

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



**Trabajo de Diploma**

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Químico.

**Título:** Propuesta para la evaluación de los residuales sólidos y líquidos del proceso de gasificación en un reactor flujo descendente (Combo 40), tecnología Ankur, ubicado en la EEPF Indio Hatuey.

Autora: Thalia Borroto Rodríguez.

Tutor: MSc. Luis Cepero Casas.

Ing. Lorena Gutiérrez Martínez.

Matanzas, 2020.

## **Declaración de Autoridad.**

Yo Thalia Borroto Rodríguez, declaro que soy la única autora de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas y a la Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey", de a darle el uso que estime más conveniente.

---

Thalia Borroto Rodríguez

## Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del Tribunal

---

Firma

---

Miembro del Tribunal

---

Firma

---

Miembro del Tribunal

---

Firma

*“El mundo no será destruido por quienes hacen el mal, sino por aquellos que solo se quedan mirando”.*

*Albert Einstein.*

Dedicatoria.

A mi madre y su esposo, a mi padre, mis hermanos y mis abuelos.

## Agradecimientos.

- A mi madre y toda la familia en general que siempre brindaron ese apoyo incondicional, amor y cariño a lo largo de toda mi carrera como estudiante y en el desarrollo de este trabajo de diploma.
- A mis tutores Luis Cepero Casas y Lorena Gutiérrez Martínez por su ayuda y dedicación para la elaboración del presente Trabajo de Diploma.
- A todos los profesores que participaron en mi formación como ingeniera química.
- A todos mis compañeros que me ofrecieron desinteresada ayuda.

A todos muchas gracias.

## Resumen.

El presente trabajo se encaminó a evaluar los parámetros de calidad de los residuales sólidos y líquidos del proceso de gasificación de biomasa en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey". Con este propósito se describe el proceso tecnológico, el sistema de alimentación y características del reactor, así como el sistema de reacción química durante la gasificación. Se expone el proceso de limpieza y enfriamiento del gas obtenido. Además, se explican los métodos de ensayos para la caracterización físico-química de los residuales líquidos y sólidos del proceso, como: conductividad eléctrica; dureza total (método titulométrico con EDTA y el método cuantitativo); pH mediante el procedimiento electrométrico; turbidez con la técnica nefelométrica; contenido de calcio, magnesio, cloruros y sulfatos, mediante los métodos de EDTA, cuantitativo, cálculo argentométrico y turbidimétrico respectivamente; así como la demanda bioquímica de oxígeno. Por último, se registran las normas vigentes para el vertimiento de estos residuales al medio ambiente.

## Abstract

The present work was aimed at evaluating the quality parameters of the solid and liquid residuals of the biomass gasification process in the Experimental Station of Pastures and Forages "Indio Hatuey". For this purpose, the technological process, the feeding system and characteristics of the reactor are described, as well as the chemical reaction system during gasification. The cleaning and cooling process of the gas obtained is exposed. In addition, the test methods for the physical-chemical characterization of the liquid and solid residuals of the process are explained, such as: electrical conductivity; total hardness (EDTA titration method and quantitative method); pH using the electrometric procedure; turbidity with the nephelometric technique; calcium, magnesium, chlorides and sulfates content, using EDTA methods, quantitative, argentometric and turbidimetric calculation respectively; as well as the biochemical oxygen demand. Finally, the current regulations for the dumping of these residuals into the environment are registered.

## Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo I: Análisis Bibliográfico. ....	4
1.1. Biomasa .....	4
1.1.1. Principales componentes y características importantes de la biomasa .....	5
1.1.2. Procesos de conversión de la biomasa .....	6
1.2. Gasificación.....	7
1.2.1. Características de la gasificación.....	9
1.2.2. Tipos de gasificadores .....	9
1.3. Procesos de la gasificación .....	12
1.4. Agentes gasificantes .....	13
1.5. Gas de síntesis.....	14
1.5.1. Enfriamiento del gas de síntesis .....	15
1.5.2. Depuración y acondicionamiento del gas de gasificación.....	16
1.5.3. Aplicaciones del gas de gasificación.....	16
1.6. Materias primas utilizadas en el proceso de gasificación .....	17
1.6.1. Marabú.....	18
1.6.2. Leucaena .....	19
Capítulo II: Materiales y métodos de investigación. ....	21
2.1. Descripción del proceso de gasificación de biomasa en el reactor Ankur .	21
2.1.1. Sistema de alimentación.....	22
2.1.2. Tolva .....	23
2.1.3. Reactor. ....	23
2.1.4. Sistema de limpieza y enfriamiento del gas.....	23
2.2. Métodos de ensayo para la caracterización físico-química de los residuales sólidos y líquidos del proceso de gasificación .....	27
2.3. Normas de calidad establecidas para el vertimiento de los residuales...	44

Conclusiones.....	46
Recomendaciones.....	47
Bibliografía. ....	48
Anexos. ....	55

## ***Introducción.***

Según Meramo et al. (2018) en las últimas décadas, el interés en la conservación de los recursos de la naturaleza ha aumentado, y los criterios de sostenibilidad del proceso se han utilizado en casi todas las industrias. Asociado con la disponibilidad de recursos, existen preocupaciones sobre el aumento en la demanda mundial de energía, que ha llevado a un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario, la industria de los biocombustibles ha surgido como una alternativa importante no solo para reducir la demanda de energía sino también como una forma de producir variedad de productos químicos.

Según Hawrot-Paw et al. (2017) la biomasa siempre ha sido la principal fuente de energía para las personas y aún 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 en 10-14%.

Según Lesme et al. (2016) la biomasa ha sido presentada como una alternativa promisorio de energía, no solo por su potencial mundial, sino porque es una fuente de CO<sub>2</sub> neutral, su termo conversión genera bajas emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> y es la única fuente de energía renovable capaz de sustituir a los combustibles fósiles en todos sus mercados de energía. En el mundo el potencial de energía a partir de la biomasa se estima en 70 Gtep/año y en la actualidad ella proporciona entre el 7-14 % de la energía consumida, con posibilidades de incremento entre un 6-9 % en los próximos 20 años.

El cambio climático es parcialmente una consecuencia de la combustión de recursos fósiles, y 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 CO<sub>2</sub> como materia prima neutra para la combustión, pirólisis o gasificación (Kuba et al., 2017).

La producción de energía a partir de biomasa ha crecido un 23% entre 1993 y 2011, y es proyectado para 2020 que la producción será de 1.323 Mtoe (Millones de toneladas de petróleo equivalente) (Meramo et al., 2018).

Según Gustavsson et al. (2011) se estima que la población mundial aumentará de aproximadamente 6.5 mil millones a 10 mil millones en 2050.

Para Masnad et al. (2015) en los próximos 30 años, se espera que la demanda mundial de energía aumente en un 56%.

Según Razm et al. (2019) se avecinan tiempos difíciles para la próxima generación para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y utilizar nuestros residuos. Recientemente, el uso de residuos agrícolas y forestales para la producción de energía ha ganado una gran atención debido a su disponibilidad, diversidad y de cómo ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para Hawrot-Paw et al. (2017) en el proceso de gasificación, el llamado gas sintetizado, es primariamente formado por CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>, y que incluye además cenizas y alquitrán como resultado de una incompleta conversión de biomasa. Uno de los componentes formados en el proceso son hidrocarburos que incluyen poli-hidrocarburos aromáticos cíclicos. Estos son residuos orgánicos duraderos, que se atan fácilmente en la capa superficial del suelo, pueden acumularse en plantas, y de esta manera, pueden incorporarse en la cadena alimentaria, convirtiéndose en un riesgo para la salud humana y la vida. Los métodos fisicoquímicos utilizados para controlar este tipo de contaminación a menudo aumentan el problema en lugar de disminuirlo o eliminarlo.

Para Cuba, por sus condiciones de país no petrolero y su posición geográfica tropical, resulta perspectivo el uso de la gasificación de biomasa como fuente renovable de energía. Esta es una alternativa tecnológica apropiada para el medio rural cubano.

Valdés. M y Vilamajó. D, (2001) plantean que la *Dichrostachys cinerea*, planta de la familia de las fabáceas, conocida en Cuba como "marabú", es un arbusto o arbolito exótico de una muy notable plasticidad ecológica, que ha llegado a convertirse en la plaga más impactante en los campos cubanos. Esta habilidad está favorecida por su capacidad de adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas, la que le permite su exitosa propagación y persistencia.

En diciembre de 2009, se realizó el montaje y puesta en marcha del gasificador y el grupo electrógeno de 20 kW en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (anexos 1 y 2). Dicho gasificador se alimenta con marabú y residuos de las podas de los sistemas agroforestales como la leucaena, pero sus residuales sólidos y líquidos son vertidos en las áreas a su alrededor.

Por lo expuesto anteriormente, se plantea como Problema de investigación el siguiente:

¿Cómo caracterizar los residuales sólidos y líquidos que se originan en la Planta de Gasificación de Biomasa de la EEPF Indio Hatuey, con el empleo del Marabú o la Leucaena, que permitan su posterior utilización o vertimiento al medio ambiente?

Para solucionar este problema se plantea la siguiente Hipótesis:

Si se definen los métodos de ensayos químicos necesarios, teniendo en cuenta las normas de vertimiento de estos residuales se podrían caracterizar y definir posibles usos y condiciones de vertimiento.

Objetivo General: Evaluar los residuales que se originan en la Planta de Gasificación de Biomasa, Combo 40, tecnología ANKUR, en la EEPF Indio Hatuey.

Objetivos específicos:

1. Descripción de la tecnología de gasificación de biomasa Combo 40 de la EEPF Indio Hatuey.
2. Evaluación de los parámetros de calidad de los residuos sólidos y líquidos de dicho proceso de gasificación.
3. Propuesta de tratamiento a los contaminantes identificados en el proceso de gasificación de biomasa.

## **Capítulo I: Análisis Bibliográfico.**

En este capítulo se define la biomasa y se describen los componentes, características y los procesos de conversión. Se aborda también la gasificación, sus características y los tipos de gasificadores. Se precisa acerca de los tipos de gasificadores, los procesos que ocurren en la gasificación, así como los agentes gasificantes, el gas de síntesis y la materia prima que se utiliza para dicho proceso.

### **1.1. Biomasa**

García. L y León. L, (2018) plantean que la biomasa es toda materia orgánica derivada de las plantas como un resultado del proceso de conversión fotosintética, o derivada de animales, la cual se destina a almacenar energía química para producir calor, electricidad o combustibles para el transporte.

En el campo energético, se entiende por biomasa cualquier materia que haya tenido su origen inmediato en un proceso biológico. Esto incluye los materiales lignocelulósicos, tales como residuos agrícolas y cultivos energéticos, tanto herbáceos como leñosos, residuos forestales y de industrias de la madera, los efluentes y residuos agroalimentarios, residuos ganaderos, fracciones orgánicas de residuos municipales o domésticos y lodos de depuradora de aguas residuales (Domínguez, 2017).

García. L y León. L, (2018) indican que la biomasa tiene un carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético; esta energía se libera rompiendo los enlaces de los compuestos orgánicos en un proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua.

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.

La biomasa se refiere a toda materia orgánica que proviene de plantas, árboles o desechos de animales que pueden, mediante procesos específicos, ser

convertidos en energía. Dependiendo de su rigen puede dividirse en biomasa Natural con todos los residuos de la agricultura como el maíz, café, cáscara de macadamia, arroz, del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y biomasa residual con los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros) (Ramírez, 2017).

### **1.1.1. Principales componentes y características importantes 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: importante para determinar el tipo de subproducto energético a generar o tipo de combustible; se puede decir que los desechos animales producen altas cantidades de gas metano, mientras que la madera puede producir un gas denominado “gas pobre”. Las características físicas se relacionan con el tratamiento previo que sea necesario aplicar a la biomasa.
- Contenido de humedad (H.R.): 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.
- Porcentaje de 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 cascarilla 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. Caso contrario los materiales con baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte.
- Recolección, transporte y manejo: las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo de la biomasa son factores determinantes en la determinación de los costos de inversión y operación en todo el proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional.

### **1.1.2. Procesos de conversión de la biomasa**

Tchabda y Pisupati, (2014) plantean que existen varios métodos de conversión de biomasa (termoquímico, bioquímico, fisicoquímico), que permiten liberación de energía química inherente y obtención de esta manera energía térmica o biocombustibles.

