

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO DE COMBUSTIÓN PARA  
EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL  
MAÍZ**

**JENNY CAROLINA GUERRERO CONTRERAS 2012388  
CARLOS FERNANDO GAMBOA NIÑO 2020014**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD FISICOQUÍMICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO DE COMBUSTIÓN PARA  
EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL  
MAÍZ**

**JENNY CAROLINA GUERRERO CONTRERAS 2012388  
CARLOS FERNANDO GAMBOA NIÑO 2020014**

**Trabajo de grado presentado como requisito para  
Optar al título de Ingeniero Químico**

**Director  
Ing. Químico PhD. HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD FISCOQUÍMICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2009**

*Este camino que he recorrido, el cual es una de muchas etapas pero la principal en mi vida profesional que deberé transitar, se lo debo a muchas personas que estuvieron conmigo colaborándome tanto espiritual, sentimental y sobre todo brindándome su apoyo incondicional.*

*A tí Espíritu Santo, que fuiste mi principal guía y El que nunca me dejó caer a pesar de tantas pruebas que debí superar, Gracias*

*A mí Papa Josué Guerrero (QEPD) y mi Mama Aura Contreras, gracias a su apoyo y sus consejos soy la mujer que hoy soy.*

*A mis hermanos Atílio, su apoyo fue fundamental para lograr el éxito, guiándome a tomar las mejores decisiones y Natalia la cual es mi amiga incondicional, gracias por que siempre has querido lo mejor para mí y cada día doy agradezco por tenerlos a los dos a mi lado y brindándome todo el apoyo, en todo sentido que he necesitado los amo.*

*Mi familia, son muchas las personas que de una u otra forma siempre me apoyaron, mis tíos, mi Nonita Mery, y demás familiares. Mis primas, las cuales tengo muchos recuerdos, desde la niñez (Silvi Rengifo; Sandra y María; Lauri Maldonado, Eli G, y demás los cuales son muchos pero muchos).*

*Y mis amigas incondicionales Andrea Villa, Laura Dukon, Angie Robles. Y a los grupitos de Chikas Industriales y de Diseño, Ing. Metalúrgica, Ing. Química, y el grupito Navarrín.*

***Jenny Carolina Guerrero Contreras***

*A Dios gracias por todo lo que he recibido,  
Mí Madre, Mí Hermano, Mí Princesa y  
El Ángel que me cuida desde el cielo.  
La realización de mis logros y sueños  
Son para y por ustedes.*

**Carlos Fernando Gamboa Niño**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1. El Maíz en Colombia	2
1.2. Tecnologías para aprovechamiento energético de Biomasa	3
1.3. Proceso de Combustión	4
1.3.1. Factores de la Combustión	6
1.3.1.1. Tipología del Residuo	6
1.3.1.2. La Transferencia de Calor	6
<b>2. METODOLOGÍA</b>	10
2.1. Revisión Bibliográfica	10
2.2. Caracterización Físicoquímica	11
2.3. Ubicación de la Planta Piloto de Combustión de BR de Maíz	12
2.4. Selección de la Tecnología para el diseño	13
2.4.1. Método Analítico Jerárquico (AHP): principios básicos	14
2.4.2. Criterios e Indicadores	15
2.5. Diseño Conceptual de la Planta y Simulación del Proceso	16
<b>3. RESULTADOS</b>	16
3.1. Caracterización Físicoquímica	16
3.2. Ubicación de la Planta Piloto de Combustión de BR de Maíz	17
3.3. Resultados de la Selección de la tecnología.	19
3.4. Diseño Conceptual de la Planta y Simulación del Proceso	20
3.5. Costos	23
<b>4. CONCLUSIONES</b>	24
<b>5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	25

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Tecnologías para el aprovechamiento energético de la Biomasa Residual de Maíz	4
<b>Tabla 2.</b> Variables para PE de la Biomasa Residual Agrícola del Maíz	13
<b>Tabla 3.</b> Resultados de la Caracterización Físicoquímica para la Biomasa Residual de Maíz.	17
<b>Tabla 4.</b> Producción de Maíz en los Principales Departamentos de Colombia.	18
<b>Tabla 5.</b> Matriz de Valoración Ambiental	19
<b>Tabla 6.</b> Matriz de Valoración Tecnológica	19
<b>Tabla 7.</b> Matriz de Valoración Económica	19
<b>Tabla 8.</b> Matriz Global de valoración de Alternativas Tecnológicas	20
<b>Tabla 9.</b> Datos iniciales para el diseño y simulación de la Planta Piloto de Combustión de BR de Maíz	22
<b>Tabla 10.</b> Costos de la Planta	23

