificador

hr = altura de la cámara de reducción

Nt = número de toberas

dn = diámetro de una sola tobera

L_n = longitud de penetración de las toberas de inyección de aire en el gasificador (no aplicada para una entrada central de aire)

3.3.1.1. Altura cámara de residuos

Es necesario conocer primero la cantidad de residuos que se generan por la gasificación de biomasa, por lo que se determinó mediante experimentación que de 5 kg de biomasa se generan 0,241 Kg de residuos (cenizas y carbón).

Por lo tanto, de la gasificación de 16 000 Kg de biomasa se producen 771,2 kg de residuos.

En primer lugar, se debe calcular el volumen de los residuos con base en la siguiente formula:

$$v_{residuos} = \frac{\text{masa de residuos}}{\rho_{carbón}}$$

Ecuación 32-3.

Donde:

$\rho_{carbón}$: es la densidad del carbón

Se toma en cuenta solo esta densidad debido a que es la especie que ocupa mayor volumen, según varios autores la densidad del carbón va de 0,20 a 0,26 g/cm³, se tomó un valor promedio de 0,23 g/cm³.

$$v_{residuos} = \frac{771,2 \text{ kg}}{0,00023 \text{ kg/cm}^3}$$

$$v_{residuos} = 335 \ 3043,47 \text{ cm}^3$$

Si se toma en cuenta que los valores iniciales de la tabla 16-3 son para un dimensionamiento de un gasificador de 25 kg la siguiente tabla representa las dimensiones para una carga inicial de 16 000 kg.

Tabla 3-10: Dimensiones finales del tipo de gasificador elegido.

Tipo de gasificador	Principales dimensiones del corazón y la zona de reducción (mm)							Producción del gas (m ³ /h)		Consumo de biomasa en carga máxima (kg/h)
	Dh	dt	Hnt	hr	N	Dn	Ln	Max	Min	
Downdraft	236800	51200	80000	131200	4480	5760	38400	38400	4480	16000

Realizado por: Castro Daniela, 2023

El gasificador tiene un cilindro con un diámetro de 23680 cm por lo que se puede calcular la altura de la siguiente formula:

$$\pi * r^2 * h_{gasificador} = v_{residuos}$$

$$h_{gasificador} = \frac{v_{residuos}}{\pi * r^2}$$

$$h_{gasificador} = \frac{335\,3043,47\,m^3}{\pi * (11840\,cm)^2}$$

$$h_{gasificador} = 3136\,cm$$

$$h_{gasificador} = 31,36\,m$$

La cámara de combustión se calcula de la siguiente manera:

$$h_{ccombustión} = 5 * h_{gasificador}$$

$$h_{ccombustión} = 5 * 31,36\,m$$

$$h_{ccombustión} = 156,8\,m$$

3.3.1.2. Altura del depósito de la biomasa

Se debe determinar el volumen con la masa de la carga inicial y la densidad de la biomasa que es de

$$v_{biomasa} = \frac{16\,000\,kg}{0,00142\,kg/cm^3}$$

$$v_{biomasa} = 11267605,63\,cm^3$$

El equipo de gasificación se considera un cilindro por lo que se puede calcular la altura

$$\pi * r^2 * h_{depósito} = v_{biomasa}$$

$$h_{depósito} = \frac{v_{residuos}}{\pi * r^2}$$

$$h_{depósito} = \frac{11267605,63\,cm^3}{\pi * (11840\,cm)^2}$$

$$h_{depósito} = 0,0255\,cm$$

$$h_{depósito} = 2,55\,m$$

3.3.2. Limpieza y acondicionamiento del gas

La “Bag House filter” es un sistema de filtración desarrollado por la Universidad Técnica de Dinamarca. El sistema de limpieza está formado por un intercambiador de calor, el cual baja la temperatura por encima del punto de rocío (alrededor de 90°C). Luego se limpia en un filtro de tela (Bag house filter), para ser enfriado a una temperatura de 50 °C y remover lo condensado.

Posteriormente pasa por un filtro de “Catridge” para asegurar que todas las partículas condensadas han sido removidas. El gas es impulsado por una bomba hacia el motor.



Ilustración 3-5: Diagrama del sistema de limpieza y acondicionamiento del gas

3.3.3. Generación de energía eléctrica

Para la generación de energía eléctrica con la utilización del gas proveniente del proceso de gasificación de la cascarilla de arroz se utilizará un ciclo de Rankine. El gas ingresa a la turbina y la energía mecánica generada se transforma por el movimiento del eje en energía eléctrica a través del generador eléctrico.

La metodología utilizada para esta generación se detalla a continuación

3.3.4. Metodología de alimentación para una planta de generación de energía térmica que utiliza cascarilla de arroz como combustible de biomasa

La técnica trata de una propuesta de una planta de energía térmica que utiliza la energía térmica de la cascarilla de arroz para luego convertirla en electricidad, y analiza la cantidad de cascarilla de arroz que se debe poner en el proceso de gasificación para generar el vapor que necesita la turbina para alimentar generadores con cargas que puedan satisfacer las necesidades de electricidad de la empresa.

Posteriormente se analiza que porcentaje de cascarilla de arroz que se obtiene de la empresa Arrocería El Rey S.A. del proceso de pilado, es necesaria para cubrir la demanda como biocombustible en una planta de generación termoeléctrica.

Con el fin de analizar la cantidad de cascarilla de arroz necesaria para generar electricidad para satisfacer la demanda eléctrica específica, se decidió realizar cálculos basados en la demanda eléctrica real de la empresa representada en el ANEXO D.

3.3.4.1. Proceso de generación de energía de la central térmica de biomasa.

El proceso de producción de energía comienza con la extracción de cascarilla de arroz (biomasa) de la zona de pilado para ser transportada a la planta para su almacenamiento, acondicionamiento y aprovechamiento.

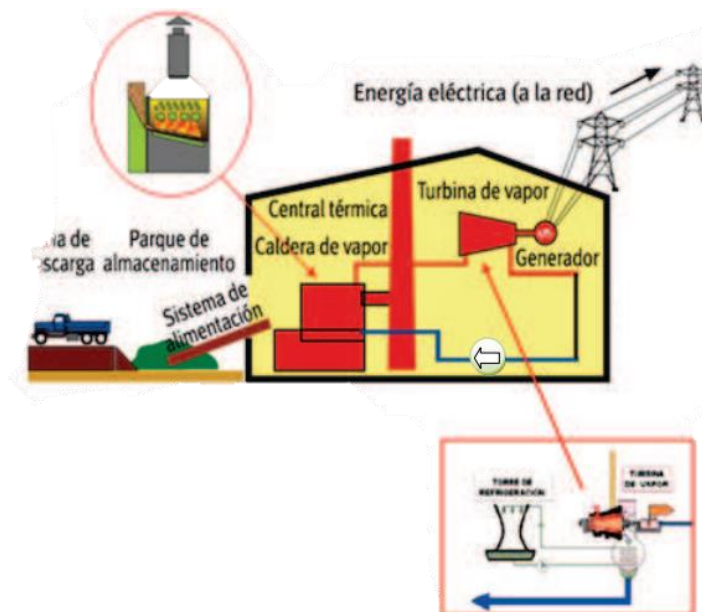


Ilustración 3-6: Esquema de una central de generación termoeléctrica con biomasa

Fuente: (Rendeiro , 2007)

La biomasa se utilizará como combustible en un gasificador (caldera) capaz de quemar grandes cantidades de cascarilla de arroz y quemarlas. A partir de ahí, los productos gaseosos serán producidos en la caldera a alta temperatura y presión por los numerosos dispositivos que los integran. Este vapor a una determinada presión y temperatura entra en la turbina generando energía mecánica. Un generador conectado a la salida de la turbina convierte la energía mecánica generada en la turbina en electricidad disponible en los terminales del generador, produciendo energía que eventualmente se conectará a la red eléctrica local.

3.3.4.2. Cálculos de la cantidad de cascarilla de arroz que se debe utilizar como biocombustible para generar electricidad.

Dependiendo del poder calorífico, del contenido de humedad de la biomasa, de la cantidad de aire empleada como comburente y el diseño del horno de combustión, se pueden alcanzar temperaturas de flama de unos 1650°C. Esta temperatura alcanzada y por tanto el calor generado debido a la exotermicidad de las reacciones de combustión, permiten que este proceso sea

integrado a un sistema de generación de energía eléctrica con un ciclo Rankine, ilustración 31-3, que genera gas de media y alta presión capaz de mover turbinas acopladas a generadores que producen la energía eléctrica

El gas de síntesis previamente purificado es enviado a una turbina de gas, generando energía eléctrica, ilustración 30-3.

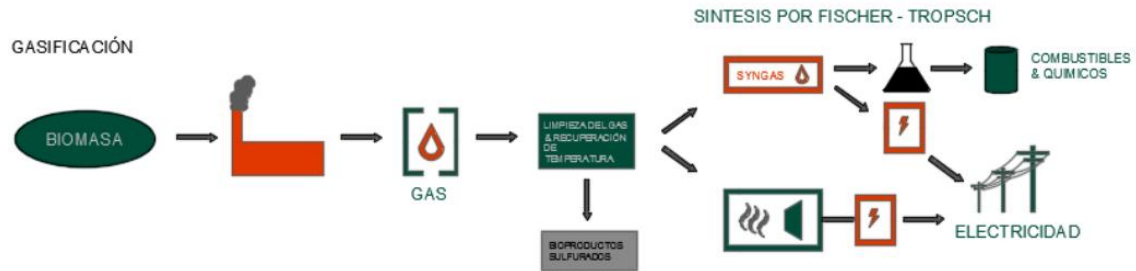


Ilustración 3-7: Esquema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa mediante gasificación.

En la ilustración 31-3 se puede observar que el gas obtenido de la gasificación tiene un proceso de limpieza o tratamiento previo a su uso para generación de energía eléctrica o para combustible o químicos.

En la siguiente tabla se representan los porcentajes de rendimiento global de una planta de generación de energía eléctrica con base al proceso que utilizan.

Tabla 3-11: Rendimiento global de planta equivalente para algunos procesos de conversión térmica de biomasa.

Proceso	Rendimiento global de planta equivalente η %
Combustión Directa (CD)	19,9
Gasificación y Turbina de Gas (GTG)	25 – 28
Gasificación y Ciclo Combinado (GCC)	35 – 40
Pirolisis y Ciclo Combinado (PCC)	31

Fuente: (ESIN CONSULTORA S.A., 2014), (Ganesh & Banerjee, 2001) y (Franco & Giannini, 2005)

Se ha considerado una central térmica de biomasa, con valores de presión, temperatura y entalpía que se muestran en la tabla 18-3.

Tabla 3-12: Valores de entalpia para los equipos que conforman el ciclo Rankine.

	1	2	3	4
Presión	75 kPa	1 MPa	1 MPa	75 kPa
T ° C	91,78	92	300	91,78
Entalpia h (kJ/kg)	384,39	385,35	3051,12	2549,06

Realizado por: Castro, Daniela, 2023.