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

- 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: 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. Fermentación alcohólica, 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.

## **1.2. Gasificación**

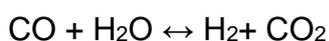
La gasificación es la producción de un gas combustible con características muy similares al gas natural, por la acción de calor en un medio casi anóxico mediante la descomposición térmica de la materia prima (Romero, 2011).

Para Singh et al. (2015) la gasificación de biomasa es un proceso termodinámico 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.

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 H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>,

hidrocarburos ligeros), así como alquitrán líquido y contaminantes menores, utilizando agentes gasificantes tales como aire, oxígeno, vapor, dióxido de carbono o sus mezclas (Hejazi, 2017).

Según Meramo et al. (2018) en la gasificación se puede obtener gas de síntesis como producto final, compuesto principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono. 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).

Para Salem, (2020) la gasificación es un proceso termoquímico que convierte un combustible sólido en un combustible gaseoso a temperaturas entre (700-900) °C. Produce monóxido de carbono, hidrógeno y pequeñas cantidades de metano como productos deseados con otros gases no deseados como el nitrógeno, dióxido de carbono y otros hidrocarburos. En la gasificación, los volátiles orgánicos no son rápidos condensadores, por lo que generalmente se transportan con los productos gaseosos, formando una sustancia viscosa llamada alquitrán. Tanto el alquitrán como el carbón son indeseables para cualquier aplicación posterior, por ejemplo, cuando utilizamos gases productores en motores de combustión interna y turbinas de gas. La separación de alquitrán es un desafío importante para usar el gas de síntesis producido porque se condensará y causará bloqueo en motores y válvulas.

### **1.2.1. Características de la gasificación**

Ilie, (2019) plantea que en la gasificación la temperatura de operación es superior a 600 °C, aunque la temperatura exacta del proceso depende del tipo de reactor y de las características de los residuos sólidos obtenidos, en particular de la temperatura de fusión de las cenizas. Dependiendo de la temperatura de operación se distinguen las siguientes características:

- Gasificación de baja temperatura, alrededor de (600-900) °C. Esta tecnología requiere que la alimentación tenga un contenido en humedad igual o inferior al 10%, por lo que requiere de un proceso previo de secado.
- Gasificación de alta temperatura, que puede alcanzar los 1200 °C. Esta tecnología se suele usar para tratar mezclas de residuos carbonosos que incluyen papel, plástico y residuos orgánicos con un contenido en humedad de hasta un 30%.
- Gasificación por plasma, se lleva a cabo a altas temperaturas, alrededor de unos 5000 °C. Se pueden tratar cualquier tipo de residuos, excepto residuos nucleares, ya que, a dicha temperatura, toda la materia se descompone en sus principales constituyentes. La materia orgánica se convierte en gas de síntesis mientras que la materia inorgánica, se vitrifica, dando lugar a un residuo inerte. El gas de síntesis generado contiene menos contaminantes, ya que, debido a las altas temperaturas y a la casi ausencia de oxígeno en el reactor, no se pueden formar compuestos tóxicos como furanos, dioxinas, NO<sub>x</sub> o SO<sub>x</sub>.

### **1.2.2. Tipos de gasificadores**

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 y gasificadores de flujo arrastrado (Basu, 2010).

- Gasificadores de lecho fijo.

Basu, (2013) plantea que los gasificadores de lecho fijo son económicos y tienen un diseño simple, que es uno 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 ascendente y descendente basados en la dirección de alimentación de biomasa y gas de síntesis producido (anexo 3).

Ambos gasificadores, incluyen las cuatro zonas principales de gasificación; secado, pirólisis, combustión y reducción. Sin embargo, el flujo de producción de gas de síntesis es diferente. En el gasificador de tiro ascendente, el medio aire/gasificador y el combustible están en la dirección opuesta, y generalmente el gas de síntesis se produce desde la parte superior del gasificador. Por otro lado, en los gasificadores de tiro descendente los flujos están en la misma dirección, y el gas de síntesis se descarga desde el fondo del gasificador. A pesar de que los gasificadores de tiro ascendente pueden acomodar altos niveles de humedad y contenido de cenizas, tienden a producir un contenido de alquitrán demasiado alto (30-150g/Nm<sup>3</sup>). Como resultado, el gas producido a partir de ellos solo se debe usar en aplicaciones simples como la cocción directa donde el gas no necesita limpieza. Los gasificadores de tiro descendente, por otro lado, producen pequeñas cantidades de alquitrán (hasta 6g/Nm<sup>3</sup>) y tienen arranque rápido (30 min). El gas producido por el gasificador de tiro descendente se puede utilizar en motores de combustión y algunas otras aplicaciones. A pesar de las pequeñas cantidades de alquitrán producido a partir de gasificadores de tiro descendente, el gas producido todavía necesita más limpieza para ser utilizado en algunas aplicaciones prácticas, por ejemplo, motores de turbina de gas y, por lo tanto, el proceso de modelado de la formación de alquitrán a lo largo de los gasificadores de tiro descendente podría ayudar a comprender mejor el todo el proceso y conduce a una mayor reducción del alquitrán.

- Gasificadores de lecho fluidizado.

Los gasificadores de lecho fluidizado (anexo 4), generan una mejor mezcla y una distribución uniforme de la temperatura que gasificadores de lecho fijo, debido a su diseño en comparación con el diseño de otros gasificadores. En el fluidizado la cama está hecha de sólidos granulares llamados materiales de cama, mantenidos en una condición semi-suspendida por la velocidad media del

gasificador a través de ellos, tienen una amplia gama de aplicaciones dependiendo del diseño y tamaño del gasificador, pero generalmente a gran escala, 1-100 MW. Mientras que su producción de alquitrán es entre gasificadores ascendentes y descendentes ( $\sim 10\text{g/Nm}^3$ ) (Salem, 2020).

- Gasificadores de flujo atrapado.

Los gasificadores de flujo atrapado (anexo 5), son exitosos y ampliamente utilizados para grandes aplicaciones de gasificación. Sin embargo, están clasificados como los más caros debido a su diseño y condiciones de trabajo (partículas molidas y medio de gasificación). Por otro lado, ellos tienen la mayor producción de energía (hasta 1000 MWth) dependiendo de la capacidad requerida.

Debido a las comparaciones e ilustraciones anteriores para diferentes tipos de gasificadores, los gasificadores de biomasa de tiro descendente tienen grandes ventajas. Las principales ventajas se pueden concluir en pequeña tasa de producción de alquitrán, arranque rápido, fácil mantenimiento y operación, menores 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 (Salem, 2020).

Ilie, (2019) plantea que existen dos tipos de gasificadores más como el de parrilla y el plasma:

- Gasificadores de parrilla.

Los gasificadores de parrilla móvil son similares a las parrillas de incineración. Son tecnologías muy utilizadas en plantas de incineración con recuperación de energía que recientemente se han empezado a aplicar en procesos de gasificación. La conversión ocurre en dos etapas: primero se gasifican los sólidos recuperados y posteriormente se oxidan a alta temperatura los gases formados en la cámara de gasificación.

- Gasificadores de plasma.

Finalmente, los gasificadores de plasma. Son recipientes que trabajan con muy poco oxígeno, por lo que la materia prima introducida al reactor no se quema, sino que se descompone debido a las altas temperatura que soporta. El calor es

suministrado mediante antorchas generando temperaturas próximas a los 5000 °C. La función de las antorchas es la creación del “arco de plasma”. El arco se produce en el espacio situado entre dos electrodos conductivos que al llenar dicho espacio con un gas que se pueda ionizar (argón o helio), es capaz de descomponer la alimentación introducida al reactor

### **1.3. Procesos de la gasificación**

En el proceso de gasificación ocurren una serie de reacciones químicas básicas (anexo 6), las cuales, algunas son de tipo endotérmicas y otras exotérmicas.

Este se lleva a cabo por medio de 4 etapas (anexo 7):

- 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 y varios gases (gases síntesis), esto a temperaturas que oscilan entre los (200-500) °C. La reacción es endotérmica, descomponiendo la biomasa generando los residuos anteriormente mencionados (Cerdá, 2012).

La aportación de calor en la pirolisis 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. 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/Nm<sup>3</sup>. 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 (10-15 MJ/Nm<sup>3</sup>) 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 H<sub>2</sub> y CO por lo que se puede aumentar ligeramente su contenido energético (10-20 MJ/Nm<sup>3</sup>). 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 ( $>30 \text{ MJ/Nm}^3$ ), 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, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. 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) (anexo 8). El rendimiento del proceso de gasificación también se ve modificado por estos factores, en un rango de 70-80 %.

Las condiciones de operación y la tecnología de gasificación van a delimitar el uso final del gas: 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, etc.

### **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 equivales 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/liquido refrigerante, usando normalmente agua. En estos últimos se puede evitar la aportación adicional de energía 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 amoniaco 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 gasificación**

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/H<sub>2</sub> y mejorar la calidad del gas previo a su aprovechamiento energético o a su conversión en combustibles limpios (H<sub>2</sub>, síntesis química) y contribuir a la reducción progresiva de emisiones responsables de la acidificación (NH<sub>3</sub>) y del efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) (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 (T>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 gasificación**

El gas de gasificación puede ser empleado en multitud de aplicaciones para obtener diferentes productos (anexo 9). Algunas de estas aplicaciones permiten obtener:

amoniaco, 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, etc. Las aplicaciones industriales en sí mismas cubren varios tipos de secado, calefacción, aplicación de caldera, fabricación de CO<sub>2</sub>, etc. 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 diesel (es decir, motor de encendido por compresión o de CI) o un motor (es decir, motor de ignición por chispa o SI) de petróleo (gasolina). Dado que la mezcla de gas pobre-aire no se auto-enciende a presión y temperatura normal en el motor, no es posible hacer funcionar el motor de diesel al 100% con gas, y se necesita una inyección de diesel 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 diesel, “el remplazo del diesel” se convierte en parámetro clave, ya que la economía depende en gran medida de qué por ciento del consumo normal total de diesel puede ser sustituido por el gas (Ankur, 2011).

#### **1.6. Materias primas utilizadas en el proceso de gasificación**

Se puede gasificar una amplia gama de materiales para producir gas valioso. El carbón y a biomasa se utilizan ampliamente en el proceso de gasificación y combustión. En el estudio actual, se utilizan para el proceso de gasificación de biomasa, residuos forestales como es el caso del marabú y la leucaena debido a su gran potencial energético.

### **1.6.1. Marabú**

Según Figueredo et al. (2017) el marabú (*Dichrostachys cinérea*) tiene su origen en África del Sur. Es introducida en Cuba en el Siglo XIX. Se reconoce que su vía de entrada se produce en el rumen de vacunos procedente de Colombia. Pertenece a la familia de las Leguminosas, subfamilia Mimosáceas. Las principales características son: la inflorescencia, espiga pedunculada, cilíndrica, colgante, flores pentámeras, sésiles, parte superior hermafrodita (amarillas) e inferiores neutras (purpurescentes). Tiene presencia en Colombia, Islas de Cabo Verde, Gambia, Sudán del Sur, Sudáfrica, Angola, Mozambique, Bostwana y México.

Las semillas son muy duras, coriáceas, y permanecen en el suelo con viabilidad por decenas de años. La raíz principal es profunda, alcanza varios metros de largo, mientras el tallo es leñoso y con gran cantidad de espinas. La planta alcanza de 3 a 6 m de altura. Altamente invasora en zonas en las que el suelo se ha laborado, se propaga más lentamente en suelos vírgenes a través de las semillas, raíces y trozos de tallos. Prefiere los arcillosos, pero se desarrolla bien en suelos pardos, ferralíticos, fersialíticos y aluviales. La sombra, el sobre humedecimiento, el fuego y el ramoneo frecuente por rumiantes representan enemigos naturales de esta especie.

Es una especie muy heliófila. Crece, incluso, en lugares muy altos, hasta 1 500 metros sobre el nivel del mar (en Cuba sobrepasa los 800 msnm). Tiene un amplio rango ecológico en cuanto a precipitaciones, que pueden ser desde menos de 800 mm hasta más de 2000 mm. Sin embargo, no tolera terrenos inundados. Crece achaparrada en sitios secos y forma densos matorrales. Los suelos pueden ser desde ligeros arenosos hasta arcillosos pesados; desde ácidos hasta calizos y ultra básicos.