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
<b>Grafica 1.</b> Transferencia de Calor en el Horno	7
<b>Grafica 2.</b> Ubicación Geográfica de la Planta Piloto	18
<b>Grafica 3.</b> Cantidad de BR de Maíz en losmunicipios de Cordoba.	18
<b>Grafica 4.</b> Potencial de BR de Maíz en los municipios de Cordoba.	18
<b>Grafica 5.</b> Diagrama de Bloques de la Planta Piloto de Combustión de BR de Maíz	20
<b>Grafica 6.</b> Diagrama de Flujo del Proceso de la Simulación de la Planta Piloto en Hysys 3.2.	22

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A. DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE CARBONES</b>	26

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO DE COMBUSTIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE MAÍZ \*

**AUTORES:**

Jenny Carolina Guerrero Contreras, Carlos Fernando Gamboa Niño. \*\*

**PALABRAS CLAVES:**

Biomasa, Maíz, Combustión, Aprovechamiento Energético.

**DESCRIPCIÓN**

En Colombia actualmente se cultivan 451.905 He por año de Maíz, generando 1444039 Ton/año de Biomasa Residual. Biomasa se denomina a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas, desechos de animales que pueden ser convertidos en energía, los provenientes de la agricultura, (residuos de maíz, café, arroz, entre otros), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Los residuos en la agroindustria de maíz están clasificados como Residuos Agrícolas de Cultivo (RAC) que son hojas secas y tallos, y Residuos Agrícolas Industriales (RAI) que son la tusa y el capacho. En Colombia y nivel mundial se han creado y se han planteado diferentes opciones para utilizar la Biomasa Residual de Maíz como alternativa energética; como la creación de una planta piloto que utiliza la Termólisis como tecnología para la producción de combustibles sólidos. El Objetivo principal de este trabajo de grado es seleccionar una tecnología y diseñar una planta piloto como alternativa para aprovechar la biomasa residual del maíz, como combustible para obtención de energía. Se empleó la Herramienta Matemática para Evaluar Tecnologías (HMOVST) y se obtuvo como resultado el desarrollo de una planta de Combustión, simulada en el Software Hysys 3.2, generando 677.42 kWh de energía para un flujo de entrada de 5000 Kg BR de Maíz/hora.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Humberto Escalante Hernández

## ABSTRACT

**TITLE:** CONCEPTUAL DESIGN OF A COMBUSTION PILOT PLANT FOR ENERGETIC USED OF RESIDUAL BIOMASS OF CORN\*

**AUTHORS:**

Jenny Carolina Guerrero Contreras, Carlos Fernando Gamboa Niño. \*\*

**KEY WORDS**

Biomass, corn, combustion, energy.

**DESCRIPTION**

Colombia has a production of 4519.05 Km<sup>2</sup> of corn per year. These crops generate 1444039 Ton of residual biomass. Biomass is called all the organic matter from trees, plants, animal waste that can be converted into energy, from agriculture (waste of corn, coffee, rice, etc.) sawmill (clippings, branches, sawdust, bark) and municipal waste (sewage, organic garbage and other). Residues in agribusiness corn are classified as Agricultural of crop Waste (RAC) that are dried leaves and stems, and Waste Agricultural Industrial (RAI) that are the cobs and wicker. In Colombia and worldwide have created and have different options for using Residual biomass of Corn as an alternative to get energy; one of those options it's the creation of a pilot plant that uses the thermolysis as technology for the production of solid fuels. The main objective of this degree project is select a technology and design a pilot plant as an alternative to exploit the residual biomass from corn as fuel for production of energy. It was used the Mathematical Tool to Evaluated Technologies (HMOVST) and it was obtained as a result the development of a combustion plant. Simulation was done using the software HYSYS 3.2, energy generated by the simulation is 677.42 kWh, for a flow input of 5000 Kg of Residual biomass of Corn per hour.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Humberto Escalante  
Hernández.

## INTRODUCCIÓN

La demanda de energía se estima en 500 kWh por persona al año y este consumo aumenta 2.4 % anualmente. La demanda energética a nivel mundial se supe de fuentes como carbón, fósil (petróleo y gas), hidráulica, nuclear, y nuevas alternativas como energía eólica, solar y biomasa; la Biomasa contribuye con sólo un 10-14% del suministro de energía en el mundo [1]. Biomasa se denomina a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas, desechos de animales que pueden ser convertidos en energía, los provenientes de la agricultura, (residuos de maíz, café, arroz, entre otros), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros) [17].