Las propiedades de la cascarilla de arroz obtenidas previamente son las siguientes:

LHV= 13500 kJ/kg

Humedad (w) = 6,4 %

Densidad aparente (ρ_a)= 650 kg/m³

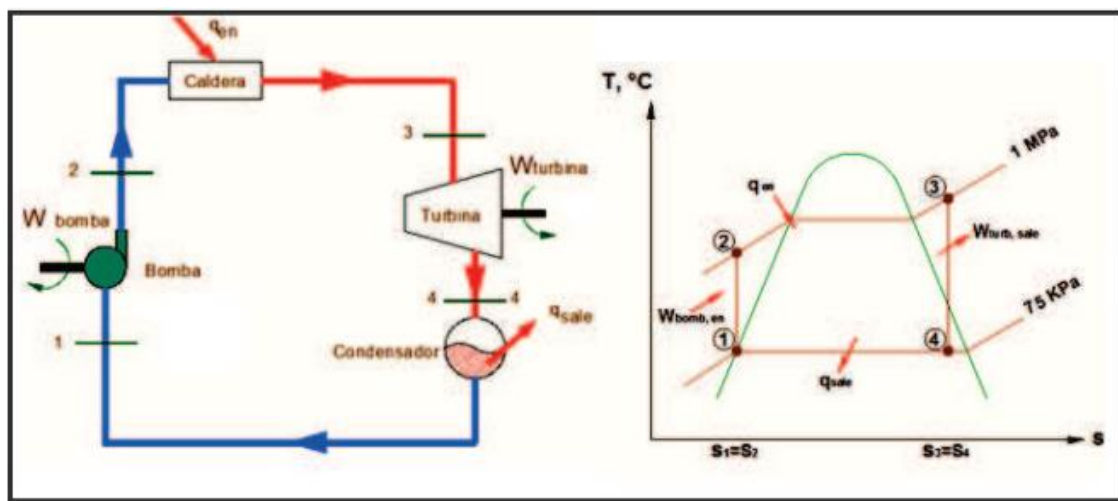


Ilustración 3-8: Modelo de Ciclo Rankine empleado para el dimensionamiento de la planta de biomasa.

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

3.3.4.3. Análisis del ciclo Rankine:

Estado 1:

Líquido saturado

TABLA A5, Termodinámica, Yunus A. Cengel-Michael A Boles, Cuarta Edición

$$T_1 = T_{sat} = 91,78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 75 \text{ kPa}$$

$$h_1 = 384,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = h_{f@75 \text{ kPa}}$$

$$v_1 = 0,001037 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = v_{f@75 \text{ kPa}}$$

Estado 2:

Líquido comprimido

$$\begin{aligned}P_2 &= 1 \text{ MPa} \\W_{bomba} &= h_2 - h_1 \\W_{bomba} &= v_1 (P_2 - P_1) \\h_2 &= v_1 (P_2 - P_1) + h_1 \\h_2 &= 0,001037 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * (100 - 75) \text{ kPa} * \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} * \text{m}^3} \\h_2 &= 385,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\W_{bomba} &= (h_2 - h_1) \\W_{bomba} &= (385,35 - 384,39) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\W_{bomba} &= 0,96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\end{aligned}$$

Estado 3:

Vapor sobrecalentado

TABLA A6, Termodinámica, Yunus A. Cengel-Michael A Boles, Cuarta Edición.

$$\begin{aligned}P_3 &= 1 \text{ MPa} \\T_3 &= 300 \text{ }^\circ\text{C} \\h_{3@1\text{MPa},T_3} &= 3051,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\s_3 &= 7,1229 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}\end{aligned}$$

Estado 4:

Mezcla saturada

TABLA A5, Termodinámica, Yunus A. Cengel-Michael A Boles, Cuarta Edición.

$$\begin{aligned}P_4 &= 75 \text{ kPa} \\s_3 = s_4 &= 7,1229 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\s_{f@75 \text{ kPa}} &= 1,2130 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\s_{fg@75 \text{ kPa}} &= 6,2434 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\h_{f@75 \text{ kPa}} &= 384,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\h_{fg@75 \text{ kPa}} &= 2278,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\x_4 &= \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{7,1229 - 1,2130}{6,2434} = 0,95 \\h_4 &= h_f + x_4 * h_{fg} \\h_4 &= h_f + x_4 * h_{fg} \\h_4 &= 384,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,95 * 2278,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\end{aligned}$$

$$h_4 = 2549,06 \frac{kJ}{kg}$$

Por tanto, la eficiencia del ciclo será:

$$q_{en} = h_3 - h_4$$

$$q_{en} = (3051,2 - 385,35) \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{en} = 2665,85 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{sal} = h_4 - h_1$$

$$q_{sal} = (2549,06 - 384,39) \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{en} = 2164,67 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{ciclo} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{ent}} = 1 - \frac{2164,67 \frac{kJ}{kg}}{2665,85 \frac{kJ}{kg}}$$

$$\eta_{ciclo} = 19 \%$$

Es decir, esta central térmica que emplea cascarilla de arroz como biocombustible convierte 19% del calor que recibe en la caldera en trabajo neto como lo menciona en la tabla 17-3.

3.3.4.4. Balance térmico grupo horno-caldera:

La expresión del balance consiste en escribir que la suma de las cantidades de calor que entran es igual a la suma de las cantidades de calor que salen

$$Q_{entra} = \sum Q_{sale}$$

Donde:

Q_{entra} = Cantidad de calor que entra.

Q_{sale} = Cantidad de calor que sale.

La cantidad de calor contenida en el vapor se obtiene por diferencia, es decir:

Donde:

$$Q_{sale} = Q_{entra} - Q_{perdidas}$$

Donde:

$Q_{perdidas}$ = Cantidad de calor perdido.

- **Cantidad de calor que entra en la instalación:**

Para calcular la energía calórica bruta $Q_{entrada}$ presente en estos residuos, se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_{entrada} = M_{biomasa} * LHV$$

Ecuación 33-3.

Donde:

$M_{biomasa}$ es la masa de la cascarilla de arroz

LHV es el poder calorífico inferior de la biomasa

La empresa arrocera El Rey S.A. tiene una producción diaria aproximada de 100 toneladas de arroz de las cuales aproximadamente el 16% es cascarilla por lo que:

$$M_{biomasa} = M_{arroz} * 16\%$$

$$M_{biomasa} = 100 \text{ ton} * 0,16$$

$$M_{biomasa} = 16 \text{ ton}$$

$$M_{biomasa} = 16000 \text{ kg}$$

El poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz calculado es de

$$Q_{entrada} = 16000 \text{ kg} * 13 \text{ 500 kJ/kg}$$

$$Q_{entrada} = 216 \text{ 000 000 kJ}$$

$$Q_{entrada} = 0,216 \text{ TJ}$$

Una vez calculado $Q_{entrada}$, se determina el potencial de generación de energía eléctrica efectivo P , que viene dado por:

$$P = K * Q * \eta$$

Ecuación 34-3.

Donde:

K es un factor de conversión con un valor de 277778 kW/TJ

η representa el rendimiento global de planta equivalente. Este último parámetro ha sido obtenido para algunos procesos de conversión térmica de biomasa como se indica en la Tabla 17-3:

$$P = 277778 \text{ kWh/TJ} * 0,216 \text{ TJ} * 19,9\%$$

$$P = 11940,00 \text{ kWh}$$

Posteriormente se calcula con el costo del kilovatio-hora en Ecuador el valor económico que se tendría en USD:

$$Ah = P * 0,092 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}}$$

Ecuación 35-4.

$$Ah = 11940 \text{ kWh} * 0,092 \text{ USD/kWh}$$

$$Ah = 1098,48 \text{ USD}$$

- **Porcentaje de pérdidas en el conjunto “horno-caldera”**

Se considera que en el conjunto horno-caldera se tienen pérdidas por diferentes factores como por combustión incompleta, por calor sensible de los gases de combustión, por purgas, por convección y radiación de la superficie de la Caldera, entre otras. De todas ellas se tiene un promedio de 23% de pérdidas totales como lo muestra en la ilustración siguiente.

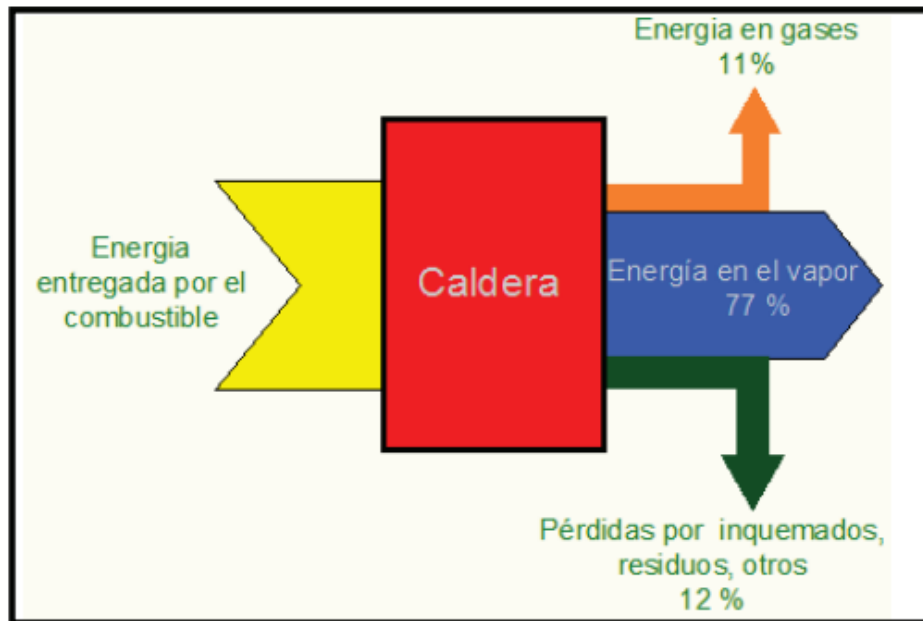


Ilustración 3-9: Balance de energía típico de una caldera

Fuente: (Echeverría Cruz & López Mena , 2010)

$$Q_{pérdida} = Q_{entrada} * 23\%$$

$$Q_{pérdidas} = 216\ 000\ 000\text{kJ} * 0,23 =$$

$$Q_{pérdidas} = 49\ 680\ 000\ \text{kJ}$$

- **Cantidades de calor que sale de la instalación**

$$Q_{sale} = Q_{entra} - Q_{pérdidas}$$

$$Q_{sale} = 216\ 000\ 000 - 49\ 680\ 000\ \text{kJ}$$

$$Q_{sale} = 166\ 320\ 000\ \text{kJ}$$

- **Rendimiento del grupo horno-caldera**

Es la relación entre la cantidad de calor suministrado al agua en la caldera para su transformación en vapor y la cantidad de calor que entra en el horno como resultado de la incineración de los residuos. En ausencia de recalentador de aire mediante vapor, el rendimiento del grupo horno-caldera se define como:

$$Re = \frac{Q_{sale}}{Q_{sale} + Q_{perdidas}}$$

Ecuación 36-3.

$$Re = \frac{166\,320\,000\text{ kJ}}{(166\,320\,000 + 49\,680\,000)\text{ kJ}} * 100$$

$$Re = 0,77 * 100$$

$$Re = 77 \%$$

- **Tasa de producción de vapor**

Es un parámetro representativo del conjunto horno- caldera que relaciona la cantidad de vapor producido y la cantidad de residuos quemados durante el mismo tiempo.

$$T = \frac{Q_{vapor}}{M_{biomasa}}$$

Ecuación 37-3.

Donde:

T = Tasa de producción de vapor

Q_{vapor} = Cantidad de vapor producido

M_{biomasa} = Masa de los residuos.

Se tiene por reemplazo que:

$$M_{biomasa} * LHV = Q_{vapor} * \Delta h + Q_{pérdidas}$$

Ecuación 38-3.

Despejando Q_{vapor}:

$$Q_{vapor} = \frac{M * LHV - Q_{pérdidas}}{\Delta h}$$

Ecuación 39-3.

Donde:

Δh = Diferencia de las entalpías del vapor producido.

Si se reemplaza la ecuación 37-3 en la ecuación 36-3 se obtiene la siguiente expresión

$$T = \frac{Q_{vapor}}{M_{biomasa}} = \frac{M_{biomasa} * LHV - Q_{pérdidas}}{\Delta h * M_{biomasa}} = \frac{1}{\Delta h} * LHV * \left(1 - \frac{Q_{pérdidas}}{M_{biomasa} * LHV}\right)$$

Y se tiene que:

$$1 - \frac{Q_{pérdidas}}{M_{biomasa} * LHV} = Re$$

Finalmente:

$$T = \frac{1}{\Delta h} * Re * LHV$$

Ecuación 40-3.

En esta forma, se ve que la tasa de vaporización depende del LHV de los residuos, que es un factor independiente de la instalación.

De los dos primeros factores, que se refieren a la instalación, el factor $1/\Delta h$ es una constante de y depende de las características adoptadas para el gas por lo que puede variar de un tipo de instalación a otra.

En cuanto al factor Re (rendimiento del conjunto horno-caldera), varía con el tiempo en una instalación determinada y si se dispone de sistemas que permita la recuperación de calor.

Si se reemplaza los valores en la ecuación 39-3 se obtiene:

$$Re = 0,77$$

$$PCI = 13.500 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h = h_3 - h_2 = (3051,2 - 385,35) = 2665,85 \text{ kJ/kg.}$$

$$T = \frac{1}{2665,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} * 0,77 * 13500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T = 3,89$$

Utilizando la ecuación 36-3 se puede calcular el flujo de vapor producido

$$T = \frac{\dot{Q}_{vapor}}{\dot{M}_{biomasa}}$$

Ecuación 41-3.

$$\dot{Q}_{vapor} = T * \dot{M}_{biomasa}$$

$$\dot{Q}_{vapor} = 3,89 * 16 \frac{\text{Tn}}{\text{día}}$$

$$\dot{Q}_{vapor} = 62,24 \frac{\text{Tn}}{\text{día}}$$

Es decir, con 16 Tn/día de cascarilla de arroz se obtiene 62,24 Tn/día de vapor en las condiciones previas indicadas.

- **Potencia neta**

La potencia neta necesaria para abastecer mensualmente a la empresa es de 6 6173 kW

$$P_{neta} = P_{generador} * P_{pérdidas}$$

Ecuación 42-3.

Donde:

$$P_{pérdidas} = 10\% * P_{neta}$$

$$P_{p\acute{e}rdidas} = 0,10 * 6\ 6173\ kW$$

$$P_{p\acute{e}rdidas} = 6\ 617,3\ kW$$

Reemplazando los valores

$$P_{generador} = 66\ 173\ kW + 6\ 617,3\ kW$$

$$P_{generador} = 72\ 790,3\ kW$$

Una vez calculado la potencia del generador se puede calcular tambi3n la potencia de la turbina.

$$P_{generador} = P_{turb} * \eta_{generador}$$

Ecuaci3n 43-3.

Donde:

$P_{generador}$ = Potencia del generador.

P_{turb} = Potencia de la turbina

$\eta_{generador}$ = Eficiencia del generador = 90 %

$$P_{turb} = \frac{P_{generador}}{\eta_{generador}}$$

$$P_{turb} = \frac{72\ 790,3\ kW}{0,950}$$

$$P_{turb} = 80\ 878,11\ kW$$

- **Potencia de la turbina**

La potencia de la turbina se calcula con la siguiente formula:

$$P_{turb} = Q_{vturb}(h_3 - h_4)$$

Ecuaci3n 44-3.

Donde:

Q_{vturb} = Caudal de vapor en la turbina.

Q_{vcald} = Caudal de vapor en la caldera.

$$Q_{vturb} = \frac{P_{turb}}{h_3 - h_4}$$

$$Q_{vturb} = \frac{80\ 878,11\ kW}{3051,2 - 2549,06 \frac{kJ}{kW}} * \frac{1 \frac{kJ}{s}}{1\ kW}$$

$$Q_{vturb} = 161,09 \frac{kg}{s} * \frac{3600\ s}{1\ h}$$

$$Q_{vturb} = 579\ 924 \frac{kg}{h}$$

$$Q_{vturb} = Q_{vcald}$$

$$Q_{vcald} = 579\,924 \frac{kg}{h}$$

Con este resultado se concluye que para abastecer la potencia requerida de 66173 MW es necesario generar alrededor de 549 322,69 kg/h de gas.

- **Trabajo de la turbina**

$$W_{turb} = h_3 - h_4$$

$$W_{turb} = (3051,2 - 2549,06) \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{turb} = 502,14 \text{ kJ/kg}$$

- **Energía obtenida por cada kg de cascarilla de arroz.**

En base al trabajo que realiza la turbina y empleando la relación:

16 000 kg/día de cascarilla de arroz generan 62 240 kg/día de vapor, se tiene:

$$502,14 \frac{kJ}{kg_{vapor}} * \frac{62\,240 \frac{kg_{vapor}}{día}}{16\,000 \frac{kg_{cascarilla}}{día}} = 1\,953,32 \frac{kJ}{kg_{cascarilla}}$$

Lo cual indica que por cada kg de cascarilla se obtiene una energía de alrededor de 1 953,32KJ.

- **Cascarilla de arroz necesaria para general 1MW**

Se considera el factor de conversión de:

$$1 \text{ MW de potencia equivalente a } 3,6 \times 10^6 \frac{kJ}{h}$$

Y al relacionar este valor con la cantidad de energía que se obtiene por cada kg de cascarilla se tiene:

$$\frac{3,6 \times 10^6 \frac{kJ}{h}}{1\,953,32 \frac{kJ}{kg_{cascarilla}}} = 1843,01 \frac{kg_{cascarilla}}{h}$$

Por tanto, se tiene que 1843,01 kg/h de cascarilla de arroz generan una potencia de 1 MW en una central termoeléctrica que emplea esta biomasa como biocombustible.

Si se realiza una relación de proporcionalidad para los 66 173 kW (66,173 MW)

$$1843,01 \text{ kg/h} \text{ ----- } 1 \text{ MW}$$

$$x \text{ ----- } 66,173 \text{ MW}$$

$$x = \frac{66,173 \text{ MW} * 1843,01 \text{ kg/h}}{1 \text{ MW}}$$

$$x = 121\,957,50 \frac{kg}{h} * \frac{12 \text{ h}}{1 \text{ día}} * \frac{1 \text{ Tn}}{1000 \text{ kg}}$$

$$x = 1\,463,49 \frac{Tn}{día}$$

Si se deseara abastecer toda la demanda energética de la empresa de 66,173 MW se debería tener una carga inicial de cascarilla de arroz de 1463,49 Tn/día se necesitaría para producir toda la cantidad de energía eléctrica que necesita toda la empresa para su proceso productivo.

- **Cascarilla de arroz necesaria en un año para generar 1MW**

La cantidad de biomasa empleada en un año para generar vapor en la caldera bajo las condiciones antes mencionadas, para así suministrar una potencia de 1 MW será alrededor de:

$$1843,01 \frac{kg}{h} * \frac{12 h}{1 día} * \frac{30 días}{1 mes} * \frac{10 meses}{1 año} * \frac{1 Tn}{1000 kg} = 6\,634,83 \frac{Tn}{año}$$

Tomando en cuenta que la central operará durante 12 horas diarias durante 10 meses al año.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Aplicación del modelo en gasificación de cascarilla de arroz

Con el modelo aprobado, los componentes iniciales del proceso de gasificación de cascarilla de arroz incluyen procesos como la determinación parámetros similares a los utilizados durante la autenticación se consideran contenido humedad, factor de equivalencia y coeficiente de variación adicional del aire al que se refiere a la cantidad de oxígeno en el aire. Esta variable va de 0 a 1, donde 0 es oxígeno de una fuente distinta del aire y 1 es el oxígeno del aire.

Al igual que ocurre con las referencias bibliográficas, existe un análisis fundamental y en profundidad biomasa, presentado en la tabla 20-4.

Tabla 4-1: Análisis último y próximo de cascarilla de arroz.

Parámetros		
Biomasa		Cascarilla de arroz
Análisis último	C	39,6
	H	4,94
	N	1,83
Fracción de masa en base seca (%)	S	0,40
	O	37,52
	Cenizas	19,39
Humedad (MC) (% b.s)		7,41
Poder calorífico inferior (MJ/kg)		14,42
Poder calorífico superior (MJ/kg)		15,58

Realizado por: Castro Daniela, 2023.

4.2. Resultados obtenidos de la modelación

Los datos obtenidos por el modelo matemático generado se presentan en la tabla 21-4 y el mismo que se encuentra en detalle en el Anexo A.

En la ilustración 37-4 se representa el cálculo de las constantes de reacción involucradas en el proceso de gasificación en las que por medio de un sistema de ecuaciones resultas con el método de Newton Raphson.

The screenshot shows a software window titled 'Main' with the following data:

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg									
CH4 = 0,4207	CO = -7,598	CO2 = 23,87	H2 = -1,035	H2O = 14,23	H2S = 0	K1 = 1,299	K2 = 0,3062	m = 2,238	
m _{CH4} = 1,415 [kg/kmol]	m _{CO} = -25,55 [kg/kmol]	m _{CO2} = 80,28 [kg/kmol]	m _{H2} = -3,481 [kg/kmol]	m _{H2O} = 47,88 [kg/kmol]	m _{H2S} = 0 [kg/kmol]	m _{H2} = 235,8 [kg/kmol]	m _{O2} = 0,000 [kg/kmol]	m _{tot} = 336,3 [kg/kmol]	
N2 = 70,11	n _{CH4} = 0,0882	n _{CO} = -0,9123	n _{CO2} = 1,824	n _{H2O} = -1,726	n _{H2S} = 0	n _{H2} = 2,657	n _{O2} = 8,417	n _{tot} = 0	
n _{tot} = 10,35	O2 = 0 [kg/kmol]	P _{CH4} = 0,8636 [kPa]	P _{CO} = -8,933 [kPa]	P _{CO2} = 17,86 [kPa]	P _{H2} = -16,9 [kPa]	P _{H2O} = 26,02 [kPa]	P _{H2S} = 0 [kPa]	P _{N2} = 82,42 [kPa]	
P _{O2} = 0 [kPa]	P _{tot} = 101,3 [kPa]	r _{air} = 1	u = 0	w = 0,2973	x = 1,62	y = 0,62	z = 0,005		

7 potential unit problems were detected.

EES suggested units (shown in purple) for m_{CH4} m_{CO} m_{CO2} m_{H2} m_{H2O} m_{H2S} .

Calculation time = ,0 sec.

Ilustración 4-3: Resultados de porcentajes en masa de cada una de las especies del gas producto

Realizado por: Castro Daniela, 2023

En la ilustración 38-4 se muestra los porcentajes obtenidos en el simulador de cada una de las especies de gas resultante y que se compararon con los obtenidos experimentalmente por análisis de cromatografía de gases.

4.3. Análisis de resultados

El gas obtenido tiene un porcentaje de 12,22% de H₂; 25,84 % de CO; 9,96% de CO₂ y 0,17% de CH₄, estos valores lo convierten en un gas pobre, pero con un poder calorífico superior de 4644,99 kJ/m³ e inferior de 4390,17 kJ/m³ lo que permite su utilización en diferente proceso de generación de energía.

Para el aprovechamiento energético del gas de gasificación de la cascarilla de arroz es necesario un pretratamiento para su limpieza y acondicionamiento. De igual manera se propone su acople a un sistema de generación de energía por turbina de gas que permitirá transformar la energía mecánica del movimiento del eje de la turbina, por generadores, en energía eléctrica en la que el calor de entra es de 0,216 TJ y considerando una pérdida del 23% , se obtiene una potencia de 11940 kWh que representa 1098,48 USD lo que es un ahorro representativo del 10% para la empresa.

Otros resultados obtenidos son que con 16 Tn/día de cascarilla de arroz se obtiene 62,24 Tn/día de gas en las condiciones previas indicadas, con este resultado se puede mencionar que para generar una potencia de 1 MW en una central termoeléctrica que emplea esta biomasa como biocombustible es necesario una masa de materia prima (cascarilla de arroz) de 1843,01 kg/h y

para abastecer la potencia requerida total de 66173 MW de la empresa sería necesario generar alrededor de 549 322,69 kg/h de gas.

De acuerdo tanto con la modelación matemática para la predicción de la composición porcentual de los gases de producto del proceso de gasificación de la cascarilla de arroz y el cálculo de los kilovatios-hora y su costo, la empresa Arrocera El Rey S.A. contaría con el estudio técnico para una propuesta de aplicación para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz y tener una base teórica para posterior el desarrollo del proyecto de construcción de un sistema de generación de energía eléctrica por gasificación y turbina de gas.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se aprovechó energéticamente la biomasa mediante un proceso de gasificación en un gasificador downdraft de lecho fijo en el que se obtuvo una mezcla de gases de H_2 , N_2 , O_2 , CH_4 , CO y CO_2 , para la generación de energía eléctrica por medio de un sistema de ciclo Rankine con turbina de gas como propuesta de aprovechamiento energético del residuo de cascarilla de arroz para la empresa Arrocería El Rey S.A.

Mediante el análisis de las propiedades físico químicas realizadas a la cascarilla de arroz se determinó que: su densidad es de $0,12 \text{ g/cm}^3$, una porosidad de la cascarilla cuando se encuentra compacta de $0,6375$ y cuando se encuentra suelta es de $0,9296$ en la que la variación se debe a que la fracción de espacios libres en la cascarilla suelta es mayor que en la cascarilla compacta. También se tipificó la biomasa con un contenido de humedad de $18,5\%$ que se considera normal para este tipo de biomasa y que influye en los cálculos tanto para el porcentaje de compuestos en el gas resultante como en el aprovechamiento energético en syngas, de igual manera el porcentaje de cenizas de $14,83\%$ es una variable de entrada para el modelamiento matemático del proceso de gasificación, finalmente el porcentaje de materia volátil de $61,34\%$ y porcentaje de carbono fijo de $15,42\%$ representa la manera en la que la biomasa evoluciona en las condiciones de gasificación de $101,3 \text{ kPa}$ y de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ y los compuestos que no son volatizados en este proceso. Finalmente, para el análisis elemental realizado en el laboratorio con los porcentajes de cada uno presente en la cascarilla de arroz se obtuvo que la fórmula química es de $C_{10}H_{1,62}O_{0,62}N_{0,005}S_{0,00}$.

Se determinó que las variables del proceso para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz para la obtención de la composición porcentual del gas fueron: el análisis elemental de la cascarilla de arroz, el porcentaje de humedad y cenizas y el poder calorífico superior (HHV) e inferior (LHV), también otras variables calculadas son las constantes estequiométricas de reacción de Bourdouard y water-gas shift K_1 de la es de $1,299$ y K_2 de $0,4083$ de la reacción de metanación, para el aprovechamiento energético se necesita la masa en kg de cascarilla de arroz que es de 16 Tn , su LHV, la eficiencia de ciclo de Rankine utilizado que fue de 19% en base a bibliografía y cálculos realizados y el costo del kWh en el país que es de $0,092 \text{ USD}$ y así se determinó que el calor de entra es de $0,216 \text{ TJ}$ y considerando una pérdida del 23% , se obtiene una potencia de 11940 kWh que representa $1098,48 \text{ USD}$ lo que es un ahorro representativo del 10% para la empresa.

La aplicación de cálculos de ingeniería para el dimensionamiento del proceso de aprovechamiento energético es crucial para garantizar la eficiencia y rentabilidad de cualquier proyecto de este tipo. Estos cálculos permiten determinar la cantidad de energía que puede ser aprovechada, así como la forma más efectiva y económica de hacerlo para un gasificador de tipo downdraft que procesará 16 000 kg de cascarilla se pudo determinar que a temperatura de trabajo del equipo está entre los 700 y 800 °C. Las mismas, que están en el rango donde se generan las reacciones para producir gas de síntesis.

El modelo matemático propuesto se validó a través del software EES y por comparación con modelos similares con biomásas diferentes encontrando un error porcentual de máximo 5%, y la validación económica del proceso se base en que el modelo propone una reducción de 10% del pago de energía eléctrica de la empresa por la transformación de biomasa en energía ya que se da un valor económico a un residuo.

5.2. Recomendaciones

Mediante el proyecto técnico realizado se implemente el proceso a través de un estudio de un diseño de la planta productora de energía eléctrica

La cascarilla de arroz previo al ingreso en el proceso se tenga un buen almacenamiento evitando la proliferación de hongos que pueden disminuir sus propiedades

La empresa a través del sistema de gestión empresarial y responsabilidad social podría abastecer de esta energía a las comunidades o barrios cercanos al lugar a través de iluminación de espacios recreativos

El desarrollo de nuevos proyectos de investigación como la aplicabilidad de los residuos de la gasificación de biomásas para la fabricación de cemento y hormigón de mejores cualidades.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ALEGRÍA CASTELLANOS, P.**, *Identificación y control de un gasificador de lecho fluidizado*. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. 2017.
2. **ANON.**, Una correlación unificada para estimar HHV de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. mayo, 81(8), pp. 1051-1063.
3. **ANON.**, Gasificación de biomasa en lecho fluidizado circulante. *Biomass and Bioenergy*, Febrero .26 (2).
4. **ANON.**, *Gas renovable*. [Online]
Available at: <https://www.gasrenovable.org/tipos-gas-renovable/gas-sintetico/>
5. **ARIAS GÓMEZ , J., VILLASÍS KEEVER, M. A. & MIRANDA NOVALES, M. G.**, The research protocol III: Study population. *Revista Alergia México* , 63(2), p. 201.
6. **ARIAS ORTIZ, R. A. & MENESES CRUZ, J. D.**, *Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016*. Managua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
7. **ASTM Internacional, n.d.** **ASTM D 3172-89: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke**, s.l.: s.n.
8. **ASTM**, *ASTM D 3176-89 Internacional Standards; Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and*, s.l.: ASTM.
9. **BARATIERI , M. et al.**, El uso de gas de síntesis de biomasa en motores de combustión interna y plantas CCGT: un análisis comparativo. *Ingeniería Térmica Aplicada*, Noviembre , 29(16), pp. 3309-3318.
10. **BARRIO , M., HUSTAD , J. & FOSSUM , M.**, A Small-Scale Stratified Downdraft Gasifier Coupled to a Gas Engine for Combined Heat and Power Production. In: *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. s.l.:s.n., p. Chapter 34.
11. **BASU, P.**, *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. s.l.:Elsevier.

12. **BRIDGWATER, A.**, The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation.. *Fuel* , 74(5), pp. 631-653,.
13. **BRIGHTWATER, A. V.**, The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel* , Mayo , 74(5), pp. 631-653.
14. **CONTEXTO GANADERO,** *CONtexto Ganadero.* [Online]
Available at: <https://www.contextoganadero.com/agricultura/conozca-otros-usos-que-se-le-pueden-dar-la-cascara-de-arroz>
15. **DESROSIERS, R.**, Thermodynamics of Gas-Char Reactions. In: *A Survey of Biomass Gasification: Principles of gasification.* Colorado : . Solar Energy Research Institute,.
16. **DI BLASI , C. & BRANCA , C.**, Modeling a stratified downdraft wood gasifier with primary and secondary air entry. *Fuel*, Volume 104 , pp. 847-860.
17. **DI BLASI, C.**, Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers. *Chemical Engineering Science*, Volume 55, pp. 2931-2944.
18. **DIAZ , X.**, *Modelo predictivo de combustión de la cascarilla de Arroz.* Guayaquil: ESPOL.
19. **ECHEVERRÍA CRUZ , M. A. & LÓPEZ MENA , A. O.**, *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.
20. **ESIN CONSULTORA S.A.**, *Atlas Bioenergético del Ecuador.* s.l.:Renovable.2014
21. **ETSY,** **n.d.** *Etsy.* [Online]
Available at: <https://www.etsy.com/es/listing/881249747/ceniza-de-cascara-de-arroz-quemada>
22. **FERNANDES , I. J. et al.**, Caracterización de cenizas de cascarilla de arroz producidas mediante diferentes técnicas de combustión de biomasa para energía. *Combustible*, 1 febrero , Volume 165 , pp. 351-359 .
23. **FRANCO, A. & GIANNINI, N.**, Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants. *International journal of thermal sciences*, 44(2), pp. 163-177.

24. **GANESH, A. & BANERJEE, R.**, Biomass pyrolysis for power generation—a potential technology. *Renewable Energy*, Volume 22, pp. 9-14.
25. **GAO, Y., GUO, X. & LIU, Y.**, Una utilización completa de la cáscara de arroz para evaluar bioactividades fitoquímicas y preparar nanocristales de celulosa. *Scientific Reports*, 11 Julio .8(10482).
26. **GARCÍA SUÁREZ, F., LANFRANCO, B. & HAREAU, G.**, Efecto sobre el comercio y bienestar de distintas estrategias tecnológicas para el arroz uruguayo.. 1 Junio .
27. **GILTRAP, D., MCKIBBIN, R. & BARNES, G.**, A steady state model of gas–char reactions in a downdraft gasifier. *Solar Energy*, 74(1), p. 85–91.
28. Gómez - Barea, A., Nilsson, S., Vidal Barrero, F. & Campoy, M., 2010. Devolatilization of wood and wastes in fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, Noviembre , Volume 91, pp. 1624-1633.
29. **HARGASSNER,** *Hargassner.* [Online]
Available at: <https://www.hargassner.es/2015/12/11/el-bajo-nivel-de-humedad-en-las-astilla-un-factor-clave-para-su-combustion/>
30. **HOEVEN, M. V.**, Panorama mundial de la energía 2022. *World Energy Outlook* , pp. 25-30 .
31. **IDAE**, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, ES, 2007. *Biomasa: Gasificación.*, España : IDAE.
32. **ISERN HIDALGO, X.**, n.d. *La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control.* [Online]www.energetica21.com
33. **JARUNGTHAMMACHOTE, S. & DUTTA, A.**, Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy* , 9 Agosto , 32(9), p. 1660–1669.
34. **JAYAH, T., AYE, L., FULLER, R. & STEWART, D.**, Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*, 4 febrero .p. 459 – 469.
35. **KNOEF, H.**, *Manual de gasificación de biomasa.* Meppel (Nederlands): BTG biomass technology group B.V.

36. **LESME-JAÉN , R. et al.**, Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso. *Revista de Tecnología Química* , Agosto , 36(2), pp. 133-144.
37. **MATHIEU, P. & DUBUISSON, R.**, Análisis de rendimiento de un gasificador de biomasa. *Conversión y gestión de energía*, 43(9-12), pp. 1291-1299.
38. Melgar , A., Pérez , J. F., Laget , H. & Horillo , A., 2007. Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process. *Energy Conversion and Management*, Volume 48 , pp. 59-67.
39. **MORO , L. E., VIAU , J. E., ZAMORANO , R. O. & GIBBS, H. M.**, Aprendizaje de los conceptos de masa, peso y gravedad.. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 4(2).
40. **ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL**, *Guía OIML G – 14:Medición de Densidad*. s.l.:Organización Internacional De Metrología LEGAL.
41. **OTZEN , T. & MANTEROLA , C.**, Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *Sampling Techniques on a Population Study*, 35(1), pp. 227-232.
42. **PRINS, M. J., PTASINSKI , K. J. & JANSSEN , F. J.**, Del carbón a la gasificación de biomasa: Comparación de la eficiencia termodinámica. *Energy*, Julio .32(7).
43. **PRINS, M., PTASINSKI, K. & JANSSEN, F.**, Termodinámica de las reacciones gas-carbón: análisis de la primera y segunda ley. *Ciencias de la ingeniería química*, 58(3-6), pp. 1003-1011.
44. **PUIG ARNAVAT , M.**, *Performance Modelling and Validation of Biomass Gasifiers for Trigeneration Plants*. Tarragona: Universitat Rovira I Virgili.
45. **RAUCH , R.**, *Biomass gasification to produce synthesis gas for fuels and chemicals*, s.l.: s.n.
46. **RENDEIRO , G.**, *Manual para elaboración de proyectos de centrales termoeléctricas con biomasa vegetal para comunidades aisladas de la amazonía*. Brasil: s.n.

47. **ROCA PÉREZ , L., LEÓN TAPIA , D., ANDRADE CADENA , J. V. & HERNÁNDEZ BOLUDA, R.,** Aprovechamiento de residuos orgánicos en distintos cultivos de Ecuador. *Revista de docencia, investigación y proyección social de la PUCE-SI (AXIOMA)*, 5 Octubre, Issue 16 , pp. 84-95.
48. **SHARMA, A. K.,** Equilibrium and kinetic modelling of char reduction reactions in a downdraft biomass gasifier: A comparison.. *Solar Energy*, 52(10), pp. 918-928..
49. **SPATH, P. & DAYTON , D.,** *Preliminary screening technical and economic assessment of synthesis gas to fuels and chemicals with emphasis on the potential for biomass-derived syngas.*, Golden Colorado: s.n.
50. **TP-LABORATORIO QUÍMICO,** n.d. *TP-Laboratorio Químico.* [Online] Available at: <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/horno-mufla.html>
51. **U.S. DEPARTMENT OF ENERGY,** *U.S. Energy Information Administration,* Washington,DC: s.n.
52. **VILLANUEVA PERALES , A. et al.,** 2008. *Directrices para la selección de estrategias de modelado de gasificadores.* Valencia, s.n., pp. 980-986.
53. **WANG, Y. & KINOSHITA, C.,** Kinetic model of biomass gasification. *Solar Energy*, 51(1), pp. 19-25.
54. **WOOLCOCK, P. J. & BROWN, . R. C.,** A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy* , 30 marzo .
55. **ZAINAL , Z., ALI , R., LEAN , C. & SEETHARAMU, K.,** Predicción del rendimiento de un gasificador downdraft utilizando modelos de equilibrio para diferentes materiales de biomasa. *Conversión y gestión de energía*, Agosto, 42(12), pp. 1499-1515.



Total 55 referencias bibliográficas

ANEXOS

ANEXO A: CÓDIGO DE MODELACIÓN MATEMÁTICA EN EES UTILIZADO PARA LA PREDICCIÓN CARACTERÍSTICAS DEL SYNGAS.

{Datos de la biomasa}

MC=7 {Contenido de humedad}

phi=0,245{=relación de equivalencia de AIRE}

{Datos fracción másica de cada elemento base seca. Análisis elemental de la biomasa}

C=50,70[%]

H=6,90[%]

N=0,30[%]

O=41,71[%]

S=0

cenizas_bm= 0,39 [%]

fm_C=C/100

fm_H=H/100

fm_O=O/100

fm_N=N/100

fm_S=S/100

fm_Cenizas=cenizas_bm/100

fm_tot=fm_C+fm_H+fm_O+fm_N+fm_S+fm_Cenizas

{Moles de cada elemento en 1kg de biomasa}

n_C=fm_C/12

n_H=fm_H/1

n_O=fm_O/16

n_N=fm_N/14

n_S=fm_S/32

n_total=n_C+n_H+n_O+n_N+n_S

{Fraccion molar de cada elemento en la biomasa}

fn_C = n_C/n_total

fn_H = n_H/n_total

fn_O = n_O/n_total

fn_N = n_N/n_total

fn_S = n_S/n_total

{Composicion química equivalente de la biomasa C Hx Oy N z Su}

FQcaBM\$ = 'C Hx Oy Nz Su'

$x = n_H/n_C$

$y = n_O/n_C$

$z = n_N/n_C$

$u = n_S/n_C$

{Peso molecular equivalente}

$PM_{eq} = 12 + 1*x + 16*y + z*14 + u*32$

{Humedad de la biomasa}

$BH_{biomasa} = MC/100$

$BS_{biomasa} = BH_{biomasa} / (1 - BH_{biomasa})$ {kg h2o / kg biomasa seca}

$mw = BS_{biomasa}$ {kg h2o / kg biomasa seca}

$w = mw * PM_{eq} / 18$ {kmoles de agua / kmol de biomasa seca}

{ESTIMACIÓN DE AIRE TEÓRICO}

{Ecuación estequiometrica biomasa equivalente: $CH_xO_yN_zS_u + a_T (O_2 + 3.76*r_{air} N_2) \rightarrow CO_2 + uH_2S + x/2 H_2O + (z/2 + 3.76) N_2$ }

$a_T = 1 + (x/4) + (z/2) - (y/2)$ {kmoles O2 teo / kmol comb}

$AC_t = (1 + 3.76*r_{air}) * a_T$ {relacion Aire/Combustible molar (A/C)tmolar : kmoles air/kmol comb}

{ $\phi = r_{eq} = (AC_{real} / AC_{teorico}) = (A_{real} / A_{teorico}) = (m_{air-real} / a_T) = \phi$ = relación de equivalencia r_{eq} se propone entre 0.3 a 0.5 para la gasificación}

$mol_{O_2} = \phi * a_T$ {kmoles de O2 / kmol equiv_biomasa para conseguir un valor de r_{eq} en la entrada al reactor de gasificación}

$m = mol_{O_2}$ { kmoles de O2 / kmol biomasa equivalente }

{ECUACIÓN BASE DE GASIFICACIÓN}

{ $1 CH_xO_yN_zS_u + m(O_2 + 3.76*r_{air} N_2) + wH_2O \rightarrow (n_{co2})CO_2 + (n_{h2o}) H_2O + (n_{n2}) N_2 + (n_{h2s}) H_2S + (n_{co}) CO + (n_{h2}) H_2 + (n_{ch4}) CH_4 + (n_{o2}) O_2$ }

{ r_{air} = factor de reacción con aire. Si $r_{air}=1$ el oxígeno libre es aportado solo por el aire ($O_2 + 3.76 N_2$). Si $r_{air}= 0$ el oxígeno libre no es aportado por el aire, si $0 < r_{air} < 1$ una fracción del oxígeno libre se aporta con el aire y otra se aporta como O2 puro}

{ $r_{air}=1$ reacción con aire}

{ $r_{air}=0$ reacción sin aire pero con O2}

$r_{air} = 1$

{BALANCE DE MASA DE CADA ELEMENTO}

$$\{\text{Para el N}\} z + 2 \cdot m \cdot 3,76 \cdot r_{\text{air}} = 2 \cdot n_{\text{N}_2}$$

$$\{\text{Para el S}\} u = n_{\text{H}_2\text{S}}$$

$$\{\text{Para el C}\} 1 = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{CH}_4}$$

$$\{\text{Para el H}\} x + 2 \cdot w = 2 \cdot n_{\text{H}_2\text{O}} + 2 \cdot n_{\text{H}_2} + 4 \cdot n_{\text{CH}_4} + 2 \cdot n_{\text{H}_2\text{S}}$$

$$\{\text{Para el O}\} y + 2 \cdot m + w = 2 \cdot n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}} + 2 \cdot n_{\text{O}_2}$$

$$\{\text{kmoles totales syngas}\} n_{\text{tot}} = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} + n_{\text{H}_2\text{S}} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{CH}_4} + n_{\text{O}_2}$$

{Presiones parciales de los gases en los productos de la reacción}

$$P_{\text{tot}} = 101,325 \text{ [kPa]}$$

$$P_{\text{H}_2} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{H}_2}/n_{\text{tot}})$$

$$P_{\text{CO}} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{CO}}/n_{\text{tot}})$$

$$P_{\text{CO}_2} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{CO}_2}/n_{\text{tot}})$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{tot}})$$

$$P_{\text{CH}_4} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{CH}_4}/n_{\text{tot}})$$

$$P_{\text{H}_2\text{S}} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{H}_2\text{S}}/n_{\text{tot}})$$

$$P_{\text{N}_2} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{N}_2}/n_{\text{tot}})$$

$$P_{\text{O}_2} = P_{\text{tot}} \cdot (n_{\text{O}_2}/n_{\text{tot}})$$

{RELACIÓN DE LAS CONSTANTES DE EQUILIBRIO}

$$T_k = 800$$

$$R_u = R \cdot \# \{\text{constante universal de los gases}\}$$

{(1) Reaccion de Boudouard: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ }

{Reacción : $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ }

{Combinacion Boudouard y water-gas shift reation WGSR: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ }

{Coeficientes de la reaccion estequiometrica $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ }

$$v_{\text{bw_co}} = 1$$

$$v_{\text{bw_h}_2\text{o}} = 1$$

$$v_{\text{bw_co}_2} = 1$$

$$v_{\text{bw_h}_2} = 1$$

{Relacion K1- energía libre Gibbs en equilibrio}

$$\Delta G_{\text{Go_T}_1} = (v_{\text{bw_h}_2} \cdot g_{\text{H}_2\text{T}} + v_{\text{bw_co}_2} \cdot g_{\text{CO}_2\text{T}}) - (v_{\text{bw_co}} \cdot g_{\text{CO}_\text{T}} + v_{\text{bw_h}_2\text{o}} \cdot g_{\text{H}_2\text{O}_\text{T}})$$

$$K_{1_p} = \exp(-\Delta G_{\text{Go_T}_1} / (R_u \cdot T_k))$$

$$K_{1_p} \cdot n_{\text{CO}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}} = n_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{H}_2} \quad \{(1) \text{ Constante de equilibrio. Combinacion Reacciones de Boudouard y "water-gas shift reation"}\}$$

{(2) Reaccion Metanación $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$ }

{Coeficientes de la reaccion estequiometrica de metanación: $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$ }

vm_ch4 =1

vm_c =1

vm_h2 =2

{Relacion K2- energia libre gibbs en equilibrio}

$DELTA_{Go_T_2} = (vm_ch4 * go_ch4_T) - (vm_h2 * go_h2_T)$

$K2_p = \exp(-DELTA_{Go_T_2} / (Ru * Tk))$

$K2_p * (n_h2)^2 = n_ch4 * n_tot$ {(2) Reaccion metanación}

{Restriccion para que no salga el oxigeno (reactivo límite)}

$n_{o2} = 0$ {el O2 debe ser un reactivo limite y debe consumirse completamente en el proceso de gasificación}

{DATOS TERMODINÁMICOS DE LAS ESPECIES EN EL SYNGAS}

{entalpias de formacion de cada uno de las especies en los Productos asumidos como gases ideales}

{1} hfo_h2 = enthalpy_formation(H2)

{2} hfo_co = enthalpy_formation(CO)

{3} hfo_co2 = enthalpy_formation(CO2)

{4} hfo_h2o = enthalpy_formation(H2O)

{5} hfo_ch4 = enthalpy_formation(CH4)

{6} hfo_h2s = enthalpy_formation(H2S)

{7} hfo_n2 = enthalpy_formation(N2)

{8} hfo_o2 = enthalpy_formation(O2)

{entalpia estandar molar h° en la temperatura de referencia T_o para cada una de las especies se supone igual a la entalpia estandar de formación h°_f }

{1} ho_h2 = enthalpy(H2;T=To)

{2} ho_co = enthalpy(CO;T=To)

{3} ho_co2 = enthalpy(CO2;T=To)

{4} ho_h2o = enthalpy(H2O;T=To)

{5} ho_ch4 = enthalpy(CH4;T=To)

{6} ho_h2s = enthalpy(H2S;T=To)

{7} ho_n2 = enthalpy(N2;T=To)

{8} ho_o2 = enthalpy(O2;T=To)

{Valor de la entalpia molar de los gases que componen el Syngas a la temperatura T[C]}

{1} h_h2 = enthalpy(H2;T=T)

{2} h_co = enthalpy(CO;T=T)

{3} h_co2 = enthalpy(CO2;T=T)

- {4} $h_{h_2o} = \text{enthalpy}(H_2O; T=T)$
- {5} $h_{ch_4} = \text{enthalpy}(CH_4; T=T)$
- {6} $h_{h_2s} = \text{enthalpy}(H_2S; T=T)$
- {7} $h_{n_2} = \text{enthalpy}(N_2; T=T)$
- {8} $h_{o_2} = \text{enthalpy}(O_2; T=T)$

{Cambio de la entalpía molar de cada uno de los componentes del syngas respecto a la del estado de referencia}

- {1} $\Delta h_{h_2} = h_{h_2} - h_{o_{h_2}}$
- {2} $\Delta h_{co} = h_{co} - h_{o_{co}}$
- {3} $\Delta h_{co_2} = h_{co_2} - h_{o_{co_2}}$
- {4} $\Delta h_{h_2o} = h_{h_2o} - h_{o_{h_2o}}$
- {5} $\Delta h_{ch_4} = h_{ch_4} - h_{o_{ch_4}}$
- {6} $\Delta h_{h_2s} = h_{h_2s} - h_{o_{h_2s}}$
- {7} $\Delta h_{n_2} = h_{n_2} - h_{o_{n_2}}$
- {8} $\Delta h_{o_2} = h_{o_2} - h_{o_{o_2}}$

{-----
-----}

{ANÁLISIS DE SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA }

{energías libres de Gibbs de formación de los compuestos $T_0=298\text{k}$, $P_0=101.325\text{kPa}$ }

{Datos de energía libre de gibbs de las sustancias tomados de

https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_enthalpy_of_formation}

$T_0=25[C]$

- {1} $g_{fo_{h_2}} = 0 \text{ [kJ/kmol]}$
- {2} $g_{fo_{co}} = -137160 \text{ [kJ/kmol]}$
- {3} $g_{fo_{co_2}} = -394390 \text{ [kJ/kmol]}$
- {4} $g_{fo_{h_2o}} = -228600 \text{ [kJ/kmol]}$
- {5} $g_{fo_{ch_4}} = -50500 \text{ [kJ/kmol]}$
- {6} $g_{fo_{h_2s}} = -33830 \text{ [kJ/kmol]}$
- {7} $g_{fo_{n_2}} = 0 \text{ [kJ/kmol]}$
- {8} $g_{fo_{o_2}} = 0 \text{ [kJ/kmol]}$

{entropías de formación de los compuestos s^{of} }

- {1} $s_{fo_{h_2}} = 0 \{ (h_{fo_{h_2}} - g_{fo_{h_2}}) / 298.15 \}$
- {2} $s_{fo_{co}} = (h_{fo_{co}} - g_{fo_{co}}) / 298,15$
- {3} $s_{fo_{co_2}} = (h_{fo_{co_2}} - g_{fo_{co_2}}) / 298,15$
- {4} $s_{fo_{h_2o}} = (h_{fo_{h_2o}} - g_{fo_{h_2o}}) / 298,15$
- {5} $s_{fo_{ch_4}} = (h_{fo_{ch_4}} - g_{fo_{ch_4}}) / 298,15$

$$\{6\} \text{ sfo_h2s} = (\text{hfo_h2s} - \text{gfo_h2s}) / 298,15$$

$$\{7\} \text{ sfo_n2} = 0 \{(\text{hfo_n2} - \text{gfo_n2}) / 298,15\}$$

$$\{8\} \text{ sfo_o2} = 0 \{(\text{hfo_o2} - \text{gfo_o2}) / 298,15\}$$

{entropias en el estandar en el estado de referencia (Tok=298.15K,Po=101.325kPa,)}

$$\{1\} \text{ so_h2} = \text{entropy}(\text{H2}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

$$\{2\} \text{ so_co} = \text{entropy}(\text{CO}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

$$\{3\} \text{ so_co2} = \text{entropy}(\text{CO2}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

$$\{4\} \text{ so_h2o} = \text{entropy}(\text{H2O}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

$$\{5\} \text{ so_ch4} = \text{entropy}(\text{CH4}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

$$\{6\} \text{ so_h2s} = \text{entropy}(\text{H2S}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

$$\{7\} \text{ so_n2} = \text{entropy}(\text{N2}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

$$\{8\} \text{ so_o2} = \text{entropy}(\text{O2}; \text{T}=\text{To}; \text{P}=101,325)$$

{entropias en el estandar en el estado de salida del Syn (Tk,Po=101.325kPa,)}

$$\{1\} \text{ s_h2} = \text{entropy}(\text{H2}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

$$\{2\} \text{ s_co} = \text{entropy}(\text{CO}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

$$\{3\} \text{ s_co2} = \text{entropy}(\text{CO2}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

$$\{4\} \text{ s_h2o} = \text{entropy}(\text{H2O}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

$$\{5\} \text{ s_ch4} = \text{entropy}(\text{CH4}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

$$\{6\} \text{ s_h2s} = \text{entropy}(\text{H2S}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

$$\{7\} \text{ s_n2} = \text{entropy}(\text{N2}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

$$\{8\} \text{ s_o2} = \text{entropy}(\text{O2}; \text{T}=\text{T}; \text{P}=101,325)$$

{Energias libres de Gibbs estandar en el estado de salida del Syn (Tk,Po=101.325kPa) con referencia a la energia libre de gibbs de fornacion std como productos formados en condicione a (To,Po)}

$$g(T) = h(T) - T*s(T) \implies g(T) = h^f + [h(T) - h(\text{To})] - T_k^* [s^f + (s(T) - s(\text{To}))]$$

$$\{1\} \text{ go_h2_T} = \text{hfo_h2} + (\text{h_h2} - \text{ho_h2}) - T_k^* (\text{sfo_h2} + (\text{s_h2} - \text{so_h2}))$$

$$\{2\} \text{ go_co_T} = \text{hfo_co} + (\text{h_co} - \text{ho_co}) - T_k^* (\text{sfo_co} + (\text{s_co} - \text{so_co}))$$

$$\{3\} \text{ go_co2_T} = \text{hfo_co2} + (\text{h_co2} - \text{ho_co2}) - T_k^* (\text{sfo_co2} + (\text{s_co2} - \text{so_co2}))$$

$$\{4\} \text{ go_h2o_T} = \text{hfo_h2o} + (\text{h_h2o} - \text{ho_h2o}) - T_k^* (\text{sfo_h2o} + (\text{s_h2o} - \text{so_h2o}))$$

$$\{5\} \text{ go_ch4_T} = \text{hfo_ch4} + (\text{h_ch4} - \text{ho_ch4}) - T_k^* (\text{sfo_ch4} + (\text{s_ch4} - \text{so_ch4}))$$

$$\{6\} \text{ go_h2s_T} = \text{hfo_h2s} + (\text{h_h2s} - \text{ho_h2s}) - T_k^* (\text{sfo_h2s} + (\text{s_h2s} - \text{so_h2s}))$$

$$\{7\} \text{ go_n2_T} = \text{hfo_n2} + (\text{h_n2} - \text{ho_n2}) - T_k^* (\text{sfo_n2} + (\text{s_n2} - \text{so_n2}))$$

$$\{8\} \text{ go_o2_T} = \text{hfo_o2} + (\text{h_o2} - \text{ho_o2}) - T_k^* (\text{sfo_o2} + (\text{s_o2} - \text{so_o2}))$$

{Definicion de las fracciones molares en base humeda xn[i]}

$$\text{xn_h2} = \text{n_h2} / \text{n_tot} * 100$$

$$\text{xn_co} = \text{n_co} / \text{n_tot} * 100$$

$$\text{xn_co2} = \text{n_co2} / \text{n_tot} * 100$$

$$\begin{aligned}x_{n_h2o} &= n_h2o/n_tot*100 \\x_{n_ch4} &= n_ch4/n_tot*100 \\x_{n_h2s} &= n_h2s/n_tot*100 \\x_{n_n2} &= n_n2/n_tot*100 \\x_{n_o2} &= n_o2/n_tot*100\end{aligned}$$

{Definicion de las fracciones molares en base seca $x_{ndry}[i]$ }

$$\begin{aligned}x_{nbs_h2} &= n_h2/(n_tot-n_h2o)*100 \\x_{nbs_co} &= n_co/(n_tot-n_h2o)*100 \\x_{nbs_co2} &= n_co2/(n_tot-n_h2o)*100 \\x_{nbs_h2o} &= 0 \\x_{nbs_ch4} &= n_ch4/(n_tot-n_h2o)*100 \\x_{nbs_h2s} &= n_h2s/(n_tot-n_h2o)*100 \\x_{nbs_n2} &= n_n2/(n_tot-n_h2o)*100 \\x_{nbs_o2} &= n_o2/(n_tot-n_h2o)*100\end{aligned}$$

{Cantidades másicas de cada especie gaseosa en la mezcla de gases producido en el proceso de

gasificación, en kg por kmol de biomasa [kg/kmol biomasa] }

$$\begin{aligned}m_h2 &= n_h2*molarmass(H2) \\m_co &= n_co*molarmass(CO) \\m_co2 &= n_co2*molarmass(CO2) \\m_h2o &= n_h2o*molarmass(H2O) \\m_ch4 &= n_ch4*molarmass(CH4) \\m_h2s &= n_h2s*molarmass(HydrogenSulfide) \\m_n2 &= n_n2*molarmass(N2) \\m_o2 &= n_o2*molarmass(O2)\end{aligned}$$

$$m_tot = m_h2 + m_co + m_co2 + m_h2o + m_ch4 + m_h2s + m_n2 + m_o2$$

{Definicion de las fracciones másicas en base húmeda $x_n[i]$ }

$$\begin{aligned}y_{m_h2} &= m_h2/m_tot*100 \\y_{m_co} &= m_co/m_tot*100 \\y_{m_co2} &= m_co2/m_tot*100 \\y_{m_h2o} &= m_h2o/m_tot*100 \\y_{m_ch4} &= m_ch4/m_tot*100 \\y_{m_h2s} &= m_h2s/m_tot*100 \\y_{m_n2} &= m_n2/m_tot*100 \\y_{m_o2} &= m_o2/m_tot*100\end{aligned}$$

{Definición de las fracciones másicas en base seca $x_{ndry}[i]$ }

$$y_{mbs_h2} = m_{h2}/(m_{tot}-m_{h2o}) * 100$$

$$y_{mbs_co} = m_{co}/(m_{tot}-m_{h2o}) * 100$$

$$y_{mbs_co2} = m_{co2}/(m_{tot}-m_{h2o}) * 100$$

$$y_{mbs_h2o} = 0$$

$$y_{mbs_ch4} = m_{ch4}/(m_{tot}-m_{h2o}) * 100$$

$$y_{mbs_h2s} = m_{h2s}/(m_{tot}-m_{h2o}) * 100$$

$$y_{mbs_n2} = m_{n2}/(m_{tot}-m_{h2o}) * 100$$

$$y_{mbs_o2} = m_{o2}/(m_{tot}-m_{h2o}) * 100$$

{Definición de las masas $m[i]$ de cada uno de los constituyentes del Syngas para la tabla de resultados}

$$m_{m_h2} = m_{h2}/PM_{eq}$$

$$m_{m_co} = m_{co}/PM_{eq}$$

$$m_{m_co2} = m_{co2}/PM_{eq}$$

$$m_{m_h2o} = m_{h2o}/PM_{eq}$$

$$m_{m_ch4} = m_{ch4}/PM_{eq}$$

$$m_{m_h2s} = m_{h2s}/PM_{eq}$$

$$m_{m_n2} = m_{n2}/PM_{eq}$$

$$m_{m_o2} = m_{o2}/PM_{eq}$$


$$m_{m_tot} = (m_{h2} + m_{co} + m_{co2} + m_{h2o} + m_{ch4} + m_{h2s} + m_{n2} + m_{o2})/PM_{eq}$$

$$T_n = 25 [C]$$

$$v_{n_tot} = (n_{tot} * R_u * T_n) / p_o$$

ANEXO B: CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EMPRESA ARROCERA EL REY S.A.

Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEEL EP - SUCLUISAL: Sector Eneas Varas, Calle Eugenio Espejo S/N y Fío Conzales - Telf: 062272241 Esmeraldas - Ecuador
 + FISC: 096859902001 / CONTRIBUYENTE ESPECIAL / RESOLUCIÓN N° 65 del 17-Marzo-2009



Matriz: Km. 6 1/2 Vía a la Costa,
Edificio GRACE Ceibos, piso 3
Guayaquil - Ecuador
Telf: (04) 3727710

Factura No. 002-999-010981652
 Número de autorización 0109202201096859902000120029990109816521449331019
 Ambiente PRODUCCION
 Emisión EMISION NORMAL
 Fecha de Autorización 07-09-2022 03:59:34

No. de Control: 40229517-15
 Valor a pagar: 11285.7

Fecha de Emisión: 01/09/2022

Fecha de Vencimiento: 17/09/2022

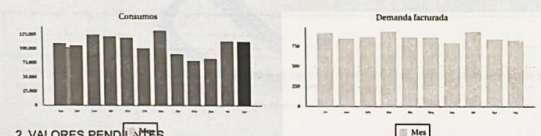
INFORMACIÓN DEL CONSUMIDOR

SUMINISTRO: 402295-5 ARROCERA EL REY S.A. ARROREY
 Código Único Eléctrico Nacional: 0900402295 Cédula / R.U.C.: 0992614935001 Cod. Postal:
 Dirección servicio: A 500 MTS. DE LEON G ORDILLO GUSTAVO VIA SALITR E
 Plan/Geocódigo: 8 98-90-040-0390 Tarifa: 927-Ind.Demanda reg. 4 horarios(Medla Tension)
 Provincia - Cantón - Parroquia: Guayas - Daule - Los Lojas (R)
 Dirección notificación: Domicilio Geocódigo postal:
 Ejecutivo de cuenta: AMIR RABIN CHEHAB GOMEZ
 Telfs: 2800277/2796986/2758083 ext: 000000
 e-mail: achehab@cnel.gob.ec

1. FACTURACIÓN SERVICIO ELÉCTRICO Y ALUMBRADO PÚBLICO


Medidor: 16951098-ELS Desde: 01/08/2022 Hasta: 01/09/2022 Días Facturados: 31 Tipo Consumo: Leído Constante: 1.00
 Factor de multiplicación: 700.00 Factor Corrección: 0.50 Factor Potencia: 0.95 Penalización FP: 0

Descripción	Actual	Anterior	Consumo	Unid.	Valores
Activa 08h00 - 18h00 (L-V) 08	3922.48	3827.93	66173	kWh	5935.72
Activa 18h00 - 22h00 (L-V) 18	410.48	403.45	4922	kWh	510.41
Activa 22h00 - 08h00 (L-V)* 2	2352.83	2299.70	37190	kWh	1863.22
Activa 18h00 - 22h00 (S-D-F)	104.77	102.92	1293	kWh	116.16
Reactiva 00h - 24h (L-D)	2682.15	2630.38	36240	kVArh	
Demanda 08h00 - 18h00 (L-V) 0	1.16		824	kW	
Demanda 18h00 - 22h00 (L-V) 1	0.38		257	kW	
Demanda 22h00 - 18h00 (L-V)*	0.88		601	kW	
Demanda 18h00 - 22h00 (S-D-F)	0.10		70	kW	
Maxima			824	kW	
Demanda Cliente			824	kW	



1.1 SERVICIO ELÉCTRICO Y SAPG	
VALOR CONSUMO	8425.51
DEMANDA	1885.31
COMERCIALIZACION	1.41
SUBTOTAL SERVICIO ELÉCTRICO (SE):	10312.23
SERV. ALUMBRADO PUB.	143.19
SUBTOTAL ALUMBRADO PÚBLICO (AP):	143.19
1.2 OTROS PAGOS SERVICIO ELÉCTRICO Y SAPG	
I.V.A. (0%)	0.00
SUBTOTAL OTROS:	0.00
TOTAL SE Y AP Y OTROS (1):	10455.42

SUBSIDIOS DEL GOBIERNO	
Tarifa Eléctrica	0.00
TOTAL:	0



2. VALORES PENDIENTES

CONCEPTO	VALOR
TOTAL VALORES PENDIENTES (2):	0.00

3. RECAUDACION TERCEROS SECTOR ELÉCTRICO - PLANES DE FINANCIAMIENTO


ESTOS VALORES NO FORMAN PARTE DE LOS INGRESOS DE LA EMPRESA ELÉCTRICA

CONCEPTO	SUSTENTO LEGAL	VALOR
RECAUDACIONES TERCEROS SECTOR ELÉCTRICO (3)		0.00

TOTAL			
Servicio Eléctrico y Alumbrado Público (1):			10455.42
Valores Pendientes (2):			0.00
Recaudación Terceros Servicio Eléctrico (3):			0.00
TOTAL SECTOR ELÉCTRICO (A) (1 + 2 + 3):			10455.42


FORMA DE PAGO

EFFECTIVO	DINERO ELECTRONICO	TARJETA DE CREDITO/DEBITO	OTROS
			10455.42



0109202201096859902000120029990109816521449331019

ANEXO C: ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ REALIZADO EN AGROCALIDAD (AGENCIA ECUATORIANA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGRO




Your complimentary use period has ended. Thank you for using PDF Complete.

[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Exports!](#)

LABORATORIO DE FERTILIZANTES

FORME DE ANÁLISIS

(Vía Intercoastal Km. 14, Granja del MAG, Tumbaco - Quito
Telef: 02-2372-645 Ext. 231)



Hoja 1 de 1

Informe N° 09170

Fecha del Informe: 06/08/09

Persona o Empresa solicitante: Manuel Antonio Echeverria Cruz

Dirección:

Parroquia: Chimbacalle

Provincia: Pichincha

Fecha de Ingreso de la muestra: 14/07/09

No. de Factura: 4886

Teléfono: 086920029

Cantón: Quito

País: Ecuador

Código (s) de muestra (s): 09587

DATOS DE LA MUESTRA:

Descripción: Se entregó al Laboratorio una muestra sólida en buen estado para control de calidad.

Inicio análisis: 21/07/09 **Fecha finalización análisis:** 23/07/09

Descripción de calidad

Fecha

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CALIDAD DE FERTILIZANTES

N°	NOMBRE MUESTRA	EXPRESIÓN	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO ANALÍTICO	FORMULACION TEORICA
7	CASCARILLA DE ARROZ	C	39.6	%	Volumétrico	---

RESERVACIONES:

El resultado se reportan en base a muestra seca a 60°C.

Elaborado por: Dra. Leticia Monard, Sra. Susana Izquierdo, Sr. Pablo Vela



COC MUESTRA

0958

C = Carb

OBSEI

Analiz

	LABORATORIO DE BROMATOLOGÍA	
	INFORME DE ANÁLISIS	
(Vía Interceánica Km. 14, Granja del MAQ, Tumbaco - Quito Telef. 02-2272-848 Ext. 235)		

Hoja 1 de 1
Informe N° B09048
Fecha del Informe: 17/07/09

Persona o Empresa solicitante: MANUEL ANTONIO ECHEVERRÍA CRUZ
Dirección: **Teléfono:** 08 6920 - 029
Provincia: PICHINCHA **Cantón:** QUITO
Procedencia: País: ECUADOR **Parroquia:** CHIMBACALLE **Localidad:**
Fecha de Ingreso de la muestra: 14/07/09
No. de Factura: 4886

DATOS DE LA MUESTRA:

Muestra: CASCARILLA DE ARROZ **Código No.:** B09096
Fecha inicio análisis: 17/07/09 **Fecha finalización análisis:** 23/07/09



e cascarilla de arroz, recibida en buen estado,

Descripción: Se entregó al Laboratorio 1 muestras d para análisis proximal completo.

S BROMATOLÓGICO

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

UNIDAD	MÉTODO ANALÍTICO	FORMULACIÓN TEORICA
%	Gravimétrico PEE/L-BF/03	---
%	Gravimétrico PEE/L-FBF/04	---
%	Kjeldahl PEE/L-FBF/01	---
%	Soxhlet PEE/L-BF/01	---
%	Gravimétrico PEE/L-BF/02	---
%	Cálculo	---

CODIGO MUESTRA	NOMBRE MUESTRA	EXPRESIÓN	RESULTADO
B09096	CASCARILLA DE ARROZ	Humedad	6.40
		Materia Seca	93.60
		Cenizas	23.94
		Proteína	4.58
		Grasa	0.59
		Fibra	58.74
		ENN*	12.15

*ENN= Elementos no nitrogenados

OBSERVACIONES:

* La humedad se realizó en base a muestra fresca

Persona o Empresa solicitante: MANUEL ANTONIO ECHEVERRÍA CRUZ
Dirección: Teléfono: 08 6920 - 029
Provincia: PICHINCHA Cantón: QUITO
Procedencia: País: ECUADOR Parroquia: CHIMBACALLE Localidad:
Fecha de Ingreso de la muestra: 14/07/09
No. de Factura: 4886



99193
 Fecha de recepción análisis: 23/07/09
 Descripción: Se entregó al Laboratorio 1 muestra de cascarilla de arroz, recibida en

DATOS DE LA MUESTRA:
Muestra: CASCARILLA DE ARROZ Código No.: F09193
Fecha inicio análisis: 17/07/09 Fecha finalización análisis: 23/07/09
Descripción: Se entregó al Laboratorio 1 muestra de cascarilla de arroz, recibida en buen estado, para análisis de calidad de foliares.

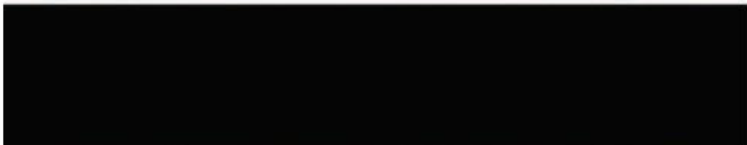
ANÁLISIS

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

COD MUESTRA	MÉTODO ANALÍTICO	NOMBRE MUESTRA	EXPRESIÓN	RESULTADO	UNIDAD
F09193	Gravimetría PEEL-FBF04	CASCARILLA DE ARROZ	Cenizas	0.24	%
			MO*	76.06	%
			NT*	1.83	%
			P*	0.05	%
	Kjeldahl PEE/L-FBF-01		K*	0.25	%
			Colorimétrico PEE/L-FBF-02	Ca*	0.09
	AA (flama)* PEEL-FBF-03		Mg*	0.06	%
			Fe*	122.44	PPM
			Mn*	184.91	PPM
			Cu*	0	PPM

OBSERVACIONES:
 • Los resultados de las muestras se expresan en base a muestra seca a 60°C y molida.

Analizado por: Egda. Hilda Lugo y Dr. Alonso Morillo,



Dr. Alonso Morillo
 Responsable Técnico




ANEXO D: ANÁLISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ REALIZADO EN PRONACA (PROCESADORA NACIONAL DE ALIMENTOS)



**PRONACA NEGOCIO PECUARIO
REPORTE DE ANALISIS**

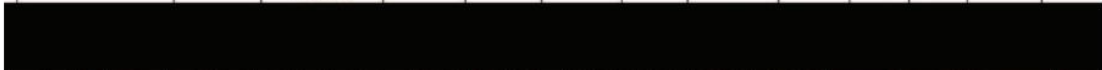
Reporte No: 130 Fecha recepción: 10 de marzo de 2009
Solicitado por: Ing. Fredy Males Fecha de entrega: 18 de mayo de 2009

a. DESCRIPCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

La muestra se recibe con identificación completa. La misma que no necesita tratamiento especial antes del análisis.
Descripción de las muestras. Las muestras analizadas son de color café oscuro con apariencia a cáscaras molidas.

b. RESULTADOS DE ENSAYOS FISICO-QUIMICOS

NOMBRE MUESTRA	No LOTE	Proveedor	Base cálculo	Humedad %	Grasa %	Ceniza %	Proteína %	Fósforo %	Fibra Cruda %	FDA %	FDN %
cascarilla 1	s/l	Piladora Manobanda Piladora	T.C.	8.41	0.2	14.83	2.59	0.012	32.02	67.59	74.58



l	Ventanas	T.C.	8.64	1.18	20.57	2.28	0.027	27.66	63.12	66.47	cascarilla 2	s
l	Piladora Jofre	T.C.	8.63	0.39	20.83	2.17	0.01	31.15	69.21	70.95	cascarilla 3	s

El análisis se realiza en muestra tal cual (TC)

Elaborado por: Lartha Yanez
Revisado por: Armita Mantilla

OBSERVACIONES: El análisis se realizó en muestra tal cual (TC)

Realizado por: Dra. M
Revisado por: Dra. C

Archivo: NA/RC-0702-P

Tienen validez solo para las muestras en condiciones específicas no siendo extensivo a cualquier lote. No se acepta responsabilidad por la muestra, identificada, almacenada y enviada a Pronaca. Los análisis se ejecutan bajo las mejores condiciones disponibles de Pronaca de arroz no es responsable de la interpretación que se da a los resultados. Este reporte se ha preparado exclusivamente para el uso del cliente y no puede ser reproducido o

Los datos expresados en este reporte forma en que la muestra haya sido to acuerdo a metodología aprobada. Pr cliente y no puede ser reproducido o

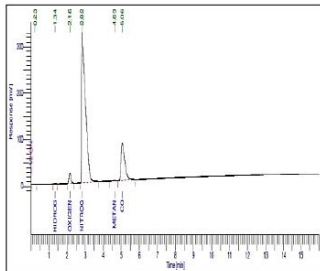
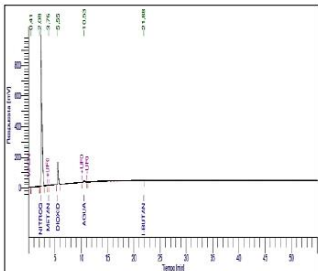

ANEXO E: EJEMPLO DE COMPARACIÓN DE COMPOSICIÓN EN BASE SECA DE GASES DE BIOMASA DE MADERA

		MC [%]	ϕ	H2 [%]	CO [%]	CO2 [%]	CH4 [%]	N2 [%]	Error Prom [%]
1	Experimental	12,5	0,375	13	19,1	10,7	1,2	56	
	Modelo			15,4	20,0	10	0,9	53,6	
	% Error			18,5%	4,9%	6,5%	20,8%	4,3%	11,0%
2	Experimental	13,8	0,324	12,7	22,1	10,5	1,3	53,4	
	Modelo			14,86	23,39	9,489	1,25	51,01	
	% Error			17,0%	5,8%	9,6%	3,8%	4,4%	8,1%
3	Experimental	14	0,364	12,5	18,9	8,5	1,2	59,1	
	Modelo			13,8	19,8	9,2	1,1	55,9	
	% Error			10,4%	5,1%	8,3%	2,5%	5,3%	6,3%
4	Experimental	14,7	0,377	17,2	19,4	9,7	1,1	52,6	
	Modelo			19,6	20,4	9,3	0,9	49,6	
	% Error			13,9%	5,4%	4,1%	10,0%	5,5%	7,8%
5	Experimental	14,7	0,296	15,5	19,1	11,4	1,1	52,9	
	Modelo			16,3	20,2	10,1	1,1	52,1	
	% Error			5,1%	5,8%	10,8%	5,4%	1,3%	5,7%
6	Experimental	15,2	0,337	13,2	19,7	10,8	1,3	55	
	Modelo			14,3	20,8	9,6	1,2	53,9	
	% Error			8,3%	5,9%	10,6%	3,8%	1,9%	6,1%
7	Experimental	16	0,350	18,3	20,2	9,7	1,1	50,7	
	Modelo			19,6	20,5	9,6	1,0	49,1	
	% Error			7,2%	1,5%	0,1%	6,3%	3,1%	3,6%
8	Experimental	16	0,312	17	18,4	10,6	1,3	52,7	
	Modelo			18,3	19,7	10,1	1,2	50,5	
	% Error			7,8%	7,2%	3,9%	6,9%	4,1%	6,0%
9	Experimental	18,5	0,323	17,2	19,6	9,9	1,4	51,9	
	Modelo			18,6	21,9	10,5	1,3	47,5	
	% Error			8,4%	11,8%	6,8%	7,1%	8,4%	8,5%

NEXO F: CROMATOGRAFÍA DE GASES OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

	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. Patú 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-022-85-01	Fecha de muestreo:	* 12/1/2023	
Tipo de muestra:	Gas de síntesis/ Biomasa de cascarrilla de arroz		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedral	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
	Agua		1,04	0,08
PROPIEDADES	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:	GABRIELA VANESSA PEREZ GURACUCHA		Revisado y aprobado por:	ANDRÉS GABRIEL CHICO PROANO
	Ing. Gabriela Pérez ANALISTAS DE LABORATORIO			Ing. Andrés Chico, MSc. COORDINADOR DEL LABORATORIO





Dirección: Quito | Ladrón de Guevara E11-253 | Edificio Nro. 17 | 5to. Piso
 Correo: a.instrumental@epn.edu.ec | Teléfonos: 022976300 ext. 4334 | 4332



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

Fecha de entrega: 12/07/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Daniela Elizabeth Castro Lozada
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniera Química
<p style="text-align: center;"> Ing. Mónica Lilian Andrade Avalos, Mgs Directora del Trabajo de Integración Curricular</p> <p style="text-align: center;"> Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes, MsC Asesor del Trabajo de Integración Curricular</p>