Según Alba-Reyes et al. (2018) el marabú se encuentra catalogado como una biomasa lignocelulósica, compuesta fundamentalmente por tres polímeros: lignina, celulosa y hemicelulosa, de acuerdo a sus características se considera como un biocombustible con un rendimiento agrícola de 3,70 kg/m<sup>2</sup>. Diferentes autores reportan que el poder calórico del marabú es superior al de otros compuestos lignocelulósicos como residuos de maíz, bagazo de caña de azúcar.

Para Rivera et al. (2017) la biomasa del marabú se ha reportado como fuente de materia prima apta para la gasificación y para la producción de carbón activado.

Los beneficios ambientales que proporciona el marabú son los siguientes: en primer lugar, es una leguminosa fijadora de nitrógeno atmosférico, recicla gran cantidad de nutrientes y aporta grandes volúmenes de materia orgánica, contribuyendo a la estabilización de los suelos y evitando su erosión. Además, con su cobertura viva y sus profundas raíces, contrarresta la erosión hídrica y eólica, mejorando la infiltración del agua y por tanto reduciendo las escorrentías. Actúa como sumidero del CO<sub>2</sub> atmosférico y con ello contribuye a reducir el calentamiento global. Es también refugio de la fauna silvestre.

### **1.6.2. Leucaena**

Especies arbóreas como Leucaena muestran gran potencialidad para su uso energético debido a que es una especie de rápido crecimiento, con facilidad de rebrote y con un poder calórico de 19000 kJ kg<sup>-1</sup>, superior en comparación a especies como Gmelina arborea (16000 kJ kg<sup>-1</sup>) o Eucalyptus deglupta (17900 kJ kg<sup>-1</sup>). (Salazar-Zeledón, 2016).

Según Tudsri et al. (2019) Tudsri Leucaena es una planta de doble propósito adecuada para la producción de biocombustibles y alimentos para el ganado (ganado lechero y vacuno, búfalo y cabras). Tiene un alto rendimiento de tallo leñoso bajo cortes repetidos y tiene una composición química adecuada para una excelente generación de calor en la combustión. Los rendimientos de la hoja, que es un subproducto de este proceso, también son elevados y la hoja tiene un alto valor nutritivo como alimento para animales.

Según Dalzell et al. (2006) para evitar aumentar la cosecha de leña de los bosques naturales locales, una alternativa es establecer granjas de árboles para proporcionar un suministro continuo de madera biomasa. Leucaena (*Leucaena leucocephala*) tiene potencial para este propósito y también para suministrar madera para la producción de bioenergía tiene las siguientes ventajas sobre otros árboles de rápido crecimiento: puede reparar el nitrógeno atmosférico mientras que otros árboles como los eucaliptos no pueden; y las hojas y los tallos verdes jóvenes son muy sabrosos y altamente nutritivo para la alimentación

animal. Como esta especie de árbol tiene un sistema de raíces profundas, hace que sea resistente y productiva durante la estación seca, y puede reducir los gases de efecto invernadero mediante la absorción de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

## **Capítulo II: Materiales y métodos de investigación.**

En este capítulo se describen las características constructivas y operacionales del reactor Ankur, donde ocurre el proceso de gasificación de la biomasa. También se explican las técnicas experimentales a utilizar en la caracterización de los residuales sólidos y líquidos del proceso de gasificación de la biomasa. Por último, se exponen las normas de calidad establecidas para el vertimiento de residuales sólidos y líquidos al medio ambiente, específicamente los relacionados con el proceso de gasificación de biomasa.

### **2.1. Descripción del proceso de gasificación de biomasa en el reactor Ankur**

El reactor Ankur es un gasificador, el cual está instalado en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey”, ubicado en la localidad Central España Republicana, perteneciente al municipio Perico, provincia Matanzas. 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 pobre producido se utiliza en un sistema de generación eléctrica con un motor de combustión interna conectado a un generador de corriente alterna de 220V trifásico y 60Hz de frecuencia.

El gasificador es de tipo lecho fijo de flujo descendente. La biomasa se alimenta por la parte superior y varía en dependencia del régimen de trabajo y del tipo de biomasa que se suministre. 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 10).

En el gasificador la biomasa se introduce a través de la puerta de alimentación y se almacena en la tolva (anexo 11). Una cantidad de aire limitada y controlada entra a través de las boquillas de aire. La garganta (u hogar) asegura la producción de gas relativamente limpio y de buena calidad. El reactor contiene carbón vegetal para la reducción de los productos de la combustión parcial a la vez que permite que la ceniza escape a través de una lámina perforada

suministrada en el reactor, la cual es a su vez extraída por el agua circulante desde la cámara de eliminación de ceniza hacia la tina de drenaje y después hacia la piscina de enfriamiento. El gas pasa por el área interior del reactor desde la porción superior de la lámina perforada. La salida del gas está conectada a los diferentes sistemas, es decir, limpiador de gases Venturi, caja de drenaje, filtro grueso, filtro fino activo, 2 filtros finos pasivos, válvula de control del gas, ventilador seco, antorcha con válvula, filtro de seguridad y motor de gas. En modo FBG, debe conectarse un Venturi de gas entre el filtro fino pasivo y el ventilador seco. El gas producido en el gasificador (1) es lavado y enfriado en el lavador (4) con agua enfriadora que recircula en la piscina de enfriamiento con la ayuda de la bomba del lavador. El gas es separado del agua en la caja de drenaje (5) e introducido en el filtro grueso (7), los filtros finos (8 y 9), el ventilador de secado (11), la antorcha con la válvula de antorcha (12), un filtro de seguridad (13) y el motor (15). El gas enfriado y limpio y el aire son absorbidos hacia el motor a través de un mezclador mariposa que consiste en una disposición de tuberías y válvulas de conexión. El gasificador se arranca con una bomba limpiadora, para arrancar el sistema del gasificador. Un iniciador eléctrico, operado por baterías, arranca el motor. El gas pobre arranca entonces el motor en modo de gas. Se proporciona una mariposa de control unido a un regulador para controlar la cantidad de gas según la carga eléctrica en el generador, lo que mantiene la frecuencia dentro de los límites. Los paneles de control del motor y el gasificador permiten todos los cambios, las indicaciones y la seguridad de la operación. También se proporciona una cortadora eléctrica de biomasa y un arreglo de secado de las piezas de madera basado en el gas de escape del motor, para que el sistema sea autosuficiente.

### **2.1.1. Sistema de alimentación.**

El sistema de alimentación (anexo 12), almacena biomasa en un compartimento hermético antes de descargarlo en la tolva del gasificador. 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. Se requiere una presión de aire de operación de (5 - 7) kg/cm<sup>2</sup> para los cilindros neumáticos. Cuando se suministra la biomasa al cilindro de alimentación, la puerta inferior se cierra y se abre la superior. 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.

### **2.1.2. Tolva**

La tolva (anexo 13), cumple tres funciones de la gasificación, es decir, el secado, la pirolisis y la combustión. Tiene boquillas de aire neumáticas y manuales para la inducción de aire a la zona de combustión. En dependencia del estimado del sistema y el modo, pudiera tener hasta dos sensores del nivel de madera para dar señales que controlen la alimentación de biomasa, así como el cierre seguro del sistema del gasificador. Hay un motor vibrador para el flujo uniforme de la biomasa, además se proporciona un punto de presión para leer la caída de presión en las boquillas ( $\Delta P_N$ ) con el objetivo de determinar el flujo de aire.

### **2.1.3. Reactor.**

El reactor realiza la función de reducción y por tanto la producción del gas pobre. En el caso del sistema WBG, el reactor es llenado con carbón vegetal del tamaño recomendado, mientras que en el modo FBG, el reactor es llenado con arroz seco carbonizado. Hay un recubrimiento refractario dentro del reactor para los sistemas de gasificadores de la serie Combo y FBG. 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 ( $\Delta P_G$ ), es decir, que determina la condición del lecho de carbón vegetal. Se conecta un manómetro de columna de agua o transmisor de presión para medir la caída de presión en el gasificador, conocida como  $\Delta P_G$ . El sistema de eliminación de ceniza del reactor puede ser la descarga de ceniza seca o húmeda.

### **2.1.4. Sistema de limpieza y enfriamiento del gas**

El sistema de limpieza y enfriamiento del gas caliente se compone de: Ciclón, Lavador de Gases Venturi, Filtro Grueso, Filtro Fino Activo, Filtro Fino Pasivo,

Filtro de Seguridad y Ventilador en Seco. A continuación, se describen las características operacionales de cada equipo.

1. Ciclón: Las partículas finas de carbono del gas caliente se asientan al pasar por el ciclón y son recolectadas en la caja de recolección de cenizas. Hay dos válvulas (neumáticas y manuales) y una caja de recolección de cenizas en el fondo del ciclón. Un sensor de temperatura para medir la temperatura del gas caliente se adapta a la línea de gas caliente desde el ciclón hasta el lavador de gases Venturi.

Mientras el gasificador esté funcionando, la válvula superior antes de la recolección de la ceniza seca debe mantenerse abierta y la válvula inferior después de la recolección de ceniza seca se mantiene cerrada. Para eliminar periódicamente la ceniza caliente del gasificador, la válvula superior se mantiene cerrada primero y entonces sólo la válvula inferior debe estar abierta para evitar cualquier ingreso de aire al sistema. La ceniza debe recolectarse en un foso o contenedor colocado debajo. Después de que cae la ceniza, la válvula inferior de la caja recolectora de ceniza seca debe estar cerrada primero y sólo entonces se abre. En ningún momento deben permanecer ambas válvulas abiertas a la vez.

En modo FBG no se necesita ciclón ya que los niveles de partículas finas en el gas caliente son mucho menores.

2. 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 lavador de gases Venturi.
3. Lavador de gases Venturi (anexo 14): Este realiza el enfriamiento y la limpieza del gas caliente al asperjar agua presurizada sobre este y reducir la temperatura a (40 - 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.

4. Ventilador seco: Este es parte del sistema suministrado según nuestras normas y ayuda a la succión de una cantidad controlada de aire hacia el gasificador para la combustión parcial y el suministro de gas pobre al punto de uso final. Hay una válvula manual de control del gas adaptada a la succión del ventilador para controlar el flujo de gas pobre hacia el motor.
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 ( $\Delta PCF$ ) nunca debe ser más baja de (30 - 35) mm en las condiciones estimadas. Cuando la  $\Delta PCF$  llega a 80 mm, el medio del filtro debe ser remplazado con arroz seco carbonizado fresco. Generalmente, esto debe hacerse en 24 horas. El arroz carbonizado utilizado se vacía a través de la puerta del fondo y después de cerrar herméticamente las puertas del fondo, se añade arroz carbonizado fresco a través de las puertas superiores hasta el nivel marcado y ambas puertas superiores deben cerrarse herméticamente. 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. Filtro fino activo y filtro fino pasivo (anexo 15): 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 WBG, un filtro fino activo y un filtro fino pasivo son parte del sistema y son llenados con serrín como medio de filtrado mientras que, en el caso de 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 presión 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. Esto es muy importante para el funcionamiento efectivo del filtro.

En el caso de los sistemas WBG, cuando la  $\Delta P$  del filtro fino activo es aproximadamente 80 mm, se rota el rotor en el fondo del filtro (esta acción está incorporada a través de un rotor controlado por un cronómetro automático). Sin embargo, si la caída no es sustancial, se elimina el medio de filtrado usado y se llena con medio fresco hasta el nivel marcado. Generalmente, después de 100 a 150 horas, todo el medio de filtrado debe ser cambiado vaciando el filtro a través de las puertas inferiores.

En el caso de los filtros finos pasivos, la capa superior se mezcla diariamente y se observa la caída de presión. Cuando  $\Delta P$  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 200 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 de seguridad (anexo 16): Este cumple la función de limpieza final del gas pobre y también actúa como un filtro de seguridad para bloquear el flujo de gas en caso de que el gas sucio llegue hasta este punto.

El filtro de seguridad se suministra con un punto de presión para medir la caída de presión en la bolsa de filtrado de tela fijada en el interior del mismo.

La caída de presión inicial ( $\Delta PSF$ ) para una nueva bolsa debe ser de (3 - 5) mm en el manómetro (el cual se conecta en ambos puntos de presión en el filtro de seguridad). Cuando  $\Delta PSF$  alcanza 40-50 mm, se cambia esta bolsa de filtrado por una nueva.