En Colombia actualmente se cultivan 451.905 He por año de Maíz. El Departamento de mayor producción de maíz es Córdoba con 67.053 He; los cuales generan 278.860 Ton de residuo. Los residuos generados en la agroindustria de maíz están clasificados como Residuos Agrícolas de Cultivo (RAC). Estos residuos se subdividen en: a) rastrojo como los tallos, hojas secas y hojas que cubren el fruto (humedad de 11.30 %p/p, porcentaje de ceniza 8.02 %p/p, porcentaje de carbono orgánico total 48.38 %p/p y Potencial Calorífico Inferior (PCI) de 18584.42 KJ/Kg) y b) la tusa o olote (humedad de 29.45 %p/p, porcentaje de ceniza 1.49 %p/p, porcentaje de carbono orgánico total 50.23 %p/p y Potencial Calorífico Inferior (PCI) de 14739.63 KJ/Kg) [2].

La producción de biomasa residual que genera un cultivo de maíz de grano (tallos, hojas y capacho), fluctúa entre 20 a 35 toneladas por hectárea y en el maíz de

choclo (tallos y hojas) varía entre 16 a 25 toneladas por hectárea. La relación de producción existente entre rastrojo y grano de maíz obtenido es de 1 Ton de grano por 1.14 Ton de Residuo; y para capacho es de 1 Ton de grano por 0.27 Ton de Residuo [3, 4].

En Colombia y nivel mundial se han creado y se han planteado diferentes opciones para utilizar la Biomasa Residual de Maíz como alternativa energética. Actualmente en Colombia existe el desarrollo de proyectos como la creación de una planta piloto que utiliza la Termólisis como tecnología para la producción de combustibles sólidos [5]. En países como Brasil, Estados Unidos, Japón y algunos países de la Unión Europea que generan etanol a partir de maíz, obtienen de la biomasa residual del cultivo un 36% de etanol adicional por tonelada (aprox. 150 litros/Tn) utilizando un proceso de fermentación [6]. En Estados Unidos a 2004 se encontraba un total de 72 plantas de aprovechamiento energético para cualquier tipo de Biomasa (incluido el Maíz), con una capacidad total de 98.717 Ton/día [7].

El Objetivo principal de este trabajo de grado es seleccionar una tecnología y diseñar una planta piloto como alternativa para aprovechar la biomasa residual del maíz, como combustible para obtención de energía. Se empleó la Herramienta Matemática para Evaluar Tecnologías (HMVST) y se obtuvo como resultado el desarrollo de una planta de Combustión.

### **1.1. El Maíz en Colombia**

El maíz es el cereal cuyo cultivo ocupa la segunda mayor extensión en Colombia, 538.569 hectáreas en 2004 con una producción cercana a 1,8 millones de toneladas, seguida de cerca por arroz con 494.928 ha. y 2,9 millones de toneladas, en primer lugar se encuentra el café con 753.471 ha. y 630.069 toneladas de pergamino.

El área está distribuida entre dos tipos: maíz blanco que ocupa el 33,2% de la superficie y maíz amarillo con el 66,8%, el primero dedicado preferentemente al consumo humano y el segundo al consumo animal, ya sea en forma directa o como insumo para la fabricación de alimentos balanceados. La producción de ambos tipos de maíz tiene los mismos requerimientos, de manera que el área se desplaza hacia el uno o el otro dependiendo de las condiciones del mercado.

También se agrupa el cultivo por grado de tecnificación, en tradicional y tecnificado. Predomina ligeramente el cultivo tradicional (50,5% del área), caracterizado por ser cultivado en pequeñas extensiones, utilización de semilla no certificada, bajo consumo de agroquímicos y en especial de fertilizantes, rendimiento promedio nacional de 1,57 toneladas por hectárea y buena parte de su producción se destina al autoconsumo.

Entretanto el cultivo tecnificado (49,5% del área), se caracteriza por utilizar extensiones mucho más grandes, uso de semilla certificada, aplicación de agroquímicos y en especial de fertilizantes, rendimiento promedio nacional de 5,25 toneladas por hectárea y la mayor parte de la producción se destina a la producción de concentrados.

La producción tecnificada de maíz amarillo es aun relativamente pequeña frente a su gran demanda, de manera que es necesario importar anualmente cerca de 2.260.439.697 toneladas de producto, para atender la demanda de la industria de alimentos balanceados y la molienda húmeda [8].

## **1.2. Tecnologías para aprovechamiento energético de Biomasa**

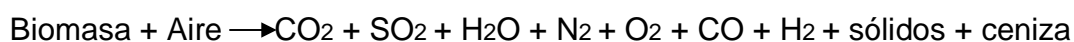
Las tecnologías posibles a aplicar para el aprovechamiento de la biomasa residual de maíz se muestran en la tabla 1:

Tecnología	Descripción
Pirólisis	Proceso de descomposición térmica de materia orgánica, causado por el calentamiento en ausencia de oxígeno u otros reactivos [18].
Gasificación	Es la reacción de combustibles sólidos con aire, vapor, hidrogeno, etc.; para dar un producto gaseoso que se utiliza como fuente de energía o como materia prima para síntesis orgánicas [17].
Termólisis	Proceso en el cual se utiliza calor indirecto para convertir los materiales sólidos en orgánicos [19].
Combustión	Secuencia de reacciones químicas entre combustible y un oxidante, generalmente aire, por las cuales se libera energía calórica y luminosa en un ambiente confinado. La zona donde tiene efecto se denomina cámara, hogar, u horno de combustión [12].
Fermentación	Es un proceso catabólico de oxidación incompleto, totalmente anaeróbico, siendo el producto final un compuesto orgánico. Estos productos finales son los que caracterizan los diversos tipos de fermentaciones [17].
Digestión Anaerobia	Es un proceso de degradación de materia orgánica en ausencia de aire (oxígeno). Este proceso lo llevan a cabo microorganismos anaerobios que actúan en el interior de un biodigestor [17].

**Tabla 1. Tecnologías para el aprovechamiento energético de la Biomasa Residual de Maíz**

### 1.3. Proceso de Combustión

La combustión es el conjunto de procesos físico-químicos por los cuales se libera controladamente parte de la energía interna del combustible. Una parte de esa energía se va a manifestar en forma de calor y frecuentemente de luz. La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia o mezcla de sustancias llamada combustible con el comburente (es el agente que aporta el oxígeno a la reacción de combustión). Los productos de la reacción de Carbono e Hidrógeno con Oxígeno en combustión completa son Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y Agua (H<sub>2</sub>O); la presencia de Monóxido de Carbono (CO) en los productos se debe a una reacción incompleta y a la aparición de reacciones secundarias. Los sólidos y la ceniza hacen parte de la Biomasa que no reacciona; el Oxígeno y Nitrógeno son debidos al exceso de aire y su composición. La siguiente reacción describe el proceso anterior [9]:



La mayoría de los procesos de combustión liberan energía (casi siempre en forma de calor), que se aprovecha en los procesos industriales para obtener fuerza motriz o para la iluminación y calefacción. La combustión también resulta útil para obtener determinados productos oxidados, como en el caso de la combustión de azufre para formar dióxido de azufre y ácido sulfúrico como producto final. Otro uso corriente de la combustión es la eliminación de residuos.

La energía liberada durante la combustión provoca una subida de temperatura en los productos. La temperatura alcanzada dependerá de la velocidad de liberación y disipación de energía, así como de la cantidad de productos de combustión [7].

El aire (21% O, 73% N<sub>2</sub> (inerte)) es la fuente de oxígeno más barata, pero el nitrógeno, al constituir tres cuartos del aire en volumen, es el principal componente de los productos de combustión, con un aumento de temperatura considerablemente inferior que en el caso de la combustión con oxígeno puro. Teóricamente, en toda combustión sólo se precisa añadir una mínima porción de aire al combustible para completar el proceso. Sin embargo, con una mayor cantidad de aire, la combustión se efectúa con mayor eficacia y aprovechamiento de la energía liberada. Por otra parte, un exceso de aire reducirá la temperatura final y la cantidad de energía liberada. En consecuencia habrá de establecerse la relación aire-combustible en función de la temperatura y del grado de combustión deseada. Para lograr altas temperaturas se puede utilizar aire rico en oxígeno, o incluso oxígeno puro. El grado de combustión se puede aumentar partiendo el material combustible para aumentar su superficie y de este modo incrementar su velocidad de reacción. También se consigue dicho aumento añadiendo más aire para proporcionar más oxígeno al combustible. Cuando se necesita liberar energía de modo instantáneo [9, 15].

### **1.3.1. Factores de la Combustión**

#### 1.3.1.1. Tipología del Residuo

Las condiciones físicas del residuo tienen una importancia trascendental en la selección de un equipo u horno adecuado para su transformación térmica. Como en toda combustión, es preciso poner en contacto el oxígeno con la superficie del producto; es evidente que la superficie específica, o su tamaño, juega un papel de primer orden en la cinética y, por tanto, en el rendimiento del proceso.

Una primera clasificación de los residuos, teniendo en cuenta la dificultad para la combustión, podría ser:

- Residuos sólidos sin compactar.
- Residuos sólidos empaquetados y/o compactados.
- Residuos pastosos.
- Residuos líquidos.
- Fangos.
- Biogas.

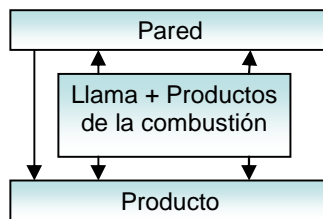
A demás, estos residuos también se pueden clasificar en función de sus características de combustión como, alto o bajo poder calorífico, fácil o difícil inflamar o fraccionar y origen del residuo [12].

#### 1.3.1.2. La Transferencia de Calor

Con independencia del tipo de horno, el calentamiento y subsiguiente vaporización y gasificación de un combustible esta altamente influenciado por la transferencia de calor desde las paredes calientes y la bóveda del horno hacia el producto a calentar o incinerar.

Cuando el residuo a destruir tiene un poder calorífico suficiente, en cuyo caso puede utilizarse como combustible, su entrada en el horno caliente provoca la formación de gases y vapores combustibles que son los que, en definitiva se oxidan (queman). Para un adecuado rendimiento de la incineración se recomienda que las paredes del horno se encuentren a cierto nivel de temperatura.

Para comenzar el proceso es necesario un aporte de calor inicial para calentar las paredes. A partir de este momento, la transferencia de calor de las paredes hacia el producto hará volatilizarse el residuo, cuando el gas generado entre en contacto con el oxígeno se produce la llama y los gases producto de la combustión liberan gran cantidad de calor. Este calor liberado se invierte en mantener calientes las paredes, en el calentamiento de los residuos que entran en el proceso y en los gases calientes de combustión (calor sensible de los gases).



**Graf. 1. Transferencia de Calor en el Horno**

Para el proceso de combustión, los intercambios térmicos en el horno como se puede observar en la grafica 1, se resumen en:

- Por una parte la llama y los productos de la combustión transmiten una cierta energía calorífica al producto a incinerar (fase de calentamiento) y a las paredes del horno. Esta transmisión tiene lugar principalmente por convección y radiación.
- Por otra parte, las paredes llevadas generalmente a una temperatura superior a la del producto a calentar, ceden a esta por radiación una cantidad de calor importante.

- Parte del calor generado durante la combustión sale con los gases calientes del horno, los cuales pueden ser aprovechados posteriormente [12].

La combustión tiene una fase previa, la cual es el calentamiento. Este se supone un estado de agitación molecular que provoca rotura de enlaces, dilataciones, etc; en definitiva, el paso de una fase sólida y/o líquida a gas y/o vapor.

Existe un caso particular, que desde el punto de vista teórico no debería incluirse en este apartado y se trata del agua. No obstante, la gran mayoría de los residuos contienen mucha humedad y es preciso hacer una anotación sobre ello ya que la humedad es un serio obstáculo para la incineración, la cual debe tratar de tenerse en un bajo porcentaje para un óptimo desempeño [7].

Hay básicamente dos tipos de hornos para la combustión de biomasa: en un lecho de combustibles o en suspensión.

La *combustión en lechos de combustibles*, se logra con alimentadores mecánicos que son diseñados para obtener un suministro continuo o intermitente de combustible, encendido de este último, una distribución apropiada de aire para la combustión, liberación de los productos gaseosos de combustión y la eliminación continua e intermitente de residuos no quemados. Estas metas se alcanzan convencionalmente con tres tipos de alimentadores de suministro por debajo, de alimentación transversal y de abastecimiento por arriba, que difieren primordialmente en las direcciones relativas de los flujos de combustible y aire.

La *combustión en suspensión* utiliza combustibles pulverizados. Este modo de quemar el combustible permite una capacidad más alta de generación de vapor; es independiente de las características de aglomeración del combustible y responde con rapidez a los cambios de carga.

Hay diferentes configuraciones de quemadores y hornos para la combustión de combustibles pulverizados, en donde el combustible y el aire se mezclan con tanta rapidez como resulta posible y cerca del quemador. El aire primario utilizado para

transportar el combustible pulverizado al quemador, comprende del 10 al 20% del aire de combustión total. El aire secundario, que comprende el resto del aire total, se mezcla en el quemador con el primario y el combustible, con el fin de fomentar la mezcla rápida. La velocidad de la mezcla que sale del quemador debe ser suficientemente elevada para evitar la retrocombustión en las tuberías de combustible y aire primario.

Las parrillas utilizadas con alimentadores distribuidores son de varios tipos; las parrillas estacionarias son las de instalación mas barata, pero se tienen que dividir en zonas para la limpieza y eliminación de las cenizas. En los alimentadores de parrilla de caída, se puede retirar las perrillas mismas, lo que elimina la necesidad de rastrillar las cenizas. Esto permite reducir un poco el tiempo necesario para la limpieza de las parrillas. Las parrillas de limpieza continua no necesitan distribuirse en zonas para la eliminación de cenizas; la más alta liberación de calor en la parrilla hace que las rejillas de este tipo resulten quizá más económicas.

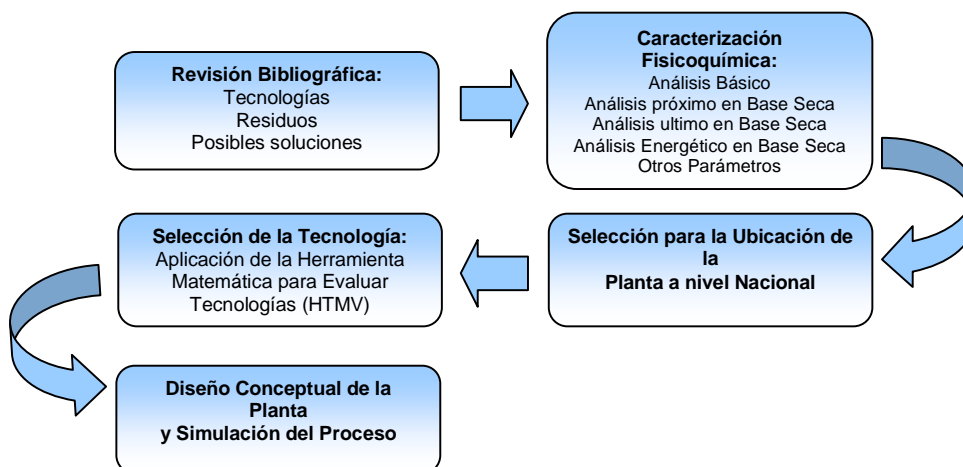
El núcleo de cualquier sistema de encendido en suspensión de combustibles sólidos es el *Pulverizador*. Se utiliza aire para desecar el combustible, transportarlo a través de del pulverizador, clasificarlo y transferir las partículas finas especificadas al quemador, donde el aire de transporte proporciona parte del necesario para la combustión. Los pulverizadores mismos se clasifican según si funcionan con presión positiva o negativa y si son de velocidad baja, mediana o alta. La pulverización se produce por medio de choques, frotamiento o trituración. La capacidad de un pulverizador depende de la molibilidad del combustible, finura que se desee y por la humedad del mismo [11].

La combustión de residuos agrícolas como combustible es una atractiva opción de gestión de residuos, ya que reduce el volumen de 70 a 90 por ciento. A la vista de la disminución de la disponibilidad de vertedero, la combustión de residuos a

nivel mundial ha crecido a un ritmo significativamente más rápido que la tasa de crecimiento para la generación de los mismos [7].

## 2. METODOLOGÍA

El trabajo de grado se realizó en las etapas que se muestran en el siguiente diagrama de bloques:



### 2.1. Revisión Bibliográfica

En el proceso de revisión y selección, se tuvo en cuenta los siguientes materiales: libros, artículos, trabajos de grado, entre otros. Se llevó a cabo en varias etapas, con un orden jerárquico según la importancia establecida para el trabajo. El orden en el que se desarrolló esta revisión fue:

- Información sobre la Biomasa Residual de Maíz; Composición, características físicoquímicas; el manejo a nivel industrial y agrícola, con

el objetivo de tener conocimiento sobre la cantidad disponible de biomasa.

- b) Tecnologías: En esta etapa se hizo una búsqueda para la selección de las mejores alternativas para el aprovechamiento energético de la biomasa.
- c) Habiendo seleccionado la mejor alternativa se hizo una mayor profundización en la tecnología, para proceder con el diseño conceptual.

## **2.2. Caracterización Físicoquímica**

Un factor importante para la selección y posterior diseño conceptual de la planta son las características Físicoquímicas del residuo.

Previo a la Caracterización de Residuo se hizo un muestreo, el cual se realizó en diferentes ciudades y municipios, siguiendo los protocolos de toma establecidos en el procedimiento de calidad del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la UIS. Las muestras fueron debidamente preservadas, empacadas y enviadas a los laboratorios, según los protocolos de calidad, para el respectivo procesamiento.

La localización de los sitios de muestreo se realizó con base en el análisis de los aspectos que pueden influir en la composición de la BR. En el caso de la BR de Maíz se tuvo en cuenta el sistema de producción, la ubicación geográfica y las condiciones climáticas. Los municipios seleccionados son: Sabana de Torres y Floridablanca ubicados en el Departamento de Santander.

La caracterización físicoquímica de las muestras se realizó en el laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la UIS, con el apoyo de profesionales del ICA y la Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA). En la caracterización se realizaron los siguientes análisis:

- Análisis Básico: Humedad y Sólidos totales.
- Análisis Próximo en Base Seca: Material Volátil (MV), Carbono Fijo (CF), Cenizas.
- Análisis Último en Base Seca: Carbono Orgánico Total, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre.
- Otros Parámetros: Sólidos Volátiles Totales (SVT), Materia Orgánica, Relación C/N, Grasa, Proteína.

El Análisis Energético para determinar el Poder Calorífico Inferior (PCI), se realizó utilizando la norma establecida en el Laboratorio de Fundición de la UIS, y práctica “Determinación del Poder Calorífico” (Anexo 1); Esta prueba utiliza una Bomba Calorimétrica BICASA (Fabbrica Aparecchi Scientifici e Mobili Per Laboratori Chimic E Industriali ) de tipo Estacionario y analiza la muestra seca.

### 2.3. Ubicación de la Planta Piloto de Combustión de BR de Maíz

En esta etapa del proceso se tuvo en cuenta la distribución nacional del cultivo en Departamentos y Municipios, teniendo como criterios el Área Cosechada, Volúmenes de Producción y Rendimiento del Maíz; la información se obtuvo de los datos recopilados del Anuario Estadístico Agropecuario 2006 (Ministerio de Agricultura), y un estudio de Potencial Energético (PE) [2].

El PE de la Biomasa Residual Agrícola del Maíz (RAC) se evaluó a partir del modelo matemático el cual es función de la masa del residuo y su contenido energético el cual se expresó así:

$$PEBV_{REAL} = A.Re. \sum_{k=1}^{n=2} \sum_{i=1}^n f_{p-e_{k,i}} \cdot f_{h_{k,i}} \cdot PCI_{k,i}$$

En la tabla 2, se especifican las variables de la ecuación anterior.

VARIABLE	SÍMBOLO	DEFINICIÓN
<b>Potencial Energético</b>	$PEBV_{REAL}$	Potencial Energético Biomasa Vegetal Agrícola (TJ / año).
<b>Área</b>	$A$	Extensión de tierra cultivada, representada por las hectáreas cosechadas del cultivo principal (Ha) en un año ó en un mes; depende de la disponibilidad de información.
<b>Rendimiento</b>	$Re$	Rendimiento del cultivo en función del producto principal (Tn de producto principal/ Ha sembradas).
<b>Factor de Generación de Residuo Energético.</b>	$f_{p-e_{k,i}}$	Factor de generación de residuo energético, es una relación entre la masa de residuo con respecto a la masa de producto principal. (Ton de residuo/ Ton de producto principal).
<b>Factor de Humedad = 100 - % Humedad.</b>	$f_{h_{k,i}}$	Factor de humedad. (Tn residuo seco/Ton de residuo húmedo).
<b>Poder Calórico Inferior</b>	$PCI_{k,i}$	Poder Calórico Inferior. Dado en KJ/ Tn de residuo seco.
<b>Constante de Unidades</b>	$K$	Constante de conversión de unidades. Su valor es $1 \cdot 10^{-6}$

Tabla 2. Variables para PE de la Biomasa Residual Agrícola del Maíz

## 2.4. Selección de la Tecnología para el diseño

La selección de la tecnología se realizó utilizando la Herramienta Matemática para Evaluar Tecnologías (HMVST), la herramienta evalúa tres tecnologías (Combustión, Gasificación y Pirólisis) teniendo en cuenta cuatro aspectos (Ambiental, Económico, Tecnológico y Social).

La HMVST utiliza un método de evaluación y decisión Multicriterio entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneamente y un único agente decisor.

Estos métodos son utilizados para realizar una evaluación y decisión respecto a problemas que, por naturaleza o diseño, requieren un número finito de alternativas de solución, y está compuesto por los siguientes aspectos:

- *Conjunto de alternativas estables:* por lo general son un número finito de soluciones posibles al problema; cada una de ellas debe estar identificada, aunque no necesariamente conocidas en forma exacta, es decir, se pueden

desconocer sus consecuencias cuantitativas y cualitativas en algunos aspectos.

- *Conjunto de criterios de evaluación* que permiten evaluar cada una de las alternativas, conforme a los pesos (factores de importancia) asignados por el agente decisor y que reflejan la importancia (preferencia) relativa de cada criterio.
- *Matriz de decisión o de impactos* que resume la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio; una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones confrontadas a cada uno de los criterios; la escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa.
- *Una metodología de ordenación, clasificación, partición, o jerarquización* de dichos juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones.

En el planteamiento del problema, la función central de los métodos multicriterio consiste en: seleccionar la(s) “mejor(es)” alternativa(s), aceptar alternativas que parecen “buenas y rechazar aquellas que parecen “malas”, generar una “ordenación” de las alternativas consideradas (de la “mejor” a la “peor”) [14].

#### **2.4.1. Método Analítico Jerárquico (AHP): principios básicos**

Para tomar una decisión, se precisan varios tipos de conocimiento, información y datos técnicos. Estos atañen a:

- Detalles sobre el problema para el que se precisa una decisión.
- Las personas o actores involucrados.
- Sus objetivos y políticas.
- Las influencias que afectan los resultados.
- Los espacios temporales, argumentos e imperativos [14].

## **2.4.2. Criterios e Indicadores**

Los criterios son los elementos con los cuales se construye un objetivo, siendo cada criterio una contribución a aquel. Cada criterio se selecciona con la finalidad de evaluar un impacto con referencia a aspectos como el ambiental, tecnológico, económico y social, en el sector estudiado. Los criterios estarán compuestos por un conjunto de indicadores que los definan según los objetivos trazados.

El indicador será por lo tanto, el componente asociado al factor que proporciona la medida de la magnitud del impacto, al menos en su aspecto cualitativo y también, si es posible, en el cuantitativo. Se construyen a partir de un cruce adecuado de las variables asociadas al impacto. Los indicadores pueden tener una función analítica, cuando las variables son cuantificables numéricamente y la información está disponible, o pueden ser también cualitativos, cuando las variables son no cuantificables numéricamente o la información no está disponible.

**Criterio Ambiental:** es el primer grupo de indicadores a evaluar, y está compuesto por las descargas (emisiones líquidas, sólidas y gaseosas) de cada tecnología hecha al ambiente, el entorno afectado y la contaminación sonora.

**Criterio Tecnológico:** La matriz de valoración tecnológica encierra los indicadores que hacen parte fundamental de la tecnología, y la diferencia de las demás. Estos indicadores están separados en dos grupos importantes donde se evalúa la materia prima y el proceso. En la materia prima se analizan aspectos como las características fisicoquímicas del residuo a implementar y la disponibilidad que estos residuos tienen para su aprovechamiento. En el proceso se analiza la madurez de la tecnología, la generación de subproductos con valor agregado, la complejidad operacional y la infraestructura.

**Criterio Económico:** tiene como finalidad seleccionar la tecnología más rentable para el aprovechamiento energético de cada residuo de biomasa. En este criterio se evaluaron dos indicadores: los costos y la eficiencia tecnológica. Para cada uno se determinó el factor de importancia.

Criterio Social: se incluyó este criterio con el ánimo de abarcar todos los componentes necesarios para determinar la factibilidad de una alternativa tecnológica en la industria. Este componente está constituido por la capacidad de la tecnología para generar empleo y la aceptación por parte de la comunidad al cambio generado por esta [14].

## **2.5 Diseño Conceptual de la Planta y Simulación del Proceso**

Los residuos que se van a emplear para el diseño conceptual de la planta son el rastrojo y hojas secas por la factibilidad de recolección directamente del cultivo; la tusa y el capacho no son tenidos en cuenta debido que para su recolección se debe realizar un proceso adicional, el capacho debe ser retirado del racimo de maíz y la tusa se obtiene después del desgrane de maíz.

Utilizando los datos obtenidos en la revisión bibliográfica y la disponibilidad de BR se plantea la ejecución del diseño teórico para una planta de capacidad de 5000 Kg de BR Maíz/hora; donde se seleccionará el ciclo con los equipos adecuados y los balances necesarios para posteriormente llevar a cabo la simulación del proceso; que se propone realizar con el software Hysys 3.2.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 Caracterización Físicoquímica**

Los resultados obtenidos en el laboratorio de la caracterización físicoquímica se muestran en la tabla 3.

<b>Tipo de Análisis</b>	<b>Unidades</b>	<b>Maíz</b>			
<b>Análisis Básico</b>		<b>Rastrojo</b>	<b>Tusa</b>	<b>Capacho</b>	<b>Hoja Seca</b>
Humedad	%p/p	34.06	29.41	8.52	11,3
Sólidos totales	%p/p	65.94	70,59	91.48	88,7
<b>Análisis Próximo en Base Seca</b>					
Material Volátil MV	% p/p	84,17	97,26	95,29	85,24
Carbono Fijo CF	% p/p	7,51	1,23	2,21	6,73
Cenizas	% p/p	8,3	1,49	2,5	8,02
<b>Análisis Último en Base Seca</b>					
Carbono Orgánico Total	% p/p	51,71	50,23	55,45	48,38
Hidrógeno	% p/p	5,94	5,77	6,37	5,56
Oxígeno	% p/p	33,26	42,16	35,33	37,53
Nitrógeno	% p/p	0,75	0,33	0,3	0,48
Azufre	% p/p	0,07	0,22	0,12	0,07
<b>Análisis Energético en Base Seca</b>					
Poder Calorífico Inferior	kJ/kg	14912,28	14739,63	16589,5	18584,42

**Tabla 3. Resultados de la Caracterización Físicoquímica para la Biomasa residual de Maíz.**

El análisis Próximo y último en Base Seca, nos permitieron determinar la composición de entrada de la BR de Maíz al proