

Universidad de Matanzas
Sede “Camilo Cienfuegos”
Departamento Ingeniería Química
Facultad de Ciencias Técnicas



Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Químico.
Título: Evaluación de la eficiencia energética del gasificador de cáscara
de arroz (FBG-400) en la UEB Amarillas.

Autor: Pedro Luis Mayoz Vega

Tutores: MSc. Luis Cepero Casas

Ing. Lorena Gutiérrez Martínez

Matanzas, 2021

Declaración de Autoridad

Yo, Pedro Luis Mayoz Vega, declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo a la Universidad de Matanzas y a la Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey", que la misma sea utilizada como material de consulta.

Pedro L. Mayoz Vega

Nota de Aceptación

Presidente del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

“Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano”

Isaac Newton

Dedicatoria

A mi madre y mi padre, mi hermana y mis abuelos.

A mis tutores por su ayuda incondicional y mis profesores de la Universidad de Matanzas.

Agradecimientos

- A mi madre y toda mi familia en general que siempre me ofrecieron su apoyo incondicional, a lo largo de toda mi carrera como estudiante.
- A mis tutores Luis Cepero Casas y Lorena Gutiérrez Martínez por su ayuda y dedicación en la elaboración del presente Trabajo de Diploma.
- A todos los profesores que participaron en mi formación académica como Ingeniero Químico.
- A todos mis compañeros que me ofrecieron desinteresada ayuda, en especial a mi amigo angolano Adriano Harnilo Rodríguez.

A todos muchas gracias.

Resumen

La cáscara de arroz se usa como biomasa en aplicaciones, tanto domésticas como industriales. Algunos estudios han demostrado que sus propiedades térmicas sustentan su uso como fuente de energía para la combustión en hornos, calderas y turbinas; incluso a un nivel industrial, como sucede en la Empresa Agroindustrial de Granos de Matanzas, ubicada en la UEB Amarillas, del municipio Calimete.

El presente trabajo de diploma va dirigido a evaluar la eficiencia del gasificador de cáscara de arroz, modelo FBG-400, con este propósito se hizo la descripción del proceso tecnológico y se explican los métodos de ensayo para la caracterización fisicoquímica de la biomasa a utilizar (% de humedad, de cenizas, volátiles, carbono fijo, poder calorífico). Además, se realiza un balance de masa y energía para analizar la estabilidad del gasificador y la eficiencia.

Palabras claves: biomasa, gasificación, fuente de energía, proceso tecnológico

Abstract

Rice husk is used as biomass in both domestic and industrial applications. Some studies have shown that its thermal properties support its use as a source of energy for combustion in furnaces, boilers and turbines; even at an industrial level, as in the Matanzas Agroindustrial Grain Company, located in the UEB Amarillas, in the Calimete municipality.

This diploma work is aimed at evaluating the efficiency of the rice husk gasifier, model FBG-400, for this purpose the description of the technological process was made and the test methods for the physicochemical characterization of the biomass to be used are explained (% moisture, ash, volatiles, fixed carbon, calorific value). In addition, a mass and energy balance is performed to analyze the gasifier's stability and efficiency.

Keywords: biomass, gasification, energy source, technological process

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo I: Análisis bibliográfico.	4
1.1. Bioenergía	4
1.2. Biomasa.....	4
1.2.1. Clasificación de la biomasa.....	5
1.2.2. Principales componentes y características fisicoquímicas de la biomasa	7
1.2.3. Cáscara de arroz como materia prima en el proceso de gasificación.....	8
1.3. Procesos de conversión de la biomasa	10
1.4. Gasificación	11
1.4.1. Tipos de gasificadores	12
1.4.2. Etapas del proceso de gasificación.....	15
1.4.3. Agentes gasificantes.....	16
1.5. Gas de síntesis	17
1.5.1. Enfriamiento del gas de síntesis.....	18
1.5.2. Depuración y acondicionamiento del gas de síntesis	19
1.5.3. Aplicaciones del gas de síntesis.....	20
1.6. Caracterización de la UEB Amarillas del municipio de Calimete.....	20
Capítulo II: Materiales y métodos de investigación.	23
2.1. Métodos de ensayo para la caracterización físico-química de la cáscara de arroz	23
2.2. Descripción del proceso de gasificación de cáscara de arroz en el gasificador FBG-400 de la empresa hindú Ankur Scientific Energy Technologies	27
2.2.1. Sistema de alimentación	29
2.2.2. Tolva del gasificador.....	29
2.2.3. Reactor	29
2.2.4. Sistema de limpieza y enfriamiento del gas.....	30
2.3. Balance de masa y energía en el gasificador.....	33
2.3.1. Balance de masa.....	33
2.3.2. Balance de energía	34
2.3.3. Eficiencia del gasificador	35

Conclusiones.....	36
Recomendaciones	37
Bibliografías	38
Anexos.....	45

Introducción

El uso de combustibles fósiles para la generación de energía y sus consecuencias ambientales, ha motivado la investigación de nuevas fuentes energéticas que favorezcan la conservación del medio ambiente.

Actualmente, las energías eólica y fotovoltaica van a la cabeza del mercado de energías alternativas, de igual forma, el aprovechamiento de residuos agroindustriales, o biomasa, han mostrado también un crecimiento desde la década de los años noventa, esta situación es producida por las ventajas que ofrece en la optimización de procesos industriales y reducción de gases que contribuyen al efecto invernadero. (IDAE, 2007)

Hoy más que nunca es una necesidad el uso de fuentes renovables de energía que proporcionen bajas emisiones de los gases de efecto invernadero (Tamayo, *et al.* 2019). En este sentido, la producción de energía a partir de biomasa es una alternativa atractiva debido a su abundancia y manejabilidad (Tobío, *et al.* 2020).

Según Hawrot-Paw, *et al.* (2017) la biomasa para las personas fue la primera de las energías que se usó y fue por mucho tiempo la principal; además es la más extendida de sus formas. El cultivo anual de biomasa es de aproximadamente 220 mil toneladas y se estima que satisface las necesidades mundiales de energía entre el 10 y 14 %.

Según Kuba, *et al.* (2017), el cambio climático es parcialmente una consecuencia de la combustión de recursos fósiles, pero la creciente conciencia del calentamiento global ha aumentado la necesidad del desarrollo de nuevas tecnologías. La biomasa es la única fuente de carbono renovable que utiliza CO₂ como materia prima neutra para la combustión, siempre que se restablezca la misma cantidad que se usa.

La gasificación de la biomasa es una de las posibilidades reales a la contribución de la problemática de la necesidad energética, ya que está considerada una de las fuentes renovables limpias y sostenibles, su uso adecuado permiten el aprovechamiento de los recursos naturales, sin poner en peligro la seguridad alimentaria.

En Cuba existen algunas experiencias y centros que han estudiado y transferido algunas tecnologías de gasificación aprovechando la cooperación con proyectos

internacionales, como es CUBAENERGIA (Cuba el Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía), Universidad de Santiago de Cuba; José Antonio Echevarría y la Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey". Además, de un grupo de instalaciones operativas en mayor o menor medida; ejemplo de ellas son las más recientes instaladas en Molinos secadores de arroz en Los Palacios, Pinar del Río y en Secadero de Amarillas en Matanzas, que han demostrado su capacidad para sustituir de manera efectiva el uso del diésel en el secado de este grano utilizando cáscara de arroz.

La zona donde está ubicada la UEB Amarillas posee terrenos fértiles para la siembra y cultivo del cereal, por tal motivo es posible obtener como subproducto la cáscara de arroz. Con el uso de esta materia prima, se logra un ahorro de combustible durante el procesamiento industrial de este grano mediante la tecnología de gasificación, empleando como biomasa la cáscara del propio grano del arroz, logrando así de forma integrada cerrar sus propios ciclos energéticos y productivos, abaratando los costos de esta industria (Cepero e Iglesias, 2020).

A pesar de ser la gasificación de biomasa una tecnología madura y probada en el mundo y existir en Cuba ocho gasificadores en diferentes latitudes del país, no se ha estudiado la eficiencia que poseen estas tecnologías introducidas, por lo que no se puede realizar una valoración de su uso óptimo o no, entonces, teniendo en consideración el análisis realizado anteriormente, en este trabajo de diploma se plantea el siguiente Problema científico:

- ¿Cómo evaluar la eficiencia del gasificador de cáscara de arroz en la UEB Amarillas?

Para solucionar este problema se plantea la siguiente Hipótesis:

- Si se establece una metodología para la evaluación del gasificador FBG-400 se podrá demostrar la eficiencia energética del mismo.

Objetivo general:

- Proponer una metodología para evaluar la eficiencia energética del gasificador de cáscara de arroz FBG-400 de la UEB Amarillas del municipio de Calimete, provincia de Matanzas.

Objetivos específicos:

- 1- Caracterizar la biomasa (cáscara de arroz) como combustible.
- 2- Describir el proceso de gasificación de cáscara de arroz de la UEB Amarillas del municipio de Calimete.
- 3- Expresar cómo se realizarían los balances de masa y energía en el gasificador FBG-400 de la UEB Amarillas del municipio de Calimete.
- 4- Establecer la metodología para la determinación de la eficiencia energética del gasificador FBG-400 de la UEB Amarillas del municipio de Calimete.

Capítulo I: Análisis bibliográfico.

En este capítulo se define la biomasa y sus características para ser utilizada en la producción de energía, en específico la cáscara de arroz. Se aborda el proceso de gasificación y sus etapas, los tipos de gasificadores y agentes gasificantes. Además, se tratan aspectos sobre el gas de síntesis, su composición y su acondicionamiento para sus usos: enfriamiento, depuración y aplicaciones, así como una descripción de la UEB Amarillas del municipio de Calimete, donde se encuentra ubicado el gasificador FBG-400.

1.1. Bioenergía

Según Rincón y Silva, (2014) la bioenergía o energía de biomasa es un tipo de energía renovable procedente del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico, generalmente es sacada de los residuos de las sustancias que constituyen los seres vivos (plantas, animales, entre otros), o sus restos y residuos. El aprovechamiento de la energía de la biomasa se hace directamente (por ejemplo, por combustión), o por transformación en otras sustancias que pueden ser aprovechadas más tarde como combustibles o alimentos. En su más estricto sentido es un sinónimo de biocarburantes (combustibles derivados de fuentes biológicas). En su sentido más amplio abarca también la biomasa, el material biológico utilizado como biocombustible, así como la situación social, económica, científica y técnica relacionada con la utilización de fuentes de energía biológica. Hay una ligera tendencia a favor de la bioenergía en Europa, en comparación con los biocarburantes en América del Norte.

1.2. Biomasa

Según Lucas y Peso, (2012) 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 agricultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales de oxígeno durante el proceso. Posteriormente, los animales incorporan y transforman esta energía al alimentarse de las plantas, por lo que los productos de

esta transformación, que se consideran residuos, también pueden ser utilizados como recursos energéticos (Anexo 1).

La Real Academia Española define biomasa como:

- Material total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.
- Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Según Martillo, *et al.* (2019) y Situmorang, *et al.* (2020) la biomasa es una fuente de energía renovable ampliamente disponible y distribuida en el mundo, puede sustituir a los combustibles fósiles en todos los mercados de energía, producción de calor, electricidad y combustibles para el transporte. Actualmente alrededor del 11 % del consumo de energía primaria del mundo se garantiza con la biomasa y las estimaciones indican que entre el 15 % y el 50 % del consumo de energía primaria podría provenir de la biomasa para el año 2050.

La cantidad de dióxido de carbono emitido durante el aprovechamiento de la biomasa es equivalente a la que fue previamente absorbida a través de la fotosíntesis, por lo que tiene un impacto ambiental relativamente bajo respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (Colombres, 2017).

La biomasa representa el 99,3 % del total de energía procedente de fuentes renovables en Cuba y continuará siendo dominante en tal apartado en el futuro predecible debido a la cantidad de residuos procedentes de la agricultura y de las industrias de procesado de productos agrícolas, tales como subproductos de la industria azucarera y de otras industrias tales como aserradero y cepillado de madera, café, arroz, y otros residuos como leña, astillas, pellets, carbón vegetal o plantas oleaginosas utilizables para obtener biocarburantes (Cerdeira, *et al.* 2020).

1.2.1. Clasificación de la biomasa

Lucas y Peso, (2012) plantean que existen numerosas clasificaciones de biomasa (Anexo 2), pero las más aceptadas y fundamentadas en su composición, estado y origen, son las que se reflejan a continuación:

♣ *Según su composición la biomasa puede ser:*

- ✓ Oleaginosa: en este grupo encontramos las semillas de girasol, de soya, maíz, lino y almendro.
- ✓ Alcohólica: incluye la caña de azúcar, la remolacha y la pulpa de algunas frutas.
- ✓ Amilácea-inulínica: están los tubérculos de patata, granos de cereal y rizomas de dalia.
- ✓ Lignocelulósica: son las maderas en general y residuos lignocelulósicos.

♣ *Según su estado puede ser:*

- ✓ Biomasa sólida: Es el tipo de biomasa más conocido, y en él podemos englobar la madera obtenida de los diferentes tratamientos silvícolas forestales, residuos de las industrias que trabajan con cualquier tipo de biomasa, residuos agroindustriales, etc.
- ✓ Biomasa líquida: Este grupo englobaría a los residuos ganaderos, los residuos industriales biodegradables y las aguas residuales urbanas. Gran parte incluye también los aceites y biocarburantes (bioetanol y biodiésel).
- ✓ Biomasa gaseosa: Se trata del metano o biogás obtenido a partir de residuos de animales, residuos agroalimenticios, vertederos y escombreras, a través de diversos procesos (termoquímicos, microbiológicos, etc.)

♣ *Según su origen, la biomasa puede ser:*

- ✓ Natural: se produce de forma espontánea en la naturaleza, es decir, toda materia orgánica formada directamente por los seres fotosintéticos donde se incluye toda biomasa de tipo vegetal. Debido a sus altos costos de explotación, transporte y producción este tipo de materia orgánica no se aprovecha al máximo, generando desperdicios y contaminación al medio ambiente. Una de las mayores fuentes de obtención de la biomasa natural es la leña procedente de árboles y de tierras no cultivadas. El aprovechamiento de la leña ha sido criticado debido a que su uso masivo conlleva a la destrucción de los ecosistemas que lo producen, sin embargo, se pueden aprovechar los residuos de las partes muertas o los restos de podas para evitar el daño ambiental (García y León, 2018).
- ✓ Residual: se genera a partir de actividades que el hombre realiza, por ejemplo, actividades agrícolas, ganaderas, la industria maderera o agroalimentaria. Su

eliminación a veces supone un problema, por lo que convertir estos residuos en un recurso para crear un combustible sostenible es una muy buena opción. Este es el tipo de biomasa que más ventajas aporta a la hora de utilizarlo como combustible, ya que no genera contaminación, no se daña el medio natural, los costos de producción y transporte son bajos, además se generan puestos de trabajo gracias a esta actividad (Fernández, 2019 y Tineo, 2019).

- ✓ Cultivos energéticos: son aquellos que se encargan de producir biomasa para ser transformada en biocombustibles. Este tipo de biomasa tiene una gran ventaja frente a la biomasa residual debido a que permite controlar su concentración y su disponibilidad, debido al diseño de técnicas agrícolas especiales. Existen cultivos energéticos oleaginosos, alcoholígenos y lignocelulósicos que ayudan a controlar la erosión y la degradación de los suelos, pero su desventaja es la gran extensión de tierra necesaria para una producción rentable (García y León, 2018).

1.2.2. Principales componentes y características fisicoquímicas de la biomasa

Los principales componentes de la biomasa son en su mayoría: carbón, oxígeno, hidrógeno y pequeñas fracciones de elementos minerales como potasio, fósforo, sulfuro entre otros, conocidos comúnmente como celulosa y hemicelulosa. Esto es importante puesto que al analizar las reacciones que tienen lugar en la biomasa, se descubre en sus productos al ser procesada; nuevos compuestos inorgánicos, quienes a su vez son convertidos en nueva biomasa, lo cual muestra un ciclo perfecto para el aprovechamiento (IDAE, 2007).

Ramírez, (2017) plantea que la biomasa al igual que toda materia tiene características propias que deben de tomarse en cuenta para su selección, entre ellas se encuentran:

-Composición física y química: la primera varía según el tratamiento previo que sea necesario aplicar a la biomasa, pero en la parte química los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua.

Elementos: Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N), Azufre (S), entre otros.

- Contenido en humedad o humedad relativa: es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para todo proceso de conversión de

energía es imprescindible que la biomasa tenga un porcentaje menor al 30 % en su contenido de humedad. Puede medirse en base seca (h) o en base húmeda (H).

- Porcentaje en cenizas: se refiere a la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición. En algunos casos, la ceniza de la cáscara de arroz se usa para la fabricación de filtros de carbón activado o como un aditivo en la mezcla de concreto.

- Poder calorífico: es el parámetro que determina por unidad de masa, la energía disponible en la biomasa. El poder calorífico está relacionado directamente con el contenido de humedad. Un porcentaje elevado de humedad reduce la eficiencia de la combustión, debido a que una gran parte del calor que se libera se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

- Densidad aparente: se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por el contrario, los materiales con baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte.

1.2.3. Cáscara de arroz como materia prima en el proceso de gasificación

El arroz constituye uno de los granos que a nivel mundial ha incrementado su producción de forma constante. En Cuba, también se ha priorizado su cosecha y actualmente son diversas las regiones que lo producen. Sin embargo, la campaña 2020-2021 estuvo afectada por: ciclones tropicales, escasez de insumos (fertilizantes, combustibles) y el azote de la pandemia COVID-19 (Cepero e Iglesias, 2020).

La cáscara de arroz presenta una gran variedad de características fisicoquímicas, es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo al púrpura oscura. El peso específico es de 125 kg/ m³, es decir, 1 tonelada ocupa un espacio de 8 m³ a granel.

Para Cruz, *et al.* (2020) presenta una densidad específica de 1,42 kg/m³ y para Díaz, (2019) presenta una conductividad térmica de 0,0360 W/mK, otorgándole propiedades como aislante térmico.

Tanquilla, (2018) plantea que el contenido de humedad de la cáscara de arroz cuando sale del descascarado tiende a variar entre 5 y 40 % después de haber estado a la intemperie (en época no lluviosa por sus características químicas presenta un 10 % de humedad).

El poder calorífico de la cáscara de arroz es de 3281,6 kcal/kg. Debido a la estructura cerrada, la combustión se dificulta, y, por el alto contenido de sílice (el 20 %), es de muy baja biodegradabilidad en condiciones del ambiente natural. La temperatura máxima que se obtiene al ser quemada varía de acuerdo con su condición: 970°C (seca), 650°C (con algún grado de humedad). La cáscara de arroz al quemarse, genera 17.8 % de ceniza rica en sílice (94.5 %) (Valverde, 2007).

Entre los porcentajes más relevantes de la composición química de la cáscara de arroz se encuentran las cenizas, siendo la sílice la principal composición que no sufre disociación al quemarse, esto hace que se presente una difícil combustión continua y completa.

Se estima que por cada tonelada de arroz se generan 200 kg de cascarilla y de ésta se pueden producir 40 kg de cenizas (Cataño, *et al.* 2021).

Según Cruz, *et al.* (2020) menciona que en Cuba se producen alrededor de 400 000 t de cáscara de arroz al año en el sector estatal y privado, de las cuales se aprovecha una ínfima parte en la economía nacional y el resto queda como residuo agrícola contaminante.

Entre sus variadas aplicaciones se incluyen:

- Conversión de la biomasa: se obtienen azúcares que pueden ser convertidos a otros químicos orgánicos, como por ejemplo el etanol.
- En la elaboración de abonos y material para el cultivo de hongos, la obtención de papel y de pulpa.
- En materiales de construcción.
- Obtención de productos de silicio, a partir de sus cenizas.

La cáscara de arroz tiene una naturaleza fuerte, leñosa y abrasiva; por lo cual, es resistente a factores ambientales, protegiendo al grano de arroz de sufrir deterioro durante el tiempo de desarrollo de la planta de arroz, a causa del ataque de insectos o de hongos.

Los rangos de variabilidad de esta materia prima muestran los siguientes resultados:

Carbono 37.6- 42.6 %

Hidrógeno 4.7 – 5.78%

Oxígeno 31.37 – 37.62%

Nitrógeno 0.38 – 1.88%

Azufre 0.01 – 0.18%

Cenizas 16.93 – 24.6%

Poder calórico entre 13.24 - 14.22 MJ/kg

La cáscara de arroz y otros residuos agrícolas secos, alcanzan rápidamente la temperatura de ignición, cuando entran a la cámara de combustión. La etapa dominante de la combustión de la misma permite liberar alrededor del 67 % del valor calórico por la combustión de los volátiles.

Los sistemas deben diseñarse para minimizar el arrastre de ceniza en la corriente de gases y la erosión de los componentes, a su paso a través de los tubos de la caldera y los intercambiadores de calor.

1.3. Procesos de conversión de la biomasa

Existen varios procesos de conversión de biomasa (termoquímico, bioquímico y fisicoquímico), que permiten liberación de energía química inherente y obtención de esta manera energía térmica o biocombustibles (Caballero, et al. 2019).

Según Clavijo, (2015) los tres procesos principales por los que se puede transformar la biomasa o materia prima son:

- ✓ Procesamiento fisicoquímico.

Consiste en prensar mecánicamente la biomasa, por ejemplo, plantas oleaginosas como el maní, girasol, palma, soja y semilla de algodón, para producir aceites vegetales combustibles. Por medio de procesos posteriores de esterificación estos aceites se pueden adecuar para emplearlos en los motores de combustión interna.

✓ Procesamiento bioquímico.

Este tipo de procesamiento está dividido en dos clases de procesos: la fermentación anaeróbica (en ausencia de aire), en la cual la biomasa se deposita en una cámara hermética o biodigestor, y después de un cierto tiempo de residencia se obtiene como producto un gas combustible denominado biogás. Como otro producto del proceso se obtiene un residuo que presenta una alta calidad como fertilizante, denominado bioabono. Por otra parte está también el proceso de fermentación alcohólica, el mismo se obtiene como producto del proceso alcohol como combustible o carburante en motores de combustión interna o para plantas de generación de energía.

✓ Procesamiento termoquímico.

Este tipo de procesamiento está dividido en pirólisis, gasificación, licuefacción y combustión. Se refieren a la conversión de la biomasa por medio de reacciones químicas, propiciadas por la adición de calor y/o la exposición a agentes de reacción, mediante las cuales se libera energía directamente o se convierte la biomasa en combustible sólido, líquido o gaseoso.

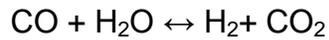
1.4. Gasificación

La gasificación es la producción de un gas combustible con características muy similares al gas natural, por la acción de calor en un medio casi anóxico mediante la descomposición térmica de la materia prima (Romero, 2011).

Para Singh, *et al.* (2015) la gasificación de biomasa es un proceso termoquímico relacionado con un proceso incompleto de combustión para las trazas de monóxido de carbono, hidrógeno y metano. Este proceso se lleva a cabo en un reactor llamado Gasificador, que generalmente funciona a 1000 °C. En general, los productos de la combustión completa de biomasa son sustancias que contienen nitrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono, entre otros.

Según Hejazi, (2017) y Meramo, *et al.* (2018) la gasificación se define como un proceso de oxidación parcial a altas temperaturas en el que un sólido de materia prima carbonosa, tal como la biomasa se convierte en productos gaseosos (en particular H₂, CO, CO₂, CH₄, hidrocarburos ligeros), así como alquitrán líquido y contaminantes menores, utilizando agentes gasificantes tales como aire, oxígeno,

vapor, dióxido de carbono o sus mezclas. De estos procesos se puede obtener hidrógeno a altas concentraciones a través de una reacción de equilibrio, donde el monóxido de carbono y el agua se combinan para formar hidrógeno y dióxido de carbono, según se indica:



El sistema deja una mezcla con alto contenido de dióxido de carbono, que debe ser separado para obtener el producto deseado a la concentración más alta posible.

Además, durante la gasificación de biomasa, el material se calienta a una temperatura alta hasta 1500 K, lo que provoca una serie de cambios físicos y químicos que resultan en evolución de productos volátiles y residuos sólidos carbonosos. La cantidad de volátiles producidos y sus composiciones dependen de la temperatura del reactor, tipo y características del material combustible (Basu, 2010).

1.4.1. Tipos de gasificadores

Quintero, (2018) y Solarte, *et al.* (2021) plantean que existen varios tipos de gasificadores de biomasa, cada uno viene con sus propias ventajas y desventajas específicas. Sin embargo, la selección de un apropiado gasificador generalmente se basa en el tipo de biomasa, su contenido de humedad, el agente gasificante utilizado, la potencia producida requerida y consideración económica para cada tipo. Los gasificadores pueden clasificarse generalmente como lecho fijo, lecho fluidizado, de flujo atrapado y gasificadores de flujo arrastrado.

- ✓ Gasificadores de lecho fijo.

Basu, (2013) plantea que los gasificadores de lecho fijo son económicos y tienen un diseño simple, que es una de sus principales atracciones. Por otro lado, su rango de aplicabilidad es de 10 kW a 1000 kW. Por esta razón, una gran cantidad de gasificadores de biomasa de lecho fijo a pequeña escala están en uso alrededor del mundo. Se pueden clasificar en gasificadores de lecho fijo de tiro ascendente (*updraft*) (Anexo 3), descendente (*downdraft*) (Anexo 4) y transversal (*crossdraft*) (Anexo 5), basados en la dirección de alimentación de biomasa y gas de síntesis producido.

Estos tres gasificadores, incluyen las cuatro zonas principales de gasificación; secado, pirólisis, combustión y reducción, pero el gas de síntesis producido no es el mismo.

En el gasificador de tiro ascendente o *updraft*, la biomasa se alimenta por la zona superior del gasificador y el aire entra por la parte inferior. El gas producido fluye hacia arriba en sentido opuesto al de la biomasa saliendo por la parte superior del gasificador. A pesar de que pueden acomodar altos niveles de humedad y contenido de cenizas, tienden a producir un gas con un contenido de alquitrán demasiado alto (30 a 150g/Nm³), lo que genera dificultades para su uso en los motores de combustión interna, por lo que solo se debe usar en aplicaciones simples como la cocción directa donde el gas no necesita limpieza.

Por otro lado, en los gasificadores de tiro descendente o *downdraft*, la biomasa entra por la parte superior del gasificador y el aire entra a una cierta altura por debajo de la parte superior, directamente a la zona de combustión o por encima de esta. El gas producido fluye hacia abajo y sale por la parte inferior del lecho de residuos carbonosos. Entre sus beneficios está su fácil mantenimiento, bajo costos y la capacidad de utilizar el gas productor directamente. Los gasificadores de tiro descendente también pueden ser fáciles de usar en granjas, casas, áreas remotas y algunas aplicaciones industriales como la generación de energía, motores de combustión interna y motores de turbina de gas, gracias a pequeñas su bajo contenido de alquitrán (hasta 6g/Nm³).

Las dificultades que da este reactor es el contenido de cenizas y humedad en el gas producido, requiere de un tiempo prolongado de encendido (20 a 30 min). La principal desventaja frente al *updraft* es la alta temperatura del gas de salida, lo que origina una eficiencia más baja.

En el gasificadores de tiro transversal o *crossdraft*, la biomasa se alimenta por la parte superior del gasificador y el aire entra por el lado lateral del reactor. El gas producido fluye por el lado diametralmente opuesto al ingresado del aire. Las distintas etapas de gasificación ocurren concéntricas a la zona de inyección del agente oxidante. Este tipo de reactores es ideal para un proceso a pequeña escala, debido a la gran sencillez del conjunto de depuración del gas, se puede utilizar con

motores pequeños. Un inconveniente de estos es su mínima transformación de los alquitranes.

✓ Gasificadores de lecho fluidizado.

En estos gasificadores el agente gasificante (aire, oxígeno o vapor) se alimenta por la parte inferior del gasificador a una velocidad suficiente para fluidizar (suspender) la biomasa.

Entre sus beneficios están que permiten eliminar las dificultades presentes en los gasificadores de lecho fijo, tales como la formación de escoria y la excesiva caída de presión, las cuales son ocasionadas por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible.

Al contrario de los gasificadores de lecho fijo, no existen diferentes zonas de reacción en el gasificador, por lo que cada partícula es sometida de forma instantánea a estos procesos en cualquier punto de gasificador tras su entrada a él, lo que origina que las cenizas sean arrastradas por el gas obtenido. Los de lechos fluidizado son versátiles y no son sensibles a las características del combustible, exceptuando el tamaño que debería ser pequeño.

Según Salem, (2020) los gasificadores de lecho fluidizado generan una mejor mezcla y una distribución uniforme de la temperatura que los de lecho fijo, debido a su diseño en comparación con el diseño de otros gasificadores.

Se clasifica atendiendo a la variable de operación “velocidad de fluidización” en:

- Lecho fluidizado burbujeante (velocidad de fluidización de 1- 2 m/s): Provee uniformidad en la distribución de la temperatura, es apto para recibir partículas de diferentes tamaños, alcanza altas velocidades de transferencia de calor entre el material inerte, el combustible y el gas y finalmente logra una alta conversión con bajo porcentaje de alquitrán y cenizas (Anexo 6).
- Lecho fluidizado circulante (velocidad de fluidización mayor de 5 m/s): La biomasa se quema en un régimen de fluidización rápida, tanto así que la velocidad del gas es suficiente para retirar todos los sólidos del reactor. Es aconsejable para las reacciones rápidas, se logran altas velocidades de calentamiento y de conversión con un bajo porcentaje de obtención de alquitranes y cenizas (Anexo 7).

- ✓ Gasificador arrastrado.

Según Moreno, (2010) en este gasificador los sólidos son arrastrados en el flujo de gas, fluyendo en paralelo a altas velocidades. Para obtener buenas conversiones es necesario alcanzar una temperatura de 1200 °C, ya que el tiempo de residencia de los sólidos es de solo unos cuantos segundos. Al operar con altas temperaturas, se suele operar en modo *slagging* (con cenizas fundidas) a elevadas presiones.

Sus características son las siguientes:

- Obtención de gas prácticamente limpio de alquitrán y metano.
- Volúmenes de gas producido superior al obtenido en los distintos tipos de lechos anteriormente mencionados.
- Se precisa una mayor demanda de agente gasificante que en los lechos fluidizantes burbujeantes y circulante.
- Alta carga de partículas que pueden llegar a ser arrastradas.
- Equipos de alto valor económico.
- No aptos para empleo de biomasa.

1.4.2. Etapas del proceso de gasificación

Según Hernández, (2019) el proceso de gasificación de biomasa sigue una serie de etapas (Anexo 8) que se describen a continuación:

Secado o volatilización: En principio, el agua contenida en el material se remueve a temperaturas no menores de los 100 °C. Se provoca entonces la evaporación absorbiendo el calor sensible tanto para dicha evaporación como para seguir elevando la temperatura, lo cual ocasiona la volatilización de otros compuestos de bajo peso molecular. Al momento de utilizar modelos que simulen lo que ocurre en esta etapa, la volatilización es asumida en el punto de entrada para siguientes consideraciones en la cinética ocurrida en el reactor (Durango, 2015).

Pirólisis: En esta segunda etapa, se lleva a cabo la degradación térmica de la biomasa seca en ausencia de aire, generando un sólido carbonoso, algunos alquitranes (tras) y varios gases (gases síntesis), esto a temperaturas que oscilan entre los 200 y 500 °C. La reacción es endotérmica, descomponiendo la biomasa generando los residuos anteriormente mencionados (Cerdá, 2012).

La aportación de calor en la pirólisis se divide en alotérmico (es la transmisión de calor indirecta que se lleva a cabo por conducción y radiación de las paredes) y autotérmico (proceso de calentamiento directo, la combustión de la carga proporciona la energía) (Castells 2005).

Reducción: En esta etapa, se presentan numerosas reacciones químicas en presencia de altas temperaturas (IDAE, 2007), se lleva a cabo una combinación del vapor de agua con el dióxido de carbono (Romero, 2011).

Oxidación: Esta última etapa tiene lugar al introducir aire en el proceso, donde entran a intervención algunos gases inertes. Esta fase oxida la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante utilizado (aire, oxígeno, o vapor de agua) (IDAE, 2007).

1.4.3. Agentes gasificantes

Según Ilie, (2019) la presencia de distintos agentes gasificantes influye en la composición de los gases de reacción, lo que determinará su poder calorífico y sus aplicaciones potenciales como combustible o en procesos de síntesis química. Estos se introducen para aportar calor y fluidizar el sólido. Es necesario que el agente gasificante elegido contenga el oxígeno necesario para la combustión parcial del residuo empleado.

Los principales agentes gasificantes son:

- Aire. El oxígeno del aire permite una combustión parcial que aporta la energía para mantener la reacción de gasificación (procesos autotérmicos). Debido a la dilución del oxígeno por el nitrógeno atmosférico, el gas de síntesis resultante tiene un contenido energético bajo, que se estima entre 4 y 7 MJ/Nm³. Este gas puede emplearse como combustible en calderas, turbinas de gas o motores de combustión interna.
- Oxígeno. El gas de síntesis de la gasificación tiene un mayor contenido energético (10 a 15 MJ/Nm³) puesto que no se encuentra diluido en nitrógeno. Tiene el inconveniente del coste de la generación del oxígeno. Además de las aplicaciones descritas para la gasificación con aire, el gas de síntesis generado puede usarse, tras un tratamiento adecuado, en la producción de compuestos orgánicos.

- Aire/oxígeno + vapor de agua. La presencia de vapor de agua permite enriquecer el gas de síntesis en H₂ y CO por lo que se puede aumentar ligeramente su contenido energético (10 a 20 MJ/Nm³). Además de su empleo como combustible, puede utilizarse en la síntesis de metanol, amoníaco o combustibles líquidos.

- Hidrógeno. Otra opción en el proceso de gasificación es la utilización de hidrógeno en presencia de catalizadores como agente gasificante.

El gas de síntesis generado en presencia de hidrógeno tiene un contenido energético mayor (>30 MJ/Nm³), ya que se favorece la formación de metano y olefinas.

- Aire/oxígeno y catalizadores. El uso de catalizadores aumenta el rendimiento de conversión y/o reduce la presencia de especies contaminantes como los alquitranes. Una de las alternativas más interesantes para la eliminación en caliente de los alquitranes es el reformado catalítico con vapor de agua.

Esta técnica tiene una serie de ventajas como que la temperatura del reactor con catalizador pueda ser integrada térmicamente con la temperatura de salida del gasificador, que la composición del gas producido puede ser ajustada mediante el catalizador y finalmente, que se pueda añadir vapor al reactor catalítico para asegurar el completo reformado de los alquitranes. Los catalizadores aplicados a los sistemas de gasificación pueden agruparse en función de su naturaleza química o en función de su posición y finalidad.

En cuanto a su naturaleza química, se agrupan en: basados en metales alcalinos, óxidos metálicos y metálicos en soporte.

Por lo que se refiere a su posición y finalidad, puede hablarse de primarios, si se colocan en el gasificador para producir un gas lo más limpio posible, o secundarios, si se sitúan después del gasificador para limpiar el gas producido en el mismo.

1.5. Gas de síntesis

Según Sánchez, (2017) cuando el carbón y la biomasa u otro combustible sólido se somete a un proceso de gasificación se obtiene un combustible gaseoso denominado gas de síntesis o *syngas*, formado mayoritariamente por CO, H₂, CH₄, H₂O, N₂ y CO₂. La composición del gas dependerá del tipo de reactor (lecho móvil en contra corriente, lecho fluidizado burbujeante o circulante, lecho arrastrado), de las condiciones de operación (presión y temperatura) y fundamentalmente de la

naturaleza del agente gasificante (aire, oxígeno, vapor, hidrógeno o alguna de sus mezclas). El rendimiento del proceso de gasificación también se ve modificado por estos factores, en un rango de 70 a 80 %.

Las condiciones de operación y la tecnología de gasificación van a delimitar el uso final del gas (Anexo 9): generación de calor por combustión del gas pobre en una caldera o en un motor de gas, generación de calor y electricidad por combustión en una turbina de vapor en el proceso denominado "gasificación de ciclo combinado", generación eléctrica en una pila de combustible y síntesis química.

Posee un valor calorífico neto de 4-6 MJ/m³, es decir, de cinco a siete veces inferior al gas natural (36 MJ/kg) o biogás (22 MJ/kg).

1.5.1. Enfriamiento del gas de síntesis

Según Carrasco, (1997) la refrigeración del gas es necesaria por varios motivos:

- Prevenir la autoinflamación, pues altas temperaturas del gas equivalentes a altas temperaturas de mezcla admitida y con ello muy altas temperaturas de compresión alcanzando fácilmente la temperatura de autoinflamación de la mezcla gas/aire, con lo cual se puede presentar el preencendido o la detonación, esto para el caso de usar motores con filosofía de mezcla estequiométrica.
- Para aumentar la densidad del gas y con ello de la mezcla gas/aire, para aumentar la eficiencia volumétrica y así permitir que entre el máximo de gas combustible en el cilindro del motor durante la carrera de admisión.
- Contribuye a la depuración del gas, evitando la condensación de la humedad contenida en el gas producido al momento de mezclarse con aire y antes de entrar en el motor.

La refrigeración del gas puede ser principalmente de dos tipos: seca y húmeda. Entre los equipos de refrigeración seca, tenemos los de convección natural por aire, donde el gas es conducido a través de unos tubos de refrigeración con alta superficie de transferencia de calor, los de convección forzada con aire, donde un ventilador (aporte adicional de energía) fuerza la recirculación del aire alrededor de los tubos de gas, y los de tipo intercambiador de calor gas/líquido refrigerante, usando normalmente agua. En estos últimos se puede evitar la aportación adicional de energía si se cuenta con una fuente continua de agua a baja temperatura.

Los refrigeradores de gas de tipo húmedo, llamados también lavadores de gases (*Scrubbers*), tienen la ventaja de depurar el gas, eliminando eficazmente las partículas y gases como el amoníaco y el ácido clorhídrico. Existen lavadores de gases de tipos muy diferentes, pero el principio siempre es el mismo: se lleva el gas en contacto directo con un medio fluido (generalmente agua o algún compuesto orgánico) que se rocía en la corriente de gas por medio de un dispositivo de inyección apropiado. Los principales problemas de este tipo de refrigerador, es que necesita grandes cantidades de agua o medio fluido, y por lo tanto se genera un efluente líquido con alta cantidad de contaminantes que es preciso depurar.

1.5.2. Depuración y acondicionamiento del gas de síntesis

De acuerdo a lo anterior, previo a la utilización del “*syngas*” será necesaria la depuración y acondicionamiento del mismo con objeto de: eliminar contaminantes a niveles suficientemente bajos para cumplir con la normativa medioambiental y la tolerancia de los sistemas de conversión del gas, ajustar la relación CO/H₂ y mejorar la calidad del gas previo a su aprovechamiento energético o a su conversión en combustibles limpios (H₂, síntesis química) y contribuir a la reducción progresiva de emisiones responsables de la acidificación (NH₃) y del efecto invernadero (CO₂, CH₄) (Woolcock, 2013).

La limpieza de los gases se ha realizado tradicionalmente por vía húmeda, lo que implica el enfriamiento de los gases a temperatura ambiente o inferior, con lo que la generación de vapor en turbina de gas es menos eficiente. Además, conlleva unos costes tremendamente elevados y la generación de un gran volumen de efluentes a tratar por métodos costosos. Pese a ello se emplea en la mayoría de las plantas de gasificación existentes, en especial para aplicaciones del gas a baja temperatura, al considerarse una tecnología madura, con eficacia contrastada y de fácil diseño y aplicación a cada sistema particular. Sin embargo, la limpieza de los gases en caliente (temperatura mayor a 300 °C) permite una mayor integración con los sistemas catalíticos de ajuste de la composición del gas posteriores, un mejor balance energético y una mejor economía del proceso, al tiempo que se eliminan los problemas derivados de la gestión de efluentes (Woolcock, 2013).

1.5.3. Aplicaciones del gas de síntesis

El gas de síntesis puede ser empleado en multitud de aplicaciones para obtener diferentes productos. Algunas de estas aplicaciones permiten obtener: amoníaco, alcoholes, combustibles líquidos (gasolina y diésel), combustibles gaseosos (metano e hidrógeno), combustión del gas producido en hornos y calderas, producción de energía eléctrica mediante motores y turbinas (Arsenales, *et al.* 2016).

Al ser el gas pobre un gas combustible, su aplicación más natural es la producción de energía termal directa a través de la combustión. Como el alcance de esta aplicación es muy amplio, incluye numerosas posibilidades en la industria, y en las aplicaciones institucionales como las cocinas comunitarias. Las aplicaciones industriales en sí mismas cubren varios tipos de secado, calefacción, aplicación de caldera, fabricación de CO₂, entre otras. En la mayoría de estas aplicaciones, el cambio hacia la gasificación de biomasa desde el método convencional existente lleva a ganancias sustanciales (Ankur, 2011).

En el caso de la electricidad, el gas se quema básicamente dentro de un motor. Este puede ser basado en diésel (es decir, motor de encendido por compresión o de combustión interna) o un motor (es decir, motor de ignición por chispa o SI) de petróleo (gasolina). Dado que la mezcla de gas pobre y aire no se autoenciende a presión y temperatura normal en el motor, no es posible hacer funcionar el motor de diésel al 100% con gas, y se necesita una inyección de diésel para comenzar la combustión. En el caso de los motores SI, la bujía inicia la combustión y, por lo tanto, dichos motores pueden funcionar totalmente con gas. Donde quiera que se empleen los motores de diésel, “el remplazo del diésel” se convierte en parámetro clave, ya que la economía depende en gran medida de qué por ciento del consumo normal total de diésel puede ser sustituido por el gas (Ankur, 2011).

1.6. Caracterización de la UEB Amarillas del municipio de Calimete

Según Cepero e Iglesias, (2020) desde el año 2008 la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, mediante un estudio minucioso y a través del proyecto Biomasa Cuba, financiado por la agencia Suiza para el desarrollo COSUDE, evaluó e identificó que en la UEB Amarillas del municipio de Calimete perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos de Matanzas, se podría lograr un ahorro de

combustible durante el procesamiento industrial de este grano mediante la tecnología de gasificación empleando como biomasa la cáscara del propio grano del arroz, logrando así de forma integrada cerrar sus propios ciclos energéticos y productivos y abaratando los costos de esta industria.

En este secadero, se consumían aproximadamente 16 litros de petróleo/toneladas y durante la campaña la empresa seca aproximadamente de 55 a 70 t/día consumiendo aproximadamente de 880 a 1120 litros de petróleo en función de la humedad inicial del grano, combustible necesario para garantizar un correcto secado y así evitar que el mismo se fisure, ocasionando cuantiosas pérdidas económicas en el molino.

Se transfiere en el año 2017 a esta UEB la tecnología de gasificación de la empresa India Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd por constituir una de las que más se adecuaba a las condiciones de Cuba, ser una tecnología madura en el mercado, menos compleja comparada con otros gasificadores ya existentes y con costos menos elevados.

El mismo, seca como promedio unas 50 t de arroz/día, empleando para ello 700 L de diésel. Por otra parte, se contribuye al tratamiento de 1 186 t de cáscara de arroz, que después del proceso de gasificación y la quema, produce una cascarilla carbonizada que se emplea para preparar bioabonos orgánicos que se utilizan en los suelos agrícolas (Suárez, *et al.* 2012).

Es un gasificador robusto y dócil que trabaja de manera eficiente cuando el proceso es continuo, cuando no es continuo permite cierta flexibilidad en las paradas y arrancadas, siempre que estas no duren más de 10 horas.

Conclusiones parciales

1. La revisión bibliográfica acerca de la temática trabajada permitió conocer que la biomasa se clasifica en cuanto a su composición, estado y origen.
2. Los procesos termoquímico, bioquímico y fisicoquímico permiten la transformación de la biomasa a energía.
3. La gasificación de biomasa es uno de los procesos termoquímicos que existen, la cual permite la producción de un gas de síntesis.

4. De los diferentes tipos de gasificadores que existen los de lecho fijo con flujo descendente producen menos alquitrán, por lo cual son más apropiados para el uso del gas en motores.
5. La cáscara de arroz es una posibilidad real a la solución de la problemática de producción energética, ejemplo de ello es el gasificador FBG-400 ubicado en la UEB Amarillas del municipio Calimete.

Capítulo II: Materiales y métodos de investigación.

En este capítulo se describen las técnicas experimentales para la caracterización fisicoquímica de la cáscara de arroz además de las especificaciones constructivas y operacionales del reactor FBG-400 de la empresa hindú Ankur Scientific Energy Technologies, donde ocurre el proceso de gasificación de la biomasa (cáscara de arroz) realizando balances de masa y energía con el fin de evaluar la eficiencia energética del gasificador.

2.1. Métodos de ensayo para la caracterización físico-química de la cáscara de arroz

Según Arias y Meneses, (2016); Echeverría y López, (2010) para que el proceso de gasificación opere en condiciones óptimas, es necesario realizar un análisis de la materia prima, que en este caso es la cáscara de arroz, dicha evaluación se efectuó en el laboratorio de bioenergía de la Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey”, determinándose los siguientes parámetros:

- ❖ Determinación del porcentaje de humedad.

Según Valverde, *et al.* (2007), es uno de los parámetros más importantes, ya que el poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Por lo tanto, es necesario que el porcentaje de humedad sea bajo (menor a un 12 %).

Materiales:

- Cápsulas de porcelana
- Balanza analítica
- Horno
- Desecador

Fase experimental:

- Se lavaron las cápsulas de porcelana y se llevaron a peso constante.
- Luego se pesó 1 g de muestra en las cápsulas (P_i).
- Se llevaron las muestras al horno a temperatura 105 °C durante 24 horas.
- Se dejó enfriar las cápsulas en el desecador. (Anexo 10)
- Se pesó las cápsulas que contenían las muestras (P_f).

$$\%Humedad = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

❖ Determinación de Cenizas.

Materiales:

- Cisoles de cerámica
- Mufla
- Balanza analítica

Procedimiento Experimental:

- Se lavó los crisoles y se llevaron a peso constante.
- Se pesó 2 g de la muestra (P_i), en los crisoles antes lavados.
- Luego se introdujeron los crisoles que contienen las muestras a la mufla calentándolas lentamente hasta 100 °C, se aumentó la temperatura paulatinamente hasta 575 °C para carbonizar toda la muestra.
- Cuando el residuo cesó de carbonizarse, se dejó que se calcinara durante 3 horas más, hasta que no hubo partícula negra en el residuo.
- Se dejó enfriar los crisoles a temperatura ambiente en un desecador.
- Se pesó los crisoles y anotamos el peso final (P_f).

$$\%Cenizas = \frac{P_f}{P_i} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

❖ Determinación de pH.

Materiales:

- Beacker 250 mL
- Matraz de ebullición de 250 mL Pyrex
- Balanza analítica
- Refrigerantes
- Mangueras
- Mantas calefactoras
- Termostatos

Fase experimental:

- Se pesó 10 g de muestra.
- Luego se colocó los 10 g de muestra en un matraz de ebullición de 250 mL
- Se les añadió 100 mL de agua destilada y se mezclaron.
- Se armó el equipo de reflujo y se sometió a ebullición durante 3h.

- Al finalizar las 3 horas, se removieron los matracas y se taparon las soluciones dejándolas enfriar hasta 25 minutos.

- Se les midió el pH a las soluciones antes obtenidas con el pHmetro durante 3 minutos.

❖ Cálculo del Poder Calorífico (Manual del Calorímetro C-200).

Mediante un calorímetro de combustión, también llamado calorímetro de bomba, se mide el calor que genera una muestra durante su combustión en condiciones controladas.

Aproximadamente 1 g de un material sólido o de un líquido se pesa en un crisol, el cual se introduce en un recipiente de acero inoxidable. El recipiente de disgregación o bomba se llena con oxígeno (30 bar) (calidad 3,5: oxígeno técnico 99,95 %). La muestra se enciende, por ejemplo, mediante un hilo de algodón conectado a un alambre de ignición sólido dentro del recipiente de disgregación y se quema.

Durante el proceso de combustión, la temperatura central en el crisol puede ascender hasta 1000 °C, y también aumenta la presión. En estas condiciones se queman y oxidan todas las materias orgánicas. El calor generado durante el proceso de combustión puede medirse empleando el método de medición isoperibólico, adiabático o dinámico. En la siguiente figura se muestra el calorímetro C-200 y la estación de oxígeno C-248 a utilizar.



Figura 2.1: Calorímetro C-200 y Estación de oxígeno C-248.

El poder calorífico específico de la muestra se calcula de la siguiente manera:

$$PC = \frac{C \cdot DT - Q_{External1} - Q_{External2}}{m} \quad (2.3)$$

Donde:

PC: Poder calorífico de la muestra

m: Peso de la muestra de biomasa.

C: Capacidad calorífica del sistema calorímetro.

DT: Incremento de temperatura del agua en el recipiente interior de la celda de medición.

$Q_{\text{External1}}$: Valor de corrección para la energía térmica generada por el hilo de algodón como ayuda a la ignición.

$Q_{\text{External2}}$: Valor de corrección para la energía térmica de otras ayudas de combustión.

❖ Porcentaje de Materia Volátil (%MV).

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 perdida 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, la cual se muestra en la siguiente figura:



Figura 2.2: Horno o Mufla.

Desde el punto de vista cuantitativo, la materia volátil indica la cantidad de gases del combustible, esto influye en el diseño del volumen de la cámara del hogar donde se quema la cascarilla, para que ocurra un correcto desalojo de humos.

Se utiliza una cápsula de platino tapada o mufla y se somete la muestra a una temperatura de 950 °C durante 7 minutos.

$$\%MV = A - \%Humedad \quad (2.4)$$

Donde:

A - % de pérdida de peso.

Permite estimar la cantidad de compuestos volátiles que evolucionan en las condiciones de este ensayo.

❖ Porcentaje de Carbono Fijo (%CF).

Este parámetro se determina por diferencia.

$$\%CF = 100\% - (\%Humedad + \%Cenizas + \%MV) \quad (2.5)$$

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.

2.2. Descripción del proceso de gasificación de cáscara de arroz en el gasificador FBG-400 de la empresa hindú Ankur Scientific Energy Technologies

En la Empresa Agroindustrial de Granos, ubicado en la UEB Amarillas, perteneciente al municipio Calimete, provincia Matanzas, está instalado un gasificador FBG-400 (Anexo 11).

El mismo fue fabricado por la empresa hindú Ankur Scientific Energy Technologies. El gasificador produce un gas de bajo poder calórico que se hace pasar por un sistema de limpieza y acondicionamiento del gas pobre. Todo el gas producido se utiliza en un sistema de generación eléctrica con un motor de combustión interna conectado a un generador de corriente alterna de 220 V trifásico y 60 Hz de frecuencia (Ankur, 2011).

El gasificador es de tipo lecho fijo de flujo descendente. Tiene dos modos de trabajo, el modo gasificación de biomasa fibrosa (FBG Fiber Biomass Gasifier) según sus siglas en inglés y el modo de gasificación de biomasa forestal (WBG Wood Biomass Gasifier) (Anexo 12).

Según el Manual de Usuario del Gasificador de Biomasa “Ankur” FBG-400, la biomasa se alimenta a través del búnker a la tolva de alimentación superior de forma continua con una cantidad limitada y controlada de aire para la combustión parcial que ingresa a través de la parte superior abierta. Posteriormente llega al gasificador

donde ocurren una serie de reacciones químicas. A la salida de este se encuentra el raspador para dejar caer las cenizas carbonizadas.

La ceniza seca que cae del reactor se recoge en la mesa inclinada del reactor y de allí se extrae con la ayuda de un transportador de tornillo sin fin. La salida del mismo tiene una caja recolectora de ceniza seca de dos válvulas que contiene la ceniza seca durante un período de tiempo determinado. El gas atraviesa el área anular del reactor desde la parte superior de la hoja perforada. La salida de gas está conectada con varios sistemas de flujo descendente, como depurador Venturi, caja de drenaje, soplador húmedo, válvula de control de gas, caja de separación, eliminador de niebla, filtro grueso, filtro fino pasivo, filtro plisado, Venturi de gas, caja de cabecera, flare con válvula manual y quemador.

La limpieza principal del gas se realiza en el lavador Venturi, soplador húmedo. El filtro grueso y el filtro fino pasivo proporcionados con el sistema realizan una limpieza adicional. El soplador se utiliza para la puesta en marcha del gasificador y en funcionamiento normal para alimentar el gas al quemador. La bomba del depurador se usa para enfriar y limpiar el gas a través del depurador Venturi, la bomba de enfriamiento del transportador de tornillo se usa para enfriar el carbón caliente que sale del transportador de tornillo y la bomba de la torre de enfriamiento para enfriar el agua recirculada.

El gasificador modelo FBG 400, tiene capacidad para procesar entre 450 y 500 kg de cáscara de arroz por hora y producir unos 900 a 960 Nm³/h de gas combustible con 1 050 Kcal/Nm³ de valor calórico como promedio (Ankur, 2016).

Con la implementación de esta tecnología se logra un ahorro por año de, aproximadamente, 189 000 litros de diésel, que equivalen a un ahorro del país de 159 939,47 dólares por concepto de sustitución de importación y se evitan las emisiones de 281,4 t de CO₂ anualmente.

Un aspecto importante de esta tecnología, es poder contar con un Quemador Dual de gas y diésel, lo que permite el uso de cualquiera de estos combustibles en el momento que sea necesario, sin embargo, es importante usar el gas como combustible principal y dejar el diésel solo para casos de emergencia.

2.2.1. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación, almacena biomasa en un compartimento hermético antes de descargarlo en la tolva del gasificador por un elevador y el tamiz. La biomasa viene por una tubería de 200 mm con un arrastre de aire. El cilindro de alimentación tiene dos puertas neumáticas, una en la parte superior y otra en la inferior. Esto es para evitar la entrada de aire en exceso al gasificador. Hay un motor vibrador adaptado en el cilindro de alimentación que funciona sólo cuando la puerta inferior de alimentación está abierta y ayuda a la descarga de la biomasa hacia la tolva.

En caso de ciertas aplicaciones termales o para la generación de electricidad en modo de combustible dual, puede suministrarse una sola puerta de alimentación y la biomasa se carga directamente a la tolva.

2.2.2. Tolva del gasificador

La tolva, cumple tres funciones de la gasificación, es decir, el secado, la pirólisis y la combustión. Hay un motor vibrador montado en la tolva para un flujo uniforme de la biomasa, tiene dos sensores de temperatura, es decir uno en la zona superior, (Z-1) y la zona inferior, (Z-2). El nivel determina el funcionamiento del rotor de peine. La alimentación de biomasa es continua a través de la puerta de la tolva.

2.2.3. Reactor

El reactor realiza la función de reducción y por tanto la producción del gas pobre, el mismo es llenado con arroz seco carbonizado. Hay un recubrimiento refractario dentro del reactor para los sistemas del gasificador FBG-400. La mesa del reactor, con rotor propio, sostiene el lecho de carbón vegetal o arroz carbonizado y el rotor de peine ayuda a mantener este lecho consistente al eliminar sus cenizas. El rotor de peine se acopla con una caja de engranajes y un motor. Se proporciona un punto de presión en el reactor para leer la caída de presión hasta la salida del lecho (ΔP_G), es decir, el carbón vegetal o carbón de arroz. Se conecta un manómetro de columna de agua o transmisor de presión para medir la caída de presión en el gasificador, conocida como ΔP_G . El sistema de eliminación de ceniza del reactor puede ser la descarga de ceniza seca o húmeda. En el caso de una descarga húmeda, hay un canal de agua en la parte inferior del reactor a través del cual la ceniza es llevada por

la circulación de agua al tamiz vibratorio y finalmente a la torre de enfriamiento y se recircula.

2.2.4. Sistema de limpieza y enfriamiento del gas

El sistema de limpieza y enfriamiento del gas caliente se compone de: Depurador Venturi, ventilador húmedo/seco, intercambiador de calor, eliminador de neblina, filtro grueso, filtros finos pasivos y filtros plisados. A continuación, se describen las características operacionales de cada equipo.

1. Tubería de gas caliente: Esta transporta el gas pobre caliente con temperatura de 400 °C hasta 500 °C desde la salida del gasificador hasta la entrada del Depurador Venturi.

2. Depurador Venturi: Este realiza el enfriamiento y la limpieza del gas caliente al asperjar agua presurizada sobre este y reducir la temperatura entre 40 y 45 °C. El agua se escurre y el gas frío pasa a través de la salida del gas de la caja de drenaje al ventilador húmedo (para estimados mayores). Existe un sensor de temperatura adaptado a la caja de drenaje para medir la temperatura del gas frío y debajo de esta se encuentra la tubería de drenaje. Además, se proporciona una conexión de T en la entrada de la boquilla del agua y se lleva una conexión al ventilador húmedo.

3. Ventilador húmedo/seco: son parte de los sistemas suministrados según nuestro estándar. Los ventiladores ayudan en la succión de una cantidad controlada de aire en el gasificador para la combustión parcial, la succión y entrega del gas productor hasta el punto de uso final. Los sopladores en seco (utilizados para clasificaciones más pequeñas) generalmente se conectan cerca del punto de uso final. El soplador húmedo realiza el control del flujo de gas y la limpieza adicional del gas mediante inyección de agua. Hay una válvula de bola para controlar la inyección de agua al soplador.

4. Eliminador de neblina: Ayuda a eliminar la niebla presente en el gas productor después del ventilador húmedo o del intercambiador de calor, pero antes del filtro fino activo. En determinadas aplicaciones, se coloca cerca del quemador. El gas productor en el eliminador de neblina ingresa por la tubería de entrada inferior y sale por la tubería de salida superior después de pasar a través del medio filtrante. El eliminador de neblina se llena con virutas de madera (tamaño: 25 mm x 25 mm x 10

mm de espesor) o piezas de madera (tamaño: 25 mm de diámetro X 25 mm de largo) como medio filtrante hasta la marca de la flecha. En la parte inferior del eliminador de neblina, hay una salida de drenaje para la eliminación de condensados y la tubería de drenaje está conectada con el colector de agua del proceso.

Cuando la caída de presión del eliminador de neblina alcanza de 70 a 80 mmca, el medio filtrante debe vaciarse abriendo la brida del puerto de limpieza inferior y se debe llenar el medio filtrante nuevo desde la puerta superior. Los medios (astillas o trozos de madera) extraídos del eliminador de neblina pueden introducirse en el gasificador después del secado.

5. Filtro grueso: A él se añade el medio de filtro de la calidad adecuada (carbón mineral seco) hasta el nivel marcado debajo de la entrada del gas. Esto es muy importante para el funcionamiento efectivo del filtro. Si el medio de filtrado (carbón mineral seco) se llena como se indicó anteriormente, la caída de la presión inicial del filtro (ΔPCF) nunca debe ser más baja de 30 a 35 mm en las condiciones estimadas. Cuando la ΔPCF llega a 80 mm, el medio filtrante debe vaciarse abriendo la puerta de limpieza inferior y el arroz seco fresco se debe llenar desde la puerta superior. Generalmente, esto debe hacerse en 24 horas.

Se proporciona una caja de recolección de condensados debajo del filtro grueso. El agua debe drenarse regularmente cuando el gasificador no esté funcionando. Es necesario asegurarse de que todas las puertas estén bien cerradas, que no haya filtraciones de aire cuando el gasificador esté funcionando y revisar el sello de goma de vez en cuando.

6. Filtros finos pasivos: Estos filtros cumplen la función de limpiar el gas aún más. Las partículas finas del gas pobre quedan atrapadas en el medio de filtrado, en los sistemas FBG, generalmente se suministran tres filtros finos pasivos como parte del sistema.

El gas pobre entra a los filtros finos desde la entrada en el centro superior y después del filtrado sale de la salida de la cubierta externa. Todos los filtros son suministrados con puntos de presión para medir la caída de la misma en el medio de filtrado. Se cierran las puertas del fondo herméticamente y debe echarse medio de filtrado suministrado por los trabajadores hasta la marca de nivel del medio y su capa

superior debe estar lo más pareja posible horizontalmente. Se cierra la puerta superior cuando haya sido introducido el medio de filtrado. Es muy importante para el funcionamiento efectivo del filtro que solo sea aceptado un material a base de aserrín y que no se utilice otro que no cumpla con las especificaciones de la empresa.

En el caso de los filtros finos pasivos, la capa superior se mezcla diariamente y se observa la caída de presión. Cuando ΔP del filtro fino pasivo llega a 80 mm, se cambia todo el medio de filtrado vaciando el filtro a través de las puertas del fondo. Esto puede ocurrir después de 100 horas (o más) de operación del gasificador. Luego se reemplaza el medio de filtrado con medio fresco o rejuvenecido. Se seca el medio de filtrado usado y después se pasa por un tamiz de 0,5 x 0,5 mm para eliminar las partículas finas de carbono. El medio de filtrado tamizado puede utilizarse de nuevo en el filtro fino.

7. Filtro plisado: Realiza la función de limpieza final del gas productor y también actúa como filtro de control o de seguridad para bloquear el flujo de gas en caso de que llegue gas sucio hasta este punto. El filtro plisado está provisto de tomas de presión para medir la caída de la misma a través de los filtros de cartucho. Tiene tres tuercas de mariposa. La instalación adecuada de los filtros de cartucho elimina por completo cualquier paso de flujo de gas directo y es extremadamente crítica para el funcionamiento adecuado del filtro plisado. Es probable que los filtros de cartucho sean de 5 mm en el manómetro (que está conectado a la presión de puntos en el filtro plisado). Cuando P alcanza los 50 mm, los filtros de cartucho deben reemplazarse por otros nuevos y los usados deben limpiarse por aspersion con diésel y luego con aire. Generalmente, estos filtros deben revisarse cada 500 horas de funcionamiento del gasificador.

Los evaporadores también deben lavarse con diésel y luego con detergente, enjuagarse, secarse y almacenarse para su uso futuro. La larga vida útil del filtro plisado, depende principalmente del mantenimiento adecuado del sistema de filtrado anterior y también del funcionamiento normal del gasificador. Se coloca un grifo de agua debajo del filtro plisado. Se debe retirar el agua condensada diariamente cuando el gasificador no esté funcionando. Cuando la caída de presión de cualquiera de las líneas de filtro alcance los 150 mmca, cambie manualmente a la otra línea.

Para cambiar la línea de filtro, primero lleve el interruptor a la posición media y luego a la otra línea de filtro.

2.3. Balance de masa y energía en el gasificador.

2.3.1. Balance de masa

Según Lesme, (2008) el funcionamiento del gasificador se logra suministrando la biomasa por la parte superior, luego se procede al encendido del equipo manualmente con una fuente de calor exterior por la misma entrada del aire atmosférico, el cual es succionado producto del vacío que produce el flujo de agua movida por una bomba; este flujo de agua se utiliza posteriormente para la limpieza húmeda del gas después del gasificador.

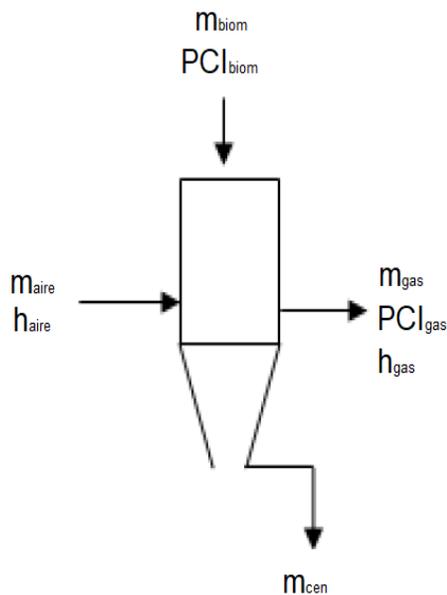


Figura 2.3: Corrientes de entrada y salida del gasificador.

Atendiendo lo representado en la figura 2.3, el balance de masa se puede expresar por la siguiente expresión:

$$m_{biom} + m_{aire} = m_{gas} + m_{cen} \quad (2.6)$$

Donde:

m_{biom} – flujo másico de biomasa, (kg/s),

m_{aire} – flujo másico de aire, (kg/s),

m_{gas} – flujo másico de gas, (kg/s),

m_{cen} – flujo másico de cenizas, (kg/s).

El flujo másico de biomasa como combustible y el de cenizas son evaluados de forma experimental. Para determinar la masa horaria de combustible se pesa su masa inicial y se mide el tiempo de trabajo del gasificador, luego de concluido el trabajo y después de un proceso de enfilamiento, se pesan las cenizas.

El flujo de aire se determina a partir del cálculo del volumen de aire teórico necesario para que ocurra la combustión, considerando que la gasificación es una combustión que ocurre con defecto de aire, como promedio con el 30 % del aire teórico.

Teniendo en cuenta el balance de masa se obtiene el flujo de gas.

2.3.2. Balance de energía

El balance de energía se realiza contabilizando la energía que entra y sale del gasificador, con el objetivo de evaluar las pérdidas y su influencia en el proceso de gasificación.

$$m_{biom} \cdot PCI_{biom} + m_{aire} \cdot h_{aire} = m_{gas} \cdot PCI_{gas} + m_{gas} \cdot h_{gas} + Q_{cen} + Q_{ma} \quad (2.7)$$

Donde:

Q_{ma} – Calor perdido al medio ambiente, kW.

Q_{cen} – Calor que se pierde con las cenizas, kW.

$$Q_{cen} = m_{cen} \cdot Cp_{cen} \cdot (T_{cen} - T_{amb}) \quad (2.8)$$

Cp_{cen} – Capacidad calorífica a presión constante de la ceniza.

T_{cen} – Temperatura de la ceniza en el gasificador.

T_{amb} – Temperatura ambiente, 25 °C.

Poder calórico del gas: El gasificador evaluado no cuenta con un equipamiento para medir la calidad del gas generado, por lo que se toman los principales elementos constituyentes del gas y sus respectivos por cientos. A partir de estos valores, se determinó el poder calórico del gas por la siguiente expresión:

$$PCI_{gas} = \sum_{i=1}^{i=n} x_i \cdot PCI_i \quad (2.10)$$

Donde:

x_i – Porcentaje volumétrico de cada componente del gas.

PCI_i – Poder calórico inferior de cada componente del gas.

2.3.3. Eficiencia del gasificador

En el análisis termodinámico de un gasificador es importante definir dos conceptos fundamentales, la eficiencia en frío y la eficiencia en caliente:

Eficiencia en frío:

$$\eta_{frio} = \frac{m_{gas} \cdot PCI_{gas}}{m_{biom} \cdot PCI_{biom} + m_{aire} \cdot h_{aire}} \quad (2.11)$$

En esta expresión h_{aire} es la entalpía del aire a temperatura ambiente ($T_{amb}=25\text{ °C}$)

Eficiencia en caliente:

$$\eta_{cal} = \frac{m_{gas} \cdot PCI_{gas} + m_{gas} \cdot h_{gas}}{m_{biom} \cdot PCI_{biom} + m_{aire} \cdot h_{aire}} \quad (2.12)$$

La entalpía del gas producido (h_{gas}) es la suma de la entalpía de sus componentes

Conclusiones parciales:

1. Es condición necesaria determinar las propiedades fisicoquímicas de la cáscara de arroz para lograr un proceso de gasificación eficiente.
2. Los balances de masa y energía en el gasificador son imprescindibles para la comprensión de los fenómenos que envuelven el proceso.
3. Con el cálculo de la eficiencia del gasificador se puede evaluar el desempeño del mismo.

Conclusiones

1. La caracterización y evaluación de la materia prima a usar en la gasificación es necesaria para mejorar la eficiencia y rendimiento de los reactores.
2. El gasificador de cáscara de arroz FBG-400 garantiza un ahorro importante de combustible diésel para el secado de arroz.
3. Los balances de masa y energía permiten analizar la estabilidad del proceso y su rendimiento, se determina la manera en la que se distribuyen los componentes en los sistemas o entre los sistemas en contacto directo, además son de gran utilidad para cuantificar la energía transferida o consumida.
4. La eficiencia del gasificador evalúa la transformación de la biomasa gasificada respecto a la energía producida.

Recomendaciones

- ✓ Mantener materia prima de calidad para el funcionamiento continuo de la tecnología.
- ✓ Extender esta tecnología a todas las instalaciones que existen en el país para el secado de arroz.
- ✓ Diversificar el uso del gas de síntesis con otros fines energéticos.
- ✓ Utilizar este Trabajo de diploma como material de consulta de otros estudiantes que desarrollen un tema relacionado con la cáscara de arroz para la producción de energía.

Bibliografías

- Acevedo, M., Castrillo, W. y Belmonte, U. 2006. Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía Tropical*, 56 T(2), 17-24.
- Ankur. (2011). Manual de operación del gasificador de Biomasa Ankur Scientific Energy Technologies FBG-400. Sama, Barioda, India. 38 p. Recuperado de: <http://www.ankurscientific.com>
- Arias Ortiz, Rosa A. y Meneses Cruz, Juan D. (2016). Tesis en opción al Título de Licenciado en Química Industrial. 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.
- Arsenales, J.; López V.; Ramos, R. y Sánchez, J.M. (2016). Thermal degradation of paper industry wastes from a recovered paper mill using TGA. Characterization and gasification test. *Waste Management* 47, 225-235.
- Boletín informativo Renovable.cu. centro de gestión de la Información y desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA), CITMA. N° 11/Noviembre 2020. Artículo sobre Gasificación de la biomasa.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*, Burlington: Academic press.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction. Practical Design and Theory. Second Edition*, Amsterdam: Academic Press.
- Bridgwater, A.V; Toft, A.J. y Brammer, J.G. (2002). "A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustión." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 181-248.
- Caballero, Ch. A., Rojas, S.M.P., Villalobos, B.M.M., Davis, B.A., Roldan, V.C., Moya, R. y Puente, U.A (2019). Simulación de gasificación de biomasa enriquecida con hidrocarburos. *Revista Tecnología en Marcha*, p. 60-68.
- Carrasco, J. (1997). "Producción de electricidad de biomasa. Tecnología y Viabilidad. Nuevos desarrollos". *La biomasa – Fuente de energía y productos para la agricultura y la industria*. Ciemat España.

- Castells, Xavier Elías. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid. Ediciones Díaz de Santos.
- Cataño, J., Guzman, K. y Perpiñan, M. Efecto de la incorporación de cascarilla de arroz sobre las propiedades mecánicas de concretos y bloques de suelo cemento. Una Revisión Sistemática, 2021, p. 1- 14.
- Cepero Casas, Luis e Iglesias Vaillant, Yunier. Artículo sobre Aprovechamiento energético de los residuos resultantes del procesamiento del arroz para sustituir combustibles fósiles en la UEB Amarillas del municipio Calimete en la provincia de Matanzas. Boletín informativo.cu. No.11 de noviembre del 2020.
- Cerdá, E. (2012). "Energía obtenida a partir de biomasa", en: Cuadernos Económicos de Ice. (83), 117-140
- Clavijo Ortiz, Gerson D. (2015). *Formulación del modelo teórico del proceso de gasificación de biomasa de un reactor de lecho fijo*. (Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Mecánico). Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Colombres, F. J. F. (2017). La gasificación como alternativa para generación distribuida de energía eléctrica a partir de biomásas residuales de Tucumán, Argentina.
- Cruz, P.J.C.; González, R.J.E.; Perdomo, G.L. Valoración del uso de la cáscara de arroz como material termoaislante en la fundición de piezas de acero. Minería y Geología, 2020, vol. 36, no 4, p. 465-482.
- Dalzell, S. A; Shelton, H. M; Mullen, B. F; Larsen, P. H y McLaughlin, K. G. (2006). Leucaena: A guide to establishment and management. Meat & Livestock Australia Ltd., Sydney, Australia. Recuperado de:
<http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/view/547/319>
- Díaz Tovar, D. (2019). Usos potenciales de cascarilla de arroz en el departamento de Casanare.
- Domínguez, F. (2017). Cogeneración de energía, eléctrica y térmica, mediante un sistema híbrido biomasa-solar para explotaciones agropecuarias en la Isla de Cuba. Recuperado de: <http://www.060.es>.

- Durango Padilla, Jairo L. (2015). *Análisis termoeconómico de gasificación integrada a motores de combustión interna, empleando cascarilla de arroz en el Departamento de Córdoba*. (Proyecto de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería con Énfasis en Energías Alternativas). Universidad Libre, Bogotá.
- Echeverría Cruz, Manuel A. y López Mena, Orlando A. (2010). Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico. Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica.
- Fernández García, E. A. (2019). Generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque.
- Figueredo, E., Zequeira, M. E. y Ecológica, Á. P. R. (2017). Incentivos para el manejo de la especie exótica invasora marabú (*Dichrostachys cinerea*) en ecosistemas productivos y de conservación con alto riesgo para el Área Protegida Reserva Ecológica Limones-Tuabaquey. Centro Nacional de Áreas Protegidas. Recuperado de: 50
- García Ramírez, Laura A. y León Suárez, Laura D. (2018). *Análisis energético de un sistema de gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis*. (Trabajo de investigación para optar el título de Ingeniero Químico). Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.
- Gustavsson, J; Cederberg, C. y Sonesson, U. (2011). "Global food Losses and Food Waste," FAO. 2011. Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention., Rome.
- Hawrot-Paw, M., Koniuszy, A., Mikiciuk, M., Izwikow, M., Stawicki, T., & Sędlak, P. (2017). Analysis of ecotoxic influence of waste from the biomass gasification process. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(17), 15022-15030 Recuperado de: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11356-017-9011-8.pdf>
- Hejazi, B. (2017). *Modeling of biomass steam gasification in a dual fluidized bed reactor with/without lime-based CO₂ capture*. (Doctoral dissertation). University of British Columbia. Recuperado de:

<https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0342944>

- Hernández, María Consuelo Soto. Gasificación catalítica de biomasa para la producción sostenible de hidrógeno. 2019. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.
- IDAE-Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Biomasa: gasificación. Madrid.
- Ilie, I. C. (2019). Diseño del proceso de gasificación para los combustibles sólidos recuperados procedentes de una planta de tratamiento mecánico biológico. Recuperado de <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234>
- International Energy Agency, «Glossary: Biomass,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/aboutus/glossary/b/>. [Ultimo acceso: 7 Octubre 2013].
- Kuba, M., Kirnbauer, F. y Hofbauer, H. (2017). Influence of coated olivine on the conversion of intermediate products from decomposition of biomass tars during gasification. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7(1), 11-21. Recuperado de: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13399-016>
- Lesme Jaén, René; Recio Recio, Ángel; Preston, Tomas; Rodríguez, Lylían; Oliva Ruiz, Luis. Análisis Termodinámico de un Gasificador “ANKUR” Modelo WBG-10 trabajando con diferentes biomásas. *Tecnología Química*, vol. XXVIII, núm. 3, septiembre-diciembre, 2008, pp. 71-76 Universidad de Oriente Santiago de Cuba, Cuba. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543757009>
- Lesme Jaén, René; García, L; Oliva, L; Pajarín, J. y Revilla, D. (2016). Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso. *Tecnología Química*, 36(2), 133-144. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v36n2/rtq02216.pdf>
- Lucas y Peso (2012). Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction. Practical Design and Theory. Second Edition, Amsterdam: Academic Press.
- Martillo Aseffe, José Alfonso, et al. Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraft. *Tecnología Química*, 2019, vol. 39, no 2, p. 455-470.
- Masnad, M; John, S; Xiaotao R; BiC, T. y Ellis, J. (2015). “From fossil fuels

towards renewables: Inhibitory and catalytic effects on carbon thermochemical conversion during co-gasification of biomass with fossil fuels,” *Applied Energy*. 140, 196-209.

Meramo, S; Ojeda, K. y Sánchez, E. (2018). Environmental assessment of a biorefinery: case study of a purification stage in biomass gasification. *Contemp. Eng. Sci*, 11, 113-120 Recuperado de:

www.researchgate.net/profile/SamirMeramoHurtado/publication/322957506

Oficina Nacional de Normalización (2010). Comité Técnico de Normalización NC/CTN 3 de Gestión Ambiental NC 827: Agua Potable - Requisitos Sanitarios. ICS: 13.060.20 1ra. Edición. La Habana. Cuba.

Oficina Nacional de normalización. NC 1021. (2014). Higiene Comunal. Fuentes de abastecimiento de agua. Calidad y protección Sanitaria. La Habana. Cuba.

Quintero Coronel, D. A. (2018). Valorización energética y ambiental de carbón mediante su co-gasificación con biomasa residual del proceso de extracción de aceite de palma para uso industrial.

RAE, Real Academia de la Lengua Española, Recuperado de:

<http://dle.rae.es/?id=5YtOE4H>.

Ramírez Ávalos, Edwin I. (2017). *Diseño de investigación: Estudio de prefactibilidad para la implementación de una planta de gasificación en la producción de energía eléctrica, a través de biomasa (cáscara de macadamia) en la modalidad de Generación Distribuida Renovable*.

Rincón Martínez, José María y Silva Lora, Electro Eduardo. Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía. 2014. Pág. 27-153.

Romero Bustos, J. A. (2011). *“Comparación del desempeño de tecnologías de generación eléctrica, aplicada en un hotel de Tequisquiapan, en base a residuos de la biomasa”*, (Tesis. México Dpto. de Ingeniería), Universidad Nacional Autónoma de México.

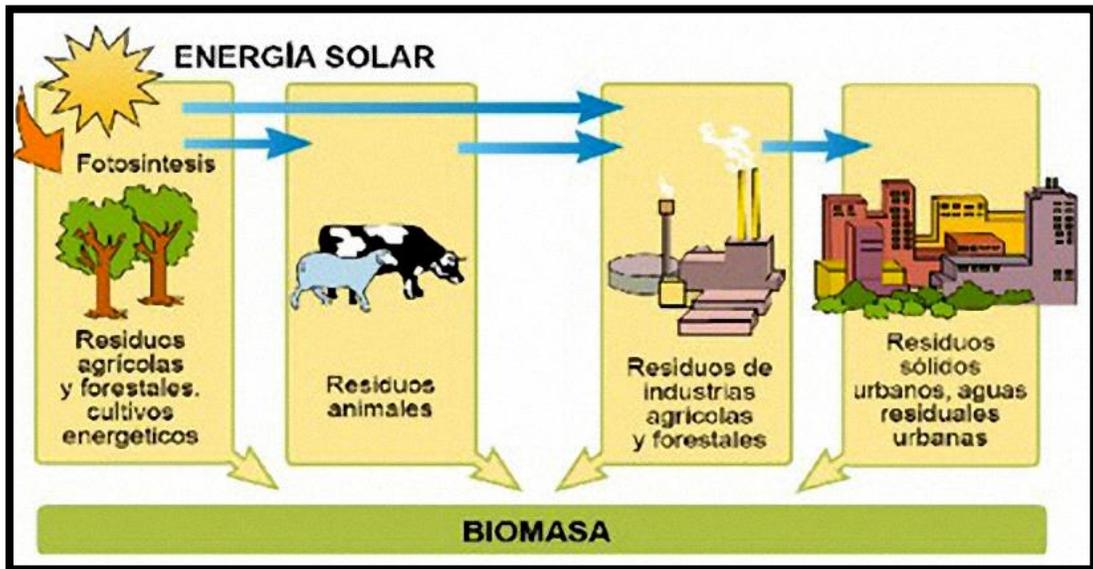
Salem, A. M. M. (2020). Investigation of biomass gasification processes for the production of high quality syngas (Doctoral dissertation). University of

- Glasgow. Recuperado <http://theses.gla.ac.uk/77866/1/2019SalemPhD.pdf>
- Sánchez, A. (2017). Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial Universidad Politécnica de Madrid.
- Singh, A; Sevda, S; Abu Reesh, I.M; Vanbroekhoven, K; Rathore, D. y Pant, D. (2015). Biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technology and sustainability, *Energies*, 8, 13062–13080. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/en8112357>
- Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. (2020). Small-scale biomass gasification systems for power generation (< 200 kW class): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109486.
- Solarte-Toro, J. C., González-Aguirre, J. A., Giraldo, J. A. P., & Alzate, C. A. C. (2021). Thermochemical processing of woody biomass: A review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110376.
- Tamayo Pacheco, J. J., Copa Rey, J. R., Cantos Macías, M., Brito Sauvanell, A. L., y Luz Silveira, J. (2019). Análisis termodinámico de la gasificación por plasma de bagazo de caña., 524-538.
- Tanguila, V., y Ramos, S (2018). *Aprovechamiento de la cascarilla de arroz en elaboración de bloques de alivianamiento, Cantón Joya de los Sachas, Orellana*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Tchabda, A.H. y Pisupati S.V. (2014). A review of thermal co-conversion of coal and biomass/waste. *Energies* 7,1098–1148.
- Tineo Huancas, J. D. (2020). Estudio de factibilidad de una central térmica que aproveche la biomasa residual de Chiclayo.
- Tobío, I. P., Díaz, Y. D., Peil, M., Denfeld, D., Piloto, R. R., y Pohl, S. (2020). Simulación del proceso de gasificación de biomásas a partir de *Jatropha curcas* y *Dichrostachys cinerea*. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, 77(591), 228-235.
- Tudsri, S; Chotchutima, S; Nakamane, K. y Kangwansaichol, K. (2019). Dual use

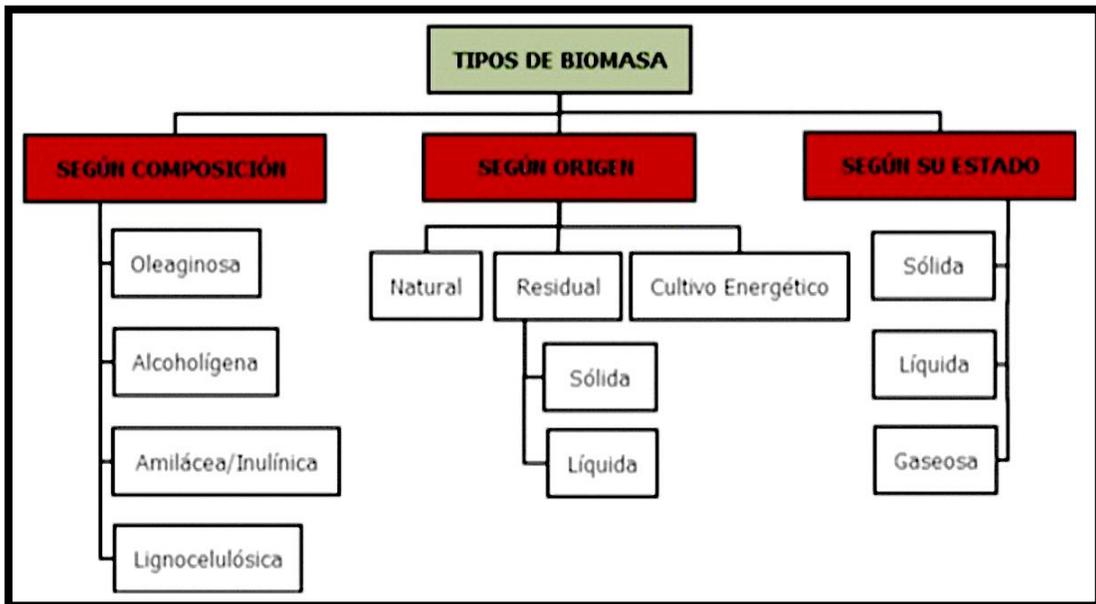
- of leucaena for bioenergy and animal feed in Thailand. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 7(2), 193-199.
- Valdés, M.A. & Vilamajó, D. 2001. La diversidad biológica cubana. Conservación y uso sostenible. *Rev. Ciencia Innovación y Desarrollo*, 6(1), 38-44.
- Woolcock P, Brown RC. (2013). A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy*; 52,54–84.
- Valverde AG, Sarria B, Monteagudo J. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica* [en línea]. 2007 [citada Septiembre 2009]; XIII (37): 255- 260 URL disponible en: <http://www.utp.edu.co/php/revistas/Scientiaettechnica/docsftp/10211425>
- Woolcock P, Brown RC. (2013). A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy*; 52,54–84.

Anexos

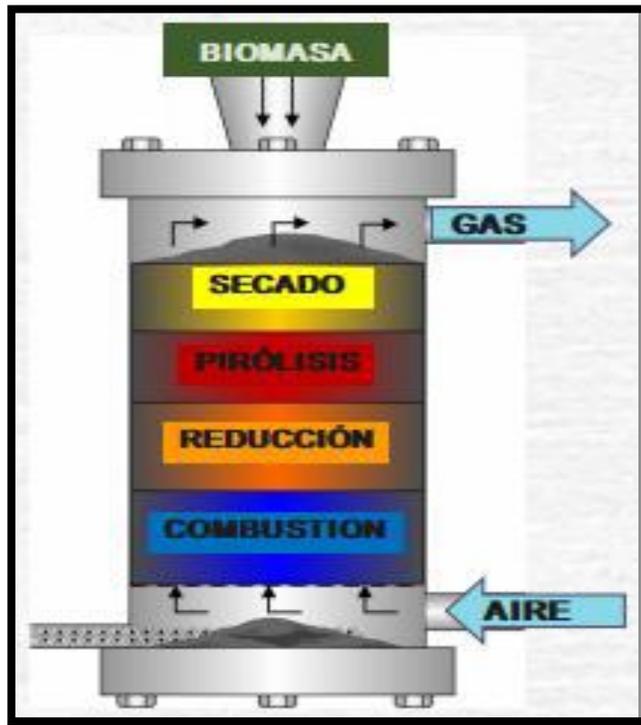
Anexo 1: Origen de la Biomasa.



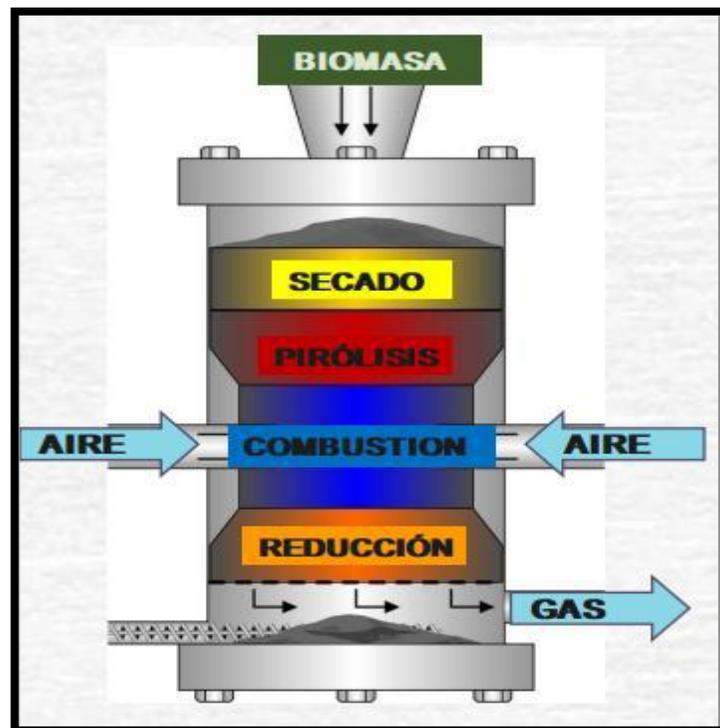
Anexo 2: Tipos de Biomasa según diferentes clasificaciones



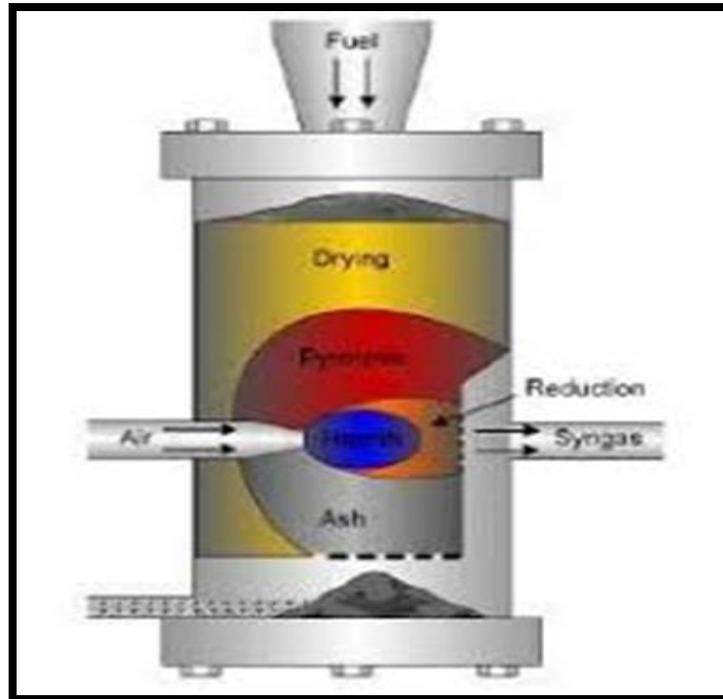
Anexo 3. Gasificador de flujo ascendente (*updraft*)



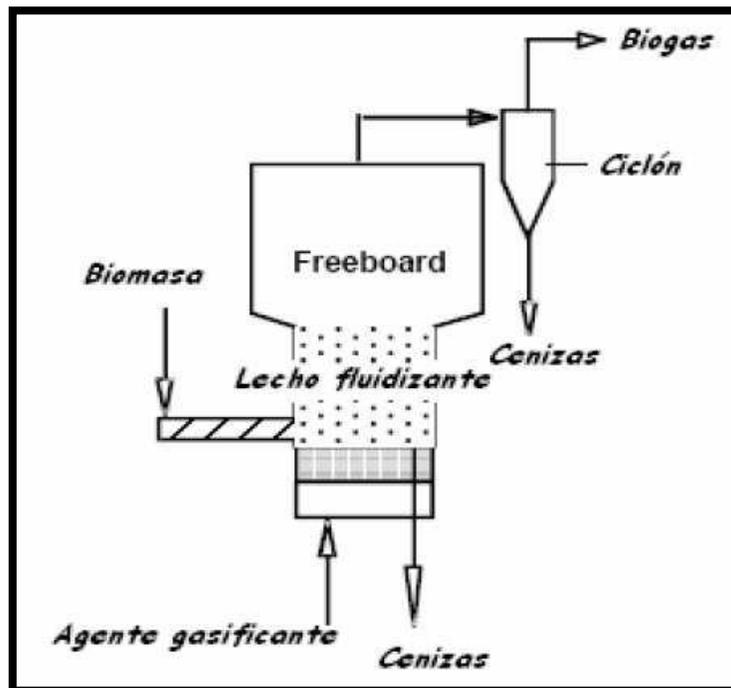
Anexo 4. Gasificador de flujo descendente (*downdraft*)



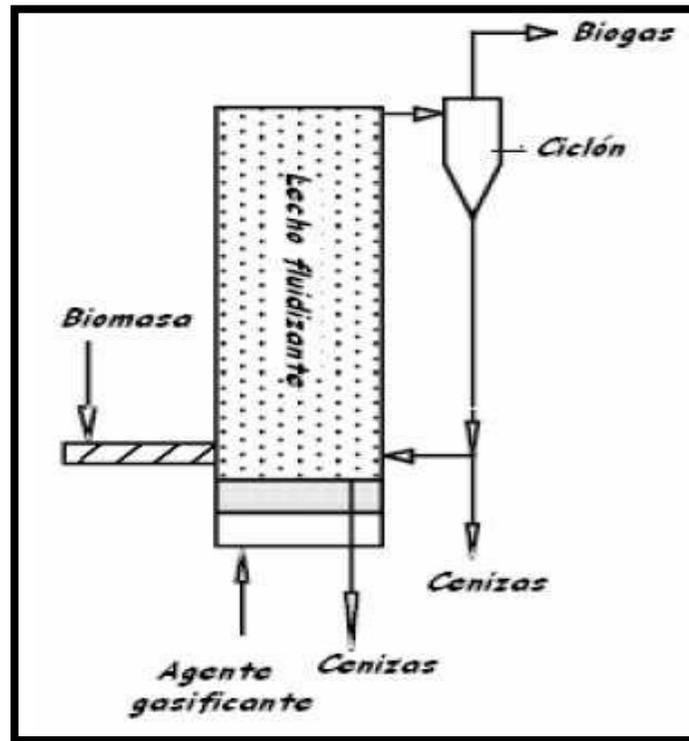
Anexo 5. Gasificador de flujo transversal (*crossdraft*)



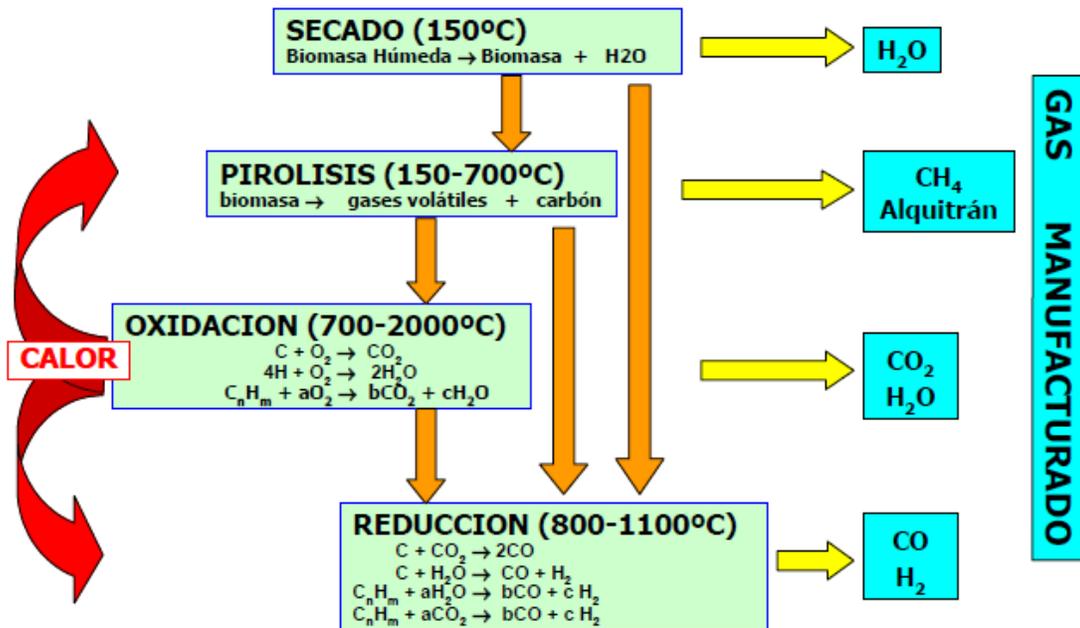
Anexo 6. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante



Anexo 7. Gasificador de lecho fluidizado circulante



Anexo 8. Etapas del proceso de gasificación



Anexo 11. Área interna y externa del gasificador FBG-400 en la UEB Amarillas



Anexo 12. Especificaciones técnicas del Gasificador FBG-400

Gasificador	
Modelo	FBG-400
Capacidad nominal (térmica)	1 008 000 kcal/h
Tipo de gasificador	Downdraft (corriente descendente)
Temperatura de gasificación	1050-1100 °C
Flujo de gas nominal	960 Nm ³ /h
Valor calorífico promedio del gas	1 050 Kcal / Nm ³
Alimentación de combustible	Continua, parte superior abierta
Eliminación del residuo carbonoso	Descarga automática de ceniza seca desde el gasificador a través de un transportador de tornillo refrigerado por agua
Subsistema de refrigeración-limpieza	Depurador Venturi, eliminador de neblina, filtro grueso, filtros finos pasivos y filtros plisados
Puesta en marcha	A través del soplador húmedo
Tipo de combustible	Cáscara de arroz seco
Consumo por hora nominal	450 - 500 kg/h
Porcentaje de ceniza descarga	25 - 30%
Eficiencia de conversión típica (gas caliente)	> 80%
Eficiencia de conversión típica (gas frío)	> 70%
Composición típica del gas	CO - 17±2% H ₂ - 14±3% CO ₂ - 13±3% CH ₄ - 2 to 4% O ₂ - Up to 0.6% N ₂ - Rest