Generalmente, esta bolsa de filtrado debe ser revisada después de aproximadamente 500 horas de operación del gasificador, si se encuentra OK, entonces después de 1 000 horas, se lava la bolsa usada en diesel y

después con detergente, se enjuaga, se seca y se almacena para uso posterior.

La larga duración del filtro de seguridad depende sobre todo del mantenimiento adecuado del sistema de filtrado y también del funcionamiento normal del gasificador. En caso de que exista entrada de agua debajo del filtro de seguridad, se elimina dicha agua condensada diariamente cuando el motor y el gasificador no estén funcionando.

## **2.2. Métodos de ensayo para la caracterización físico-química de los residuales sólidos y líquidos del proceso de gasificación**

El sistema de enfriamiento y limpieza del gas de dicha planta de gasificación permite el aprovechamiento eficaz de este para su posterior uso. Los residuales obtenidos en estos sistemas deben ser analizados para evitar la contaminación ambiental. Según Aguinaga, S. (1996) los ensayos que se utilizan para la caracterización de estos residuales, teniendo en cuenta las normas de vertimiento de residuales al ambiente, son: conductividad eléctrica, dureza total, pH, turbidez, contenido de calcio, magnesio, cloruros y sulfatos, así como la demanda bioquímica de oxígeno.

### **1) Determinación de la conductividad eléctrica.**

La conductividad es la capacidad que posee una solución acuosa de conducir la corriente eléctrica, a 25°C.

#### Equipos y materiales:

- Medidor de conductividad.
- Celda de conductividad.
- Termómetro con precisión de 0.1 °C, en el rango de (20 - 30) °C, o sensor de temperatura en el equipo.
- Matraz aforado de 1 L.
- Vasos de bohemia.

#### Reactivos:

- Agua destilada y desionizada.
- Solución estándar de KCl 0.01 M: disolver 0.7456 g de cloruro de potasio (KCl) secado previamente 2 horas a 105 °C en agua destilada y diluir a 1

L en matraz aforado a 25 °C. Esta solución estándar de referencia tiene, a 25 °C, una conductividad de 1412  $\mu\text{mhos/cm}$ . Preservar dicha solución en un frasco de vidrio de borosilicato.

Procedimiento:

Es preferible que la medida sea realizada a 25 °C, en caso contrario se deben realizar las correcciones necesarias para la temperatura de trabajo y el resultado final debe ser informado a 25 °C.

Se siguen las instrucciones del medidor de conductividad utilizado y se realiza la determinación de la constante de la celda.

Se enjuaga la celda de conductividad con al menos tres porciones de la solución de KCl 0.01 M y se ajusta la temperatura de la cuarta porción a  $25.0 \pm 0.1$  °C o realizar las correcciones necesarias para que el valor quede determinado a 25 °C y medir.

Si el medidor de conductividad lee resistencia (R) en ohms, se mide la resistencia de esta cuarta porción y la temperatura y se calcula la constante de la celda por la ecuación 2.1:

$$C, \text{cm}^{-1} = 0.001412R_{\text{KCl}}[1 + 0.019(T - 25)] \quad (2.1)$$

donde:

$R_{\text{KCl}}$  = resistencia medida en ohms.

T = temperatura en °C.

Luego la celda de conductividad se enjuaga con una o más porciones de la muestra a medir y se ubica en la muestra de tal manera que no queden retenidas burbujas de aire.

Se ajusta la temperatura de la muestra a  $25.0 \pm 0.1$  °C o se realizan las correcciones necesarias para que el valor quede determinado a 25 °C y por último se mide la resistencia o la conductividad de la muestra.

Cálculos:

Cuando se mide resistencia de la muestra, la conductividad a 25 °C se calcula como:

$$k, \mu\text{mhos/cm} = \frac{1.000.000 \times C}{Rm [1 + 0.019(T-25)]} \quad (2.2)$$

donde:

k = conductividad.

C = constante de la celda en  $\text{cm}^{-1}$ .

Rm = resistencia medida de la muestra en ohms.

T = temperatura de medida en  $^{\circ}\text{C}$ .

Cuando se mide conductividad de la muestra sin compensación de temperatura, la conductividad a  $25^{\circ}\text{C}$  se calcula como:

$$k, \mu\text{mho/cm} = (km)/[1 + 0.0191(T - 25)] \quad (2.3)$$

donde:

km = conductividad medida en  $\mu\text{mho/cm}$  a T  $^{\circ}\text{C}$ .

T = temperatura de medida en  $^{\circ}\text{C}$ .

Ciertos instrumentos poseen compensación de temperatura y leen la conductividad en unidades de  $\mu\text{mho/cm}$ , en dicho caso la lectura es corregida automáticamente a  $25^{\circ}\text{C}$ , y se reporta directamente el valor medido.

## **2) Determinación de dureza total. Método titulométrico con EDTA.**

La dureza total se define como la suma de concentración de iones calcio y magnesio, expresados como carbonato de calcio, en mg/L. Los iones calcio y magnesio forman complejos estables con etilendiaminotetra-acetato disódico. El punto final de la titulación es detectado por el indicador Negro de Eriocromo-T, el cual posee rosado en la presencia de calcio y magnesio y un color azul cuando los cationes están formando complejo con EDTA.

### Materiales:

- Matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Buretas de 25 mL.
- Pipetas aforadas de 10 mL.
- Pipetas graduadas de 1 mL.
- Matraz aforado de 1000 mL.

### Reactivos:

- Solución Buffer: Disolver 1.179 g de etilendiaminotetra-acetato disódico dihidratado y 780 mg de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  o 644 mg de  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  en 50 mL de agua destilada. Agregar a esta solución 16.9 g de cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) y 143 mL de hidróxido de amonio ( $NH_4OH$ ) concentrado. Mezclar y diluir a 250 mL con agua destilada. Almacenar en botella de plástico.
- Indicador Negro de Eriocromo-T (NET): Mezclar 0.5 g de NET con 100 g de NaCl y pulverizar en mortero.
- Solución titulante de EDTA 0.01M: Disolver 3.723 g de etilendiaminotetra-acetato disódico dihidratado en agua destilada y diluir a 1000 mL. Guardar en botella de plástico y titular contra solución patrón de calcio.
- Solución estándar de calcio, 1 g  $CaCO_3/L$ : Pesar 1.000 g de  $CaCO_3$  anhidro seco en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Agregar lentamente solución de HCl 6 N hasta que todo el carbonato de calcio se halla disuelto. Agregar 200 mL de agua destilada y hervir 5 minutos para eliminar completamente el  $CO_2$ . Enfriar y agregar unas gotas de rojo de metilo y ajustar al color intermedio naranja agregando solución 3N de  $NH_4OH$  o solución 6 N de HCl. Transferir cuantitativamente y enrasar a 1000 mL en matraz aforado con agua destilada.

Procedimiento:

Para la titulación de la solución de EDTA, se toman 10.0 mL de solución estándar de calcio y se diluye con 50 mL en un matraz Erlenmeyer.

Se agrega 1.0 mL de solución buffer. El pH deberá estar entre 10.0 y 10.1, en caso contrario se descarta la solución buffer.

Posteriormente se agrega una punta de espátula de reactivo indicador. Se titula con solución de EDTA lentamente y se agita continuamente hasta que el viraje del color de la solución de rosado a azul. Se completar la titulación dentro de los cinco minutos siguientes al agregado de la solución buffer.

Para la titulación de la muestra se selecciona un volumen de muestra que requiera un gasto de EDTA menor a 15 mL y se Diluye la muestra a 50 mL con agua destilada. Se agrega 1 o 2 mL de solución buffer. El pH deberá ser  $10.0 \pm 0.1$ , en caso contrario descartar la solución buffer.

Luego se agregar una punta de espátula de reactivo indicador y se titula con solución de EDTA lentamente, agitando continuamente hasta viraje de color de la solución de rosado a azul. Completar la titulación dentro de los cinco minutos siguientes al agregado de la solución buffer.

Cálculos:

$$T = \frac{P \times V_1}{G_1} \quad (2.4)$$

donde:

T: mg de CaCO<sub>3</sub> equivalentes a 1000 mL de EDTA

P: mg CaCO<sub>3</sub> /L de la solución estándar de calcio

V<sub>1</sub>: volumen de solución estándar de calcio tomados en la titulación de la solución de EDTA, (10.0 mL)

G<sub>1</sub>: gasto de la solución de EDTA consumidos en su titulación

$$\text{Dureza total, mg CaCO}_3/\text{L} = \frac{T \times G_2}{V_2} \quad (2.5)$$

donde:

V<sub>2</sub>: volumen de muestra tomados para la determinación, mL

G<sub>2</sub>: volumen de solución de EDTA consumidos en la titulación de la muestra, mL

### **3) Determinación de dureza. Método Cuantitativo.**

La dureza total se define como la suma de concentración de iones calcio y magnesio, expresados como carbonato de calcio, en mg/L.

Cálculo:

$$\text{Dureza total, mgCaCO}_3/\text{L} = 2.497[\text{Ca}] + 4.118[\text{Mg}] \quad (2.6)$$

donde:

[Ca]: concentración de calcio expresada en mg/L.

[Mg]: concentración de magnesio expresada en mg/L.

### **4) Determinación de pH. Método Electrométrico.**

El pH o la actividad del ion hidrógeno indican a una temperatura dada, la intensidad de las características ácidas o básicas del agua. El pH se define como el logaritmo de la inversa de la actividad de los iones hidrógeno,

$$\text{pH} = -\log [H^+] \quad (2.7)$$

donde:

$[H^+]$  = actividad de los iones hidrógeno en mol/L.

El método consiste en la determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medidas potenciométricas usando un electrodo combinado o un electrodo estándar de hidrógeno de vidrio con un electrodo de referencia.

#### Equipos y materiales:

- Medidor de pH.
- Electrodo de referencia de potencial constante y electrodo de vidrio. O se puede utilizar un electrodo combinado el cual posee ambos electrodos, de medida y de referencia, en un mismo cuerpo.
- Termómetro o sensor de temperatura para compensación automática en el instrumento.
- Agitador magnético y barras agitadoras.
- Vasos de Bohemia.

#### Reactivos:

- Agua destilada y desionizada.
- Agua destilada y desaireada con conductividad menor a 2 umhos/cm. Para desairear calentar a ebullición durante 15 minutos y enfriar.
- Soluciones buffer estándar de pH conocido, necesarias para calibrar el instrumento:
  - a) Solución buffer de pH = 4,004 a 25 °C. Pesar 10,12 g de  $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$  y diluirlo a 1 L en matraz aforado con agua destilada.
  - b) Solución buffer de pH = 6,863 a 25 °C. Pesar 3,387 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  secado previamente a (110-130) °C durante 2 horas y 3,533 g de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ . Disolver y llevar a 1 L en matraz aforado con agua destilada.
  - c) Solución buffer de pH = 10,014 a 25 °C. Pesar 2,092 g de  $\text{NaHCO}_3$  y 2,640 g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , disolver y llevar a 1 L en matraz aforado con agua destilada.

### Procedimiento:

Primeramente, se calibra el instrumento y para ello se deben seguir las instrucciones del medidor de pH. En la calibración se usan como mínimo dos de las soluciones buffer, cuyos valores de pH deben cubrir el rango de pH esperado por la muestra a medir.

Se llevan los buffers y la muestra a la misma temperatura. (Si el equipo lo permite utilizar compensación de temperatura). El valor correspondiente de pH de los buffers debe ser corregido a la temperatura de los mismos.

Se mide el pH de la muestra indicando la temperatura de la misma y se realiza la medida con una agitación moderada para minimizar la entrada de dióxido de carbono y suficiente como para homogeneizar la muestra. Una vez finalizada la medida, se enjuaga y se seca suavemente los electrodos para proceder a ubicarlos en la solución de preserva de los mismos.

### **5) Determinación de turbidez. Método Nefelométrico.**

La turbidez es una medida de la propiedad óptica que causa dispersión y absorción de la luz con disminución de la transmisión en línea recta. Se miden en unidades de turbidez nefelométrica, (NTU).

Este método está basado en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz dispersada, mayor será la turbidez.

### Equipos y materiales:

- Turbidímetro: es un nefelómetro con una fuente de luz para iluminar la muestra y uno o más detectores fotoeléctricos con mecanismo de lectura para indicar la intensidad de la luz dispersada a 90° del camino de luz incidente.
- Tubos para la muestra: de vidrio transparente y limpios.
- Matraces aforados de 100 mL.
- Pipetas aforadas de 5 y 10 mL.
- Balanza analítica de 1 mg de precisión.

### Reactivos:

- Agua libre de turbidez: se obtiene pasando agua destilada a través de un filtro de membrana de diámetro de poro de 0.2  $\mu\text{m}$ . Para todas las soluciones utilizar agua libre de turbidez.
- Solución I: disolver 1.00 g de sulfato de hidrazina en agua destilada y diluir a 100 mL en matraz aforado. Preparar mensualmente.
- Solución II: disolver 10.00 g de hexametileno- tetraamina en agua destilada y diluir a 100 mL en matraz aforado. Preparar mensualmente.
- Suspensión stock de turbidez, 400 NTU: en un matraz aforado de 100 mL mezclar 5.0 mL de solución I con 5.0 mL de solución II. Dejar reposar 24 h a  $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$ , luego enrasar y mezclar. Preparar mensualmente.
- Suspensión estándar de turbidez, 40 NTU: diluir 10.0 mL de suspensión stock de turbidez en 100 mL con agua libre de turbidez en matraz aforado. Preparar semanalmente.

### Procedimiento:

Se realiza la calibración del equipo de acuerdo al manual de instrucciones. Una vez calibrado con la solución de 40 NTU, se procede a las lecturas de turbidez de las diferentes muestras. Si esta es mayor de 40 NTU se diluye la muestra con agua libre de turbidez hasta que la turbidez caiga entre 30 y 40 NTU.

### Cálculo:

La turbidez se informa en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez)

$$Turbidez, NTU = \frac{A \times V}{T} \quad (2.8)$$

donde:

A: NTU de la muestra diluida

V: volumen del matraz de dilución, mL

T: volumen de muestra tomado para diluir, mL

### **6) Determinación de calcio. Método titulométrico con EDTA.**

Los iones calcio y magnesio forman complejos estables con etilendiaminotetraacetato disódico. Si el pH es suficientemente alto (12 o 13) como para que el

magnesio precipite como hidróxido, el calcio puede ser determinado directamente. El punto final de la titulación es detectado por el indicador Murexida, el que vira de rosado a púrpura en el punto final.

#### Materiales:

- Matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Buretas de 25 mL.
- Pipetas aforadas de 10 mL.
- Pipetas graduadas de 1 mL.
- Matraz aforado de 1000 mL.

#### Reactivos:

- Hidróxido de sodio 10 N.
- Reactivo indicador Negro de Eriocromo-T (NET): mezclar 0.5 g de NET con 100 g de NaCl. Pulverizar en mortero.
- Reactivo indicador Murexida: mezclar 200 mg de murexida con 100 g de NaCl y pulverizar la mezcla en mortero.
- Solución titulante de EDTA 0.01M: disolver 3.723 g de etilendiaminotetraacetato disódico dihidratado en agua destilada y diluir a 1000 mL. Guardar en botella de plástico. Titular contra solución patrón de calcio.
- Solución Buffer: disolver 1.179 g de etilendiaminotetra-acetato disódico dihidratado y 780 mg de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  o 644 mg de  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  en 50 mL de agua destilada. Agregar a esta solución 16.9 g de cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) y 143 mL de hidróxido de amonio  $NH_4OH$  concentrado. Mezclar y diluir a 250 mL con agua destilada. Guardar en botella de plástico.
- Solución estándar de calcio: pesar 1.000 g de  $CaCO_3$  anhidro seco (estándar primario) en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Colocar un embudo en el matraz y agregar lentamente solución de HCl 6N hasta que todo el carbonato de calcio se halla disuelto. Agregar 200 mL de agua destilada y hervir 5 minutos para eliminar completamente el  $CO_2$ . Enfriar, agregar unas gotas de rojo de metilo y ajustar al color intermedio naranja agregando solución 3N de  $NH_4OH$  o HCl 6N. Transferir cuantitativamente y enrasar a 1000 mL con agua destilada.

#### Procedimiento:

Para la titulación de la solución de EDTA, se toman 10.0 mL de solución estándar de calcio y se diluye en 50 mL en un matraz Erlenmeyer. Se agrega 1.0 mL de solución buffer. El pH deberá estar entre  $10.0 \pm 0.1$ , en caso contrario descartar la solución buffer.

Luego se agrega una punta de espátula del reactivo indicador negro de eriocromo-T. Se titula con solución de EDTA lentamente y se agita continuamente hasta que el viraje del color de la solución de rosado a azul. Completar la titulación dentro de los cinco minutos siguientes al agregado de la solución buffer.

Para la titulación de la muestra se toma en un Erlenmeyer de 250 mL un volumen de muestra que requiera un gasto de EDTA menor a 15 mL y se diluye la muestra a 50 mL con agua destilada.

Se añade 1 o 2 mL de solución NaOH 10 N, (el pH deberá estar entre 12 y 13) y se agregar una punta de espátula de reactivo indicador de murexida. Luego se titula con solución de EDTA inmediatamente después de agregar el reactivo indicador y se añade el EDTA lentamente y agitando continuamente hasta que el viraje de color de la solución de rosado a púrpura.

Posteriormente al punto final se agregan 1 o 2 gotas más de la solución de EDTA para verificar que el color no cambia.

Cálculos:

$$T = \frac{P \times V_1}{G_1} \quad (2.9)$$

donde:

T: mg de  $\text{CaCO}_3$  equivalentes a 1000 mL de EDTA.

P: mg  $\text{CaCO}_3$  /L de la solución estándar de calcio.

$V_1$ : volumen de solución estándar de calcio tomados en la titulación de la solución de EDTA, (10.0 mL)

$G_1$ : gasto de la solución de EDTA consumidos en su titulación

$$\text{Dureza de calcio, mgCaCO}_3/\text{L} = \frac{T \times G_2}{V_2} \quad (2.10)$$

$$\text{Calcio, mg/L} = \frac{T \times G_2}{V_2 \times 2.5} \quad (2.11)$$

donde:

$V_2$ : volumen de muestra tomados para la determinación, mL

$G_2$ : gasto de solución de EDTA consumidos en la titulación de la muestra, mL

### 7) Determinación de magnesio. Método Cuantitativo.

Se estima la concentración de magnesio como la diferencia entre la dureza total y la dureza de calcio.

Cálculos:

$$\text{Mg, mg/L} = (D - Ca) \times 0.243 \quad (2.12)$$

$$\text{Dureza de Mg, mgCaCO}_3/\text{L} = (D - Ca) \quad (2.13)$$

donde:

D: dureza total expresada en mg CaCO<sub>3</sub>/L.

Ca: concentración de calcio expresada en mg CaCO<sub>3</sub>/L.

### 8) Detrminacion de cloruros. Método Argentométrico.

El cloruro se determina en una solución neutra o ligeramente alcalina por titulación con nitrato de plata estándar, usando cromato de potasio como indicador del punto final. El cloruro de plata es cuantitativamente precipitado antes de que sea formado el cromato de plata de color rojo.

Materiales:

- Buretas de 2, 10 y 25 mL.
- Erlenmeyer de 250 mL.
- Pipetas aforadas de 100 mL.
- Pipetas graduadas de 1 y 5 mL.
- Matraz aforado de 1000 mL.

Reactivos:

- Solución estándar de nitrato de plata 0.0141N: disolver 2.395 g de nitrato de plata (AgNO<sub>3</sub>) en agua destilada y diluir a 1000 mL. Guardar en frasco color ámbar y estandarizar contra la solución de cloruro de sodio.

- Solución estándar de cloruro de sodio 0.0141 N: secar aproximadamente entre 1 y 2 g de cloruro sodio (NaCl) a 140 °C. Pesar exactamente 824.0 mg de NaCl, disolver en agua destilada y diluir en matraz aforado de 1000 mL.
- Reactivo indicador de cromato de potasio: disolver 50 g de cromato de potasio en agua destilada. Agregar solución de nitrato de plata, gota a gota hasta producir un ligero precipitado rojo de cromato de plata. Dejar reposar durante 12 h, filtrar y diluir a 1000 mL con agua destilada.
- Suspensión de hidróxido de aluminio: disolver 125 g de sulfato de aluminio y potasio dodecahidratado ( $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) en 1 L de agua destilada. Calentar a 60 °C y agregar agitando 55 mL de hidróxido de amonio concentrado ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ). Dejar reposar 1 hora, transferir a un vaso grande, y lavar el precipitado a través de adiciones sucesivas, mezclando y decantando, hasta que el agua de lavado se encuentre libre de cloruros. Recién preparada la suspensión ocupa un volumen de aproximadamente 1 L.
- Reactivo indicador de fenolftaleína: solución alcohólica al 5%.
- Solución de hidróxido de sodio 1N.
- Solución de ácido sulfúrico 1N.
- Peróxido de hidrógeno al 30%.

#### Procedimiento:

Para la titulación de la solución estándar de nitrato de plata, se toman en un Erlenmeyer de 250 mL, 20 mL de la solución estándar de cloruro de sodio y se agrega 1 mL de solución indicadora. Luego se valora la solución de nitrato de plata hasta un punto final de color amarillo-rosado.

Se toma en un Erlenmeyer de 250 mL, 100 mL de muestra o una alícuota diluida a 100 mL. Si la muestra es altamente coloreada, se agrega 3 mL de suspensión de hidróxido de aluminio, se mezcla, sedimenta y se filtra.

Si existe presencia de sulfuro, sulfito o tiosulfato, se agrega 1 mL de peróxido de hidrógeno y se calienta por un minuto. Luego se ajusta la muestra a pH entre 7 y 10 con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.

Por último, se agrega 1 mL de solución indicadora y se titula con solución estándar de nitrato de plata, hasta color amarillo-rosado como punto final. (Titular siempre un blanco de agua destilada, en las mismas condiciones).

Cálculos:

$$N = \frac{P \times V}{58.5 \times G} \quad (2.14)$$

donde:

N: normalidad del nitrato de plata en eq/L.

P: masa de NaCl pesado para la preparación de la solución estándar de cloruro de sodio, g.

V: volumen de la solución estándar de NaCl tomado para la valoración de la solución de nitrato de plata, 20 mL.

G: gasto de nitrato de plata en su valoración, mL.

$$\text{Cloruro, mg/L} = \frac{(A - B) \times N \times 35450}{V} \quad (2.15)$$

donde:

A: gasto de titulante en la valoración de la muestra, mL.

B: gasto de titulante por el blanco, mL.

V: volumen de muestra tomado para el ensayo, mL.

### **9) Determinación de sulfatos. Método Turbidimétrico.**

El ion sulfato es precipitado en medio acético con cloruro de bario para formar cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme.

La absorción de luz producida por la suspensión del sulfato de bario se mide con un fotómetro y la concentración de sulfato es determinada por comparación con la lectura realizada en una curva estándar.

Equipos y materiales:

- Fotómetro:
  - a) Turbidímetro.
  - b) Espectrofotómetro a longitud de onda de 420 nm con camino óptico 2.5 a 10 cm con la celda correspondiente.

c) Filtrofotómetro equipado con un filtro violeta con el máximo de transmitancia cercano a los 420 nm. y paso de luz de 2.5 a 10 cm.

- Agitador magnético: usar velocidad de agitación constante.
- Timer
- Espátula
- Matraz Erlenmeyer de 500 mL
- Pipetas aforadas de 20 y 100 mL
- Matraz aforado de 1000 mL

#### Reactivos:

- Solución buffer A: disolver 30 g de cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 5 g de acetato de sodio ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), 1.0 g de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) y 20 mL de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (99%), en 500 mL de agua destilada. Llevar a 1000 mL.
- Solución buffer B (necesario cuando la concentración de sulfato de la muestra es menor a 10 mg/L): disolver 30 g de cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 5 g de acetato de sodio trihidratado ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), 1.0 g de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), 0.111 g de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y 20 mL de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (99%), en 500 mL de agua destilada. Llevar a 1000 mL.
- Cristales de cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2$ ), 20 a 30 mesh.
- Solución estándar de sulfato 100 mg/L: disolver 0.1479 g sulfato de sodio anhidro ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), en agua destilada y llevar a 1000 mL en matraz aforado.

#### Procedimiento:

Se realizar una curva de calibración con concentraciones que contengan entre 1 y 10 mg/L o entre 10 y 40 mg/L de sulfato a partir de la solución estándar de sulfato, para que la curva contenga la concentración de la muestra.

Se pipetea 100.0 mL de una solución estándar en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se agregar 20.0 mL de solución buffer A para soluciones de concentraciones mayores a 10 mg/L, o 20.0 mL de buffer B para concentraciones menores a 10 mg/L. Posteriormente se añade una punta de espátula de cristales de  $\text{BaCl}_2$  y agitar a velocidad constante durante  $60 \pm 2$  segundos.

Después de finalizada la agitación, se coloca la solución en la celda y se mide la absorbancia a los  $5 \pm 0.5$  min, a 420 nm. Se realiza un blanco de agua destilada y reactivos y se grafica absorbancia contra (mg)  $SO_4$ .

Para la determinación se toman 100.0 mL de la muestra o una alícuota diluida a 100.0 mL en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se agregan 20.0 mL de solución buffer A cuando se estime que la concentración de sulfato es mayor a 10 mg/L, o 20.0 mL de solución buffer B si se estima que la concentración de sulfato es menor a 10 mg/L. (Si la muestra posee color y/o turbidez se mide la absorbancia de la muestra).

#### Cálculos:

- Medida con buffer A

$$\text{Sulfato, } mgSO_4^- / L = \frac{C \times 1000}{V} \quad (2.16)$$

donde:

C: mg/L de la muestra, determinado con la curva de calibración, usando como dato de absorbancia: (Abs. muestra - Abs. blanco de muestra)

V: mL de muestra tomados para la determinación

- Medida con buffer B

$$\text{Sulfato, } mgSO_4^- / L = \frac{(M-B) \times 1000}{V} \quad (2.17)$$

donde:

M: mg/L aparente de la muestra leída de la curva de calibración.

B: mg/L del blanco leído de la curva de calibración.

V: mL de muestra tomados para la determinación.

#### **10) Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno.**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) corresponde a la cantidad de oxígeno consumido para la degradación bioquímica de la materia orgánica contenida en la muestra, durante un intervalo de tiempo específico y a una temperatura determinada.

La muestra o una dilución adecuada de la misma, es incubada por 5 días a 20 °C en la oscuridad. Se mide la concentración de oxígeno disuelto antes y después de la incubación, y el consumo de oxígeno corresponde a la demanda bioquímica de oxígeno.

#### Equipos y materiales:

- Botellas de incubación, de 300 mL de capacidad, preferentemente con sello de agua. Las botellas deben ser lavadas con detergente, bien enjuagadas y secadas antes de su uso.
- Incubadora controlada termostáticamente a  $20 \pm 1$  °C. Excluir toda luz para prevenir la posibilidad de producción de oxígeno disuelto por fotosíntesis.
- Electrodo de membrana selectiva al oxígeno, con compensación automática de temperatura y medidor apropiado.

Reactivos: Todos los reactivos deben ser calidad puro para análisis (ppa).

- Solución buffer de fosfato: Disolver 8.5 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 21.75 g de  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 33.4 g de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y 1.7 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en 500 mL de agua destilada y diluir a 1 L. El pH debe ser 7.2.
- Solución de sulfato de magnesio: Disolver 22.5 g de sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) en agua destilada y diluir a 1L.
- Solución de cloruro de calcio: Disolver 27.5 g de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) en agua destilada y diluir a 1 L.
- Solución de cloruro férrico: Disolver 0.25 g de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) $\cdot$ 6 $\text{H}_2\text{O}$  y diluir a 1 L.
- Soluciones ácida y alcalina: Para neutralización de muestras cáusticas o ácidas se utilizan soluciones 1N.
  - a) Solución ácida: agregar 28 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  lentamente y con agitación a agua destilada y diluir a 1L.
  - b) Solución alcalina: disolver 40 g de  $\text{NaOH}$  en agua destilada y diluir a 1L.
- Agua destilada, preferentemente no usar agua desionizada por la posible contaminación con materia orgánica.

#### Procedimiento:

Para la preparación del agua de dilución se coloca un volumen deseado de agua destilada en un recipiente adecuado y se adiciona 1 mL de las soluciones: de buffer fosfato, sulfato de magnesio, cloruro de calcio, y cloruro férrico por litro de agua. Se termostatiza el agua de dilución previo a su uso a 20 °C. (El contenido de oxígeno debe ser próximo al de saturación a 20 °C).

Para el blanco del agua de dilución se incuba una botella de DBO llena de agua de dilución por 5 días a 20 °C conjuntamente con el ensayo de la muestra. Se mide la concentración de oxígeno antes y después de la incubación. El consumo de oxígeno disuelto al cabo de los 5 días no debe ser mayor de 0.2 mg/L y preferiblemente no más de 0.1 mg/L. Un consumo mayor de 0.2 mg/L indica contaminación del agua con materia orgánica.

En el caso del pretratamiento de la muestra el pH del agua de dilución no debe ser afectado por dilución de la muestra. En caso necesario ajustar entre 6.5-7.5 el pH de las muestras con una solución de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio de tal fuerza que la cantidad de reactivo no diluya la muestra en más del 0.5%. La muestra debe estar a temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C) antes de realizar las diluciones.

Posteriormente se realizan varias diluciones de la muestra para obtener un consumo de oxígeno de no menos de 2 mg/L y un oxígeno residual no menor a 1 mg/L, después de 5 días de incubación. Si no se cuenta con un dato estimado de la DBO de la muestra, se realizan diluciones en los siguientes rangos:

- 100 a 1000 veces para efluentes industriales no tratados.
- 20 a 100 veces para aguas servidas crudas y tratadas.
- 5 a 20 veces para efluentes tratados biológicamente.
- 1 a 5 veces para aguas de río poluidos.

Se realizarán como mínimo cuatro diluciones por muestra que incluyan el valor de la DBO estimada.

Luego de homogeneizar la muestra se preparan las diluciones directamente en las botellas de DBO, usando pipeta graduada. Para las diluciones mayores que 100 se realiza una dilución primaria intermedia en material volumétrico graduado antes de realizar la dilución final en la botella. Se llenan las botellas con el agua

de dilución evitando airear y de forma que al cerrarlas se hayan desplazado todas las burbujas de aire.

Para medir el oxígeno disuelto de la muestra (ODm) con el electrodo de oxígeno, evitando airear la muestra, se incuban las botellas de DBO conteniendo las diluciones de la muestra y el blanco del agua de dilución a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante 5 días. Luego de los 5 días de incubación se determina el oxígeno disuelto en las diluciones de la muestra.

Cálculos:

Se grafica la concentración de oxígeno disuelto final contra volumen de muestra (mL) tomados para la dilución. De esta gráfica se determina la mejor recta y se calcula la pendiente (K).

$$\text{DBO}_5, \text{ mg/L} = -K \times V - Y + \text{ODm} \quad (2.18)$$

donde:

K = pendiente de la recta.

V = capacidad de la botella de DBO, (300 mL).

Y = intercepción de la recta con el eje de las y.

ODm = concentración de oxígeno disuelto en la muestra original.

**2.3. Normas de calidad establecidas para el vertimiento de los residuales.**

La siguiente tabla muestra los parámetros de calidad para la contaminación ambiental establecidos por las normas cubanas para luego ser comparados con los resultados obtenidos de los ensayos que se utilizan para la caracterización de estos residuales.

Tabla A.1. Parámetros de contaminación ambiental en la caracterización físico-química para las descargas de aguas residuales según la clasificación del cuerpo receptor.

Parámetros	Unidad de medida	Acuífero, vertimiento en suelo y zona no saturada	Normas
pH	-	6-10	NC 27:1999
Magnesio	mg/L	150	NC-827:2012
Calcio	mg/L	200	NC-827:2012

Dureza	mg/L	400	NC 1021:2014
Turbidez	(NTU)	10	NC 1021:2014
Conductividad eléctrica	(mS/cm)	600	NC 1021:2014
Sulfatos	(mg/L)	400	NC 1021:2014
Cloruros	(mg/L)	250	NC 1021:2014
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	60	NC 27:1999

## **Conclusiones.**

1. La realización de los métodos de ensayos necesarios, permite determinar la utilización y posterior tratamiento de los residuales líquidos y sólidos que se originan en la Planta de Gasificación de Biomasa.
2. Dentro del proceso productivo que se desarrolla en la industria, el sistema de limpieza y enfriamiento del gas desempeñan un papel crucial.
3. Existen diferentes parámetros que norman la calidad de los residuales sólidos y líquidos obtenidos durante el proceso de gasificación, entre ellos se encuentran: conductividad, turbidez, dureza total, pH, contenido de calcio, magnesio, sulfatos, cloruros y demanda bioquímica de oxígeno.
4. En caso de que los parámetros de calidad no cumplan con los límites establecidos se aplicará un tratamiento a los contaminantes identificados para corregirlos.

## ***Recomendaciones***

- Investigar sobre más parámetros de calidad para la evaluación de los residuales sólidos y líquidos vertidos en el proceso de gasificación de biomasa.
- Continuar el trabajo de esta temática para lograr la evaluación de dichos residuales y conocer sus posibles usos y condiciones de vertimiento.

## **Bibliografía.**

- Aguinaga, S. (1996) Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Laboratorio de DINAMA.
- Alba-Reyes, Y., Pérez-Gil, M., Chong, N. y Arteaga-Pérez, L. E. (2018). Diseño de una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos. *Tecnología Química*, 38(1), 123-137. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v38n1/rtq10118.pdf>.
- Ankur. (2011). Manual de operación de los gasificadores COMBO GAS-20 y COMBO GAS-40. Ankur Scientific Energy Technologies. Sama, Barioda, India. 38 p. Recuperado de: <http://www.ankurscientific.com>
- Arenales, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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>
- 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.
- 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:

<http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/1946/1/08%20Incentivos%20manejo%20marab%20en%20ecosistemas%20productivos%20y%20de%20conservaci%20n%20%20%20c3%81rea%20Protegida%20Limonos-Tuabaquey.pdf>

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 CO<sub>2</sub> capture*. (Doctoral dissertation). University of British Columbia. Recuperado de: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0342944>

IDEA-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/10234/183434/TFM%20lonut%20cristian%20ilie.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

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/s13399-016-0204-z.pdf>

Lesme, R; Garcia, 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>

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](http://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.
- ONN (Oficina Nacional de Normalización). (1999) NC 27:99. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. La Habana, Cuba, 14 p.
- 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 (GDR)*. (Trabajo de Graduación). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Razm; S. Nickel, S; Saidi-Mehrabad, y M.y Sahebi, H. (2019). "A global bioenergy supply network redesign through integrating transfer pricing under uncertain condition," *Journal of Cleaner Production*, 208, 1081-1095.
- Rivera, J. L; Reyes, J. C; González, Á. y Palma A. L. (2017) *Dichrostachys cinérea* (Marabú) Estación Experimental de Pastos y Forrajes, MINAG, Las Tunas. Delegación Provincial del CITMA, Las Tunas. Contacto: palma@citma.ltunas.inf.cu.
- 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.

- Salazar-Zeledón, E. (2016) «Influencia de altas densidades de plantación en el poder calorífico y propiedades físicas de la madera para la especie *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm,» *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 14 (30), 51-56.
- Salem, A. M. M. (2020). Investigation of biomass gasification processes for the production of high quality syngas (Doctoral dissertation). University of Glasgow. Recuperado de: <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; Seveda, 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/en81112357>
- Tchabda, A.H. y Pisupati S.V. (2014). A review of thermal co-conversion of coal and biomass/waste. *Energies* 7,1098–1148.
- 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.



## **Anexos.**

### **Anexo 1. Gasificador de 20 kW.**



Figura A.1. Gasificador instalado en la EEPF Indio Hatuey.

Fuente: Ankur (2011).

### **Anexo 2: Grupo electrógeno de 20 kW.**

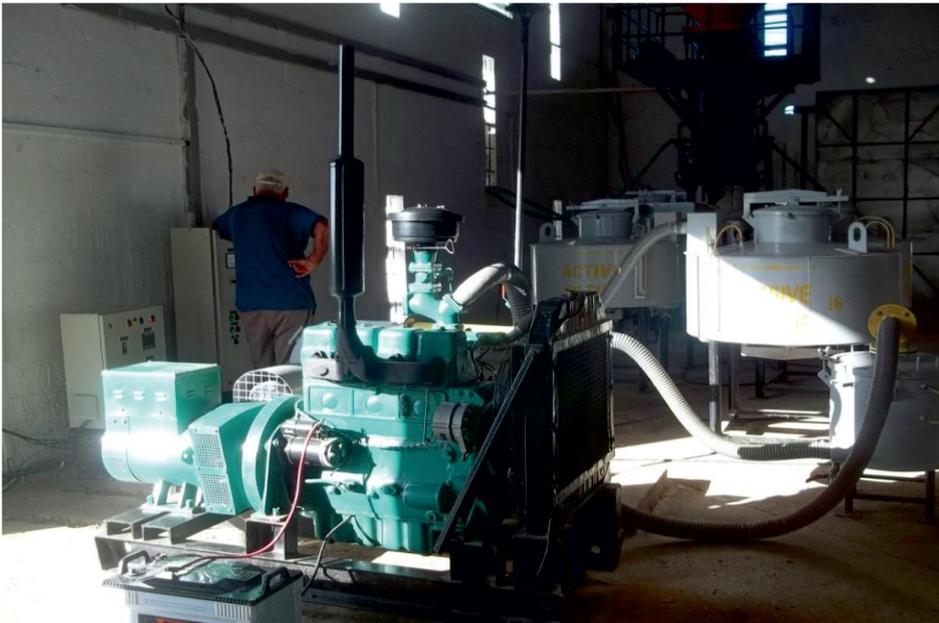
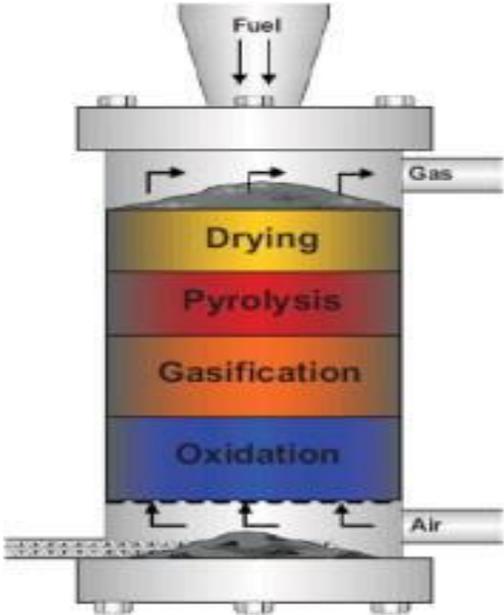


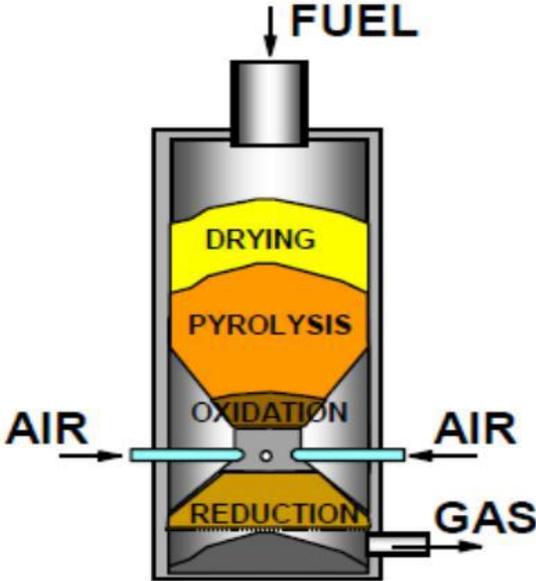
Figura A.2. Grupo electrógeno del gasificador de 20 kW, EEPF Indio Hatuey.

Fuente: Ankur (2011).

**Anexo 3: Esquema de gasificadores de lecho fijo basados en la dirección de alimentación de biomasa y gas de síntesis producido.**



(a)



(b)

Figura A.3. Gasificador de corriente ascendente (a) y gasificador de corriente descendente (b).

Fuente: Basu (2013)

**Anexo 4: Esquema de gasificador de lecho fluidizado.**

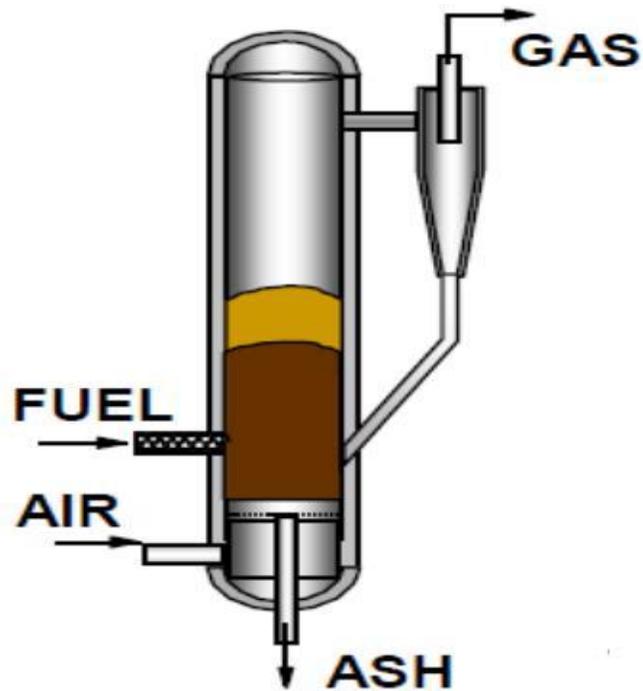


Figura A.4. Esquema de gasificador de lecho fluidizado.

Fuente: Salem (2020).

**Anexo 5: Esquema de gasificador de flujo atrapado.**

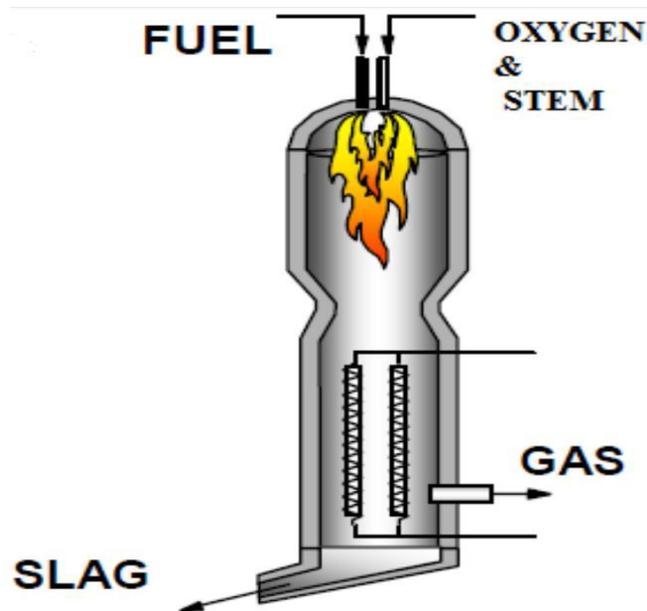


Figura A.5. Esquema de gasificador de flujo atrapado.

Fuente: Salem (2020).

## Anexo 6: Reacciones básicas del proceso de gasificación de biomasa.

Tabla A.1. Características de las reacciones endotérmicas y exotérmicas que ocurren en la gasificación de biomasa.

Reacción	Fórmula	Proceso	$\Delta H$ KJ/mol	Tipo de reacción
Oxidación heterogénea	$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	Combustión	-393	Exotérmica
	$C + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO$	Combustión incompleta	-110	Exotérmica
Reacción heterogénea en equilibrio	$C + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$	Bouduard	172	Endotérmica
	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Agua-gas primaria	131	Endotérmica
	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	Gasificación con hidrógeno	-75	Exotérmica
Oxidación homogénea	$2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$	Oxidación de CO	-283	Exotérmica
	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	Metanación	-206	Exotérmica
	$2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$	Oxidación de hidrógeno	-242	Exotérmica
	$CH_4 + \frac{3}{2} O_2 \leftrightarrow CO + 2H_2O$	Oxidación de metano	-519	Exotérmica
Reacción homogénea en equilibrio	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Agua-agua; shift	-41	Exotérmica
	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	Reformado de metano	-206	Exotérmica

Fuente: Durango (2015).

## Anexo 7: Etapas del proceso de gasificación de biomasa.



Figura A.6: Etapas del proceso de gasificación de biomasa.

Fuente: Ankur (2011).

## Anexo 8: Uso final del gas de síntesis.

Tabla A.2. Composición y uso del gas de síntesis en función del agente gasificante.

Agente gasificante	Poder calórico (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Composición del gas obtenido						Uso final del gas
		H	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	
Aire	<6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	oct-20	32	48	15	2	3	-	Combustible Gas de síntesis
Vapor de agua	oct-20	50	20	22	6	-	2	Combustible Gas de síntesis
Hidrógeno	>30							Sustituto del gas natural

Fuente: Sánchez (2017).

## Anexo 9: Aplicaciones del gas de gasificación.

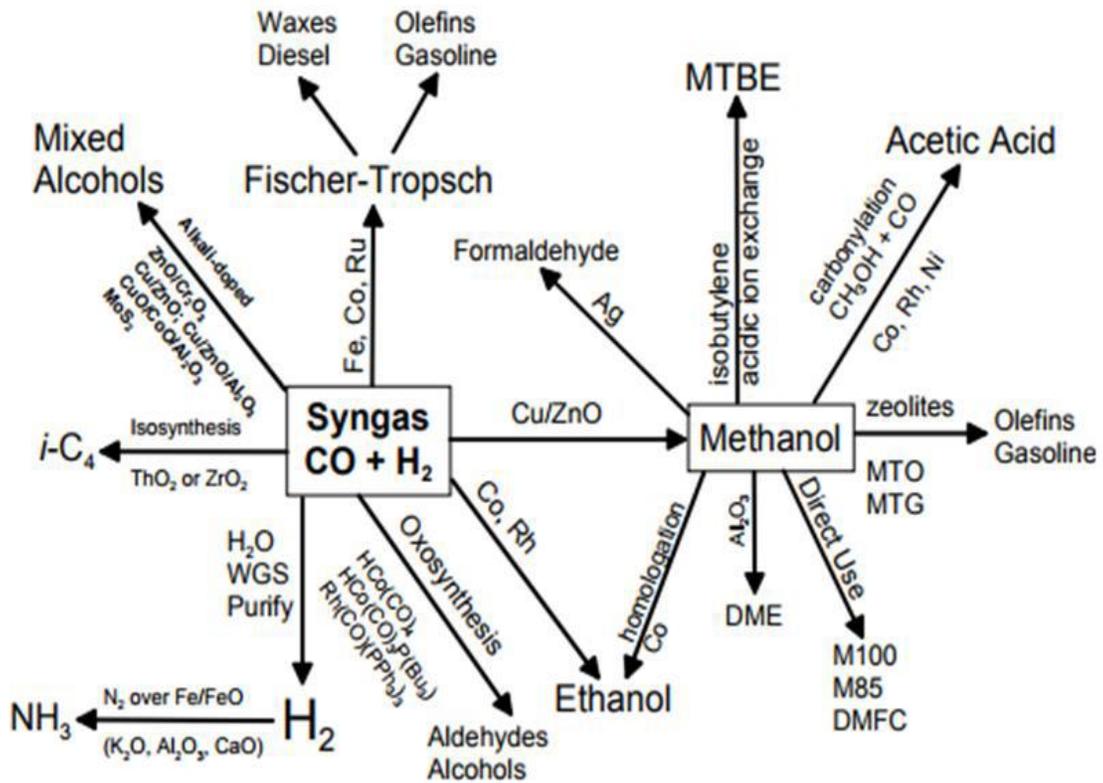


Figura A.7. Aplicaciones del gas de gasificación.

Fuente: Arsenales et al., (2016).

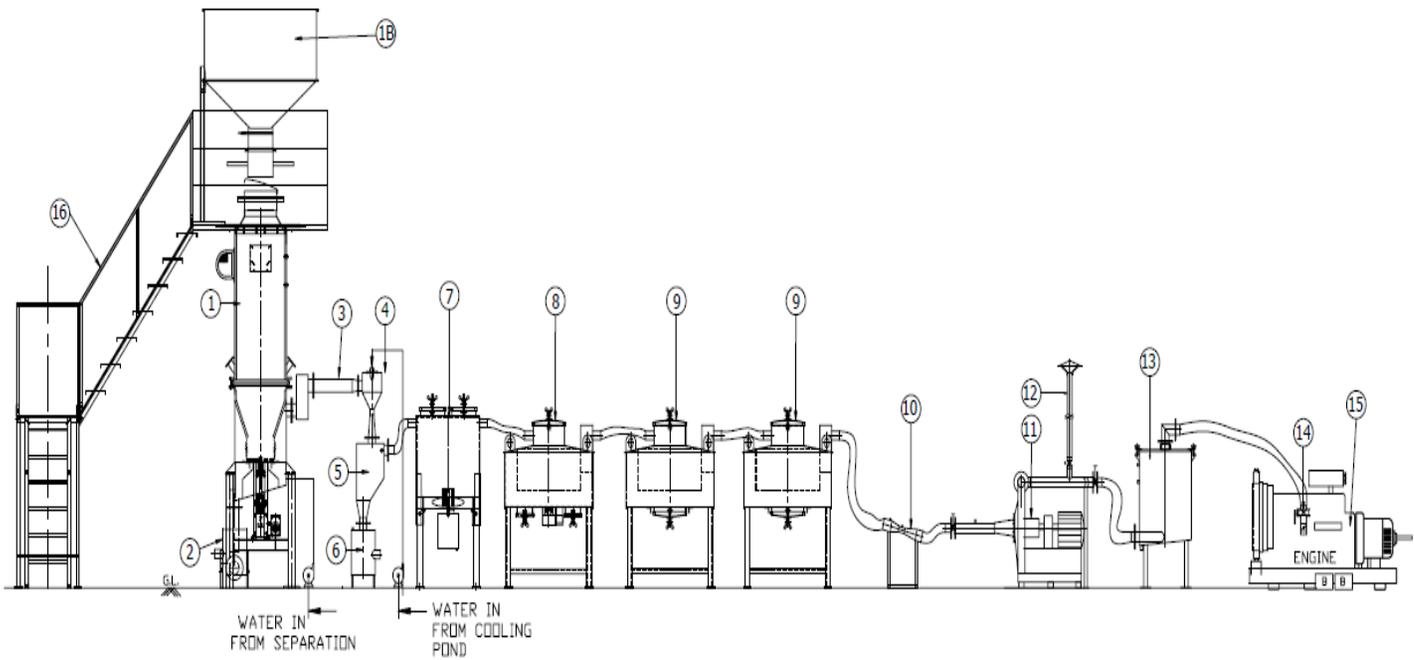
**Anexo 10: Parámetros de operación del gasificador de biomasa de EEPF Indio Hatuey.**

Tabla A.3. Características del gasificador “Gas 22 Combo 40”.

<b>Modelo</b>		<b>COMBO-40</b>
Capacidad (Eléctrica.)		Salida bruta de 22 kW en modo 100% gas pobre
Tipo de gasificador		De corriente descendente
Temperatura de gasificación		1050-1100°C
Flujo de gas estimado		100 Nm <sup>3</sup> /h
Valor calorífico promedio del gas		1100 kcal/Nm <sup>3</sup>
Capacidad total de almacenamiento		Aproximadamente 200 kg para pedazos de madera
Suministro de combustible	Modo FBG	Continuo, parte superior abierta
	Modo WBG	Modo de carga de proceso intermitente en línea, echando material una vez cada 1 h
Eliminación del carbón	Modo FBG	Automático, descarga del carbón húmedo del gasificador y manual del tamiz SS
	Modo WBG	Automático, descarga de la ceniza húmeda del gasificador y manual del tamiz SS
Subsistema de enfriamiento-limpieza		Lavador de gases Venturi, filtros gruesos, filtros finos y filtro de seguridad
Arranque	Modo FBG	A través de la bomba del lavador y el ventilador
	Modo WBG	A través de la bomba del lavador y el ventilador
Contenido de humedad permisible en la biomasa		5-20% (base húmeda)
Tipo de combustible	Modo FBG	Cascarilla seca de arroz
	Modo WBG	Madera/desechos maderables con dimensiones máximas no mayores de Ø:25 - 40 mm; L:25-50 mm
Consumo estimado por hora	Modo FBG	48-50 kg/h
	Modo WBG	30-36 kg/h
Descarga de ceniza	Modo FBG	28-32%
	Modo WBG	6-7%
Eficiencia típica de conversión		>75%
Composición gaseosa típica		CO - 19±3%                      H <sub>2</sub> - 18±2% CO <sub>2</sub> - 10±3%                    CH <sub>4</sub> - mayor que 3% N <sub>2</sub> - 50%

Fuente: Ankur (2011).

**Anexo 11: Componentes principales del Gasificador de Biomasa de la EEPF Indio Hatuey.**



**Leyenda.**

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 1. Reactor.                                 | 9. Filtro fino pasivo.            |
| 2. Tubo de drenaje del reactor.             | 10. Tubo ventury.                 |
| 3. Tubo separador del gasificador.          | 11. Ventilador de secado.         |
| 4. Lavador.                                 | 12. Válvula de antorcha.          |
| 5. Caja de drenaje.                         | 13. Filtro de seguridad.          |
| 6. Caja de drenaje para el tubo de drenaje. | 14. Válvula de paso gas al motor. |
| 7. Filtro de carbón grueso.                 | 15. Motor de combustión interna.  |
| 8. Filtro fino activo.                      | 16. Generador.                    |

Figura A.8. Diagrama esquemático del Gasificador de Biomasa.

Fuente: Ankur (2011).

## Anexo 12: Cilindro de alimentación.



Figura A.9. Cilindro de alimentación.

Fuente: Ankur (2011).

Leyenda:

1. Puerta de alimentación superior
2. Puerta de alimentación inferior
3. Motor vibrador
4. Cilindro de alimentación

## Anexo 13: Tolva.

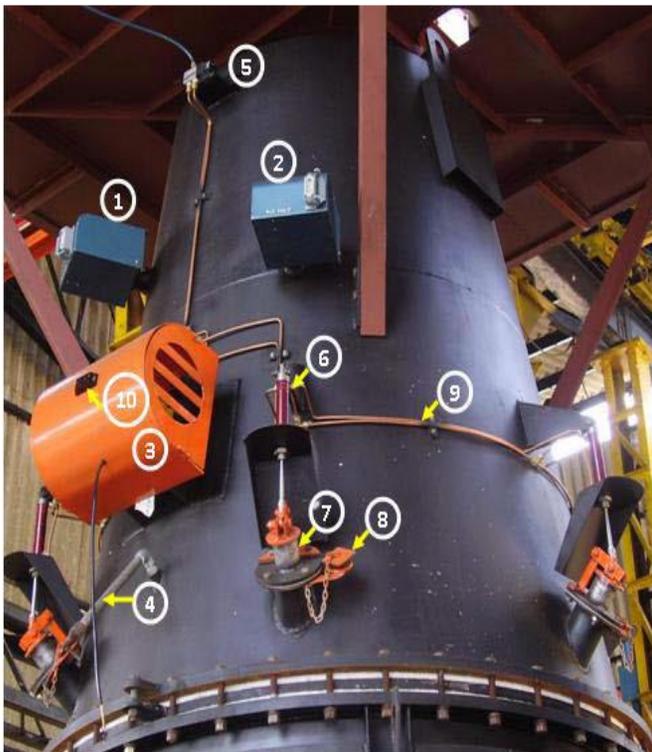


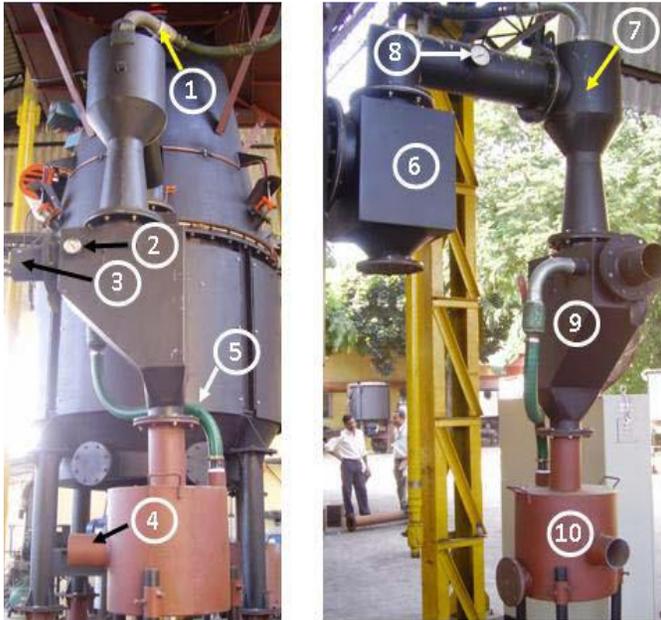
Figura A.10. Tolva.

Fuente: Ankur (2011).

Leyenda:

1. Sensor del nivel de madera 1
2. Sensor del nivel de madera 2
3. Motor vibrador
4.  $\Delta P_N$ . Caída de la presión en la boquilla de aire
5. Válvula solenoide para las boquillas de aire neumáticas
6. Cilindro neumático
7. Boquilla de aire con cierre neumático
8. Tapón de goma
9. Línea de aire de cobre para las boquillas de aire
10. Conector del motor vibrador

## Anexo 14: Lavador de gases Venturi.



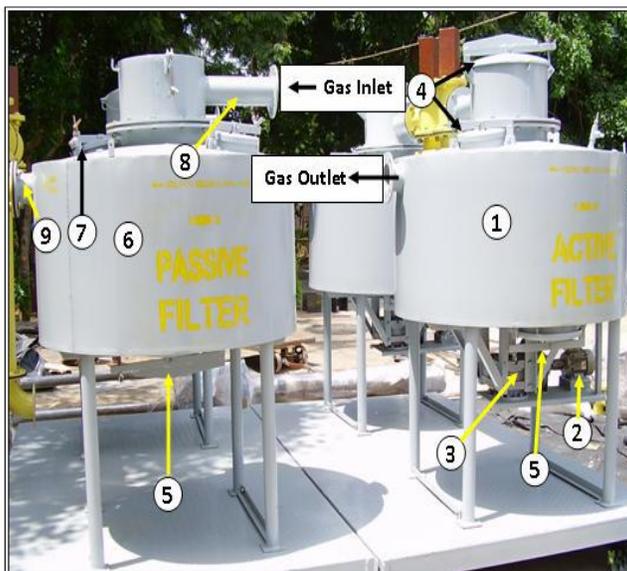
Leyenda:

1. Entrada de la boquilla del agua
2. Sensor de temperatura del gas frío
3. Salida del gas en la caja de desagüe
4. Salida del agua de la cubeta de desagüe
5. Tubería de recuperación del gas
6. Caja de salida del reactor
7. Lavador de gases Venturi
8. Sensor de temperatura del gas caliente
9. Caja de desagüe
10. Tina de desagüe

Figura A.11. Lavador de gases Venturi.

Fuente: Ankur (2011).

## Anexo 15: Filtro fino activo y filtro fino pasivo.



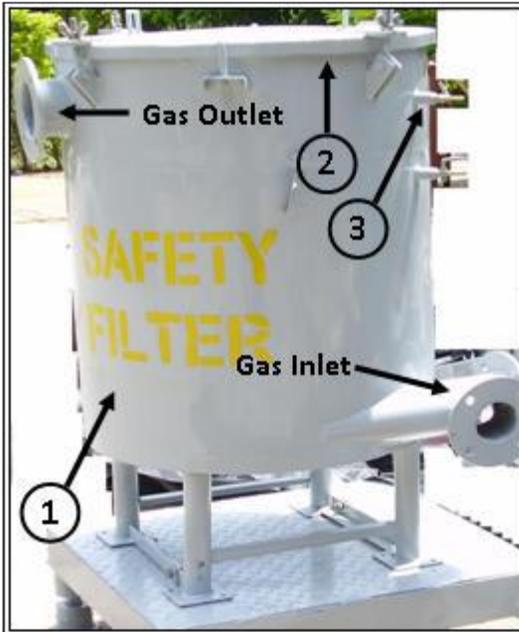
Leyenda:

1. Filtro fino activo
2. Motor del rotor de peine
3. Caja de engranajes
4. Puerta superior
5. Puerta inferior
6. Filtro fino pasivo
7.  $\Delta P$ , punto de presión
8. Entrada del gas
9. Salida del gas

Figura A.12. Filtro fino activo y filtro fino pasivo.

Fuente: Ankur (2011).

## Anexo 16: Filtro de seguridad.



Leyenda:

1.Filtro de seguridad

2.Puerta superior

3.Puntos de presión

Gas outlet: salida del gas

Gas inlet: entrada del gas

Figura A.13. Filtro de seguridad.

Fuente: Ankur (2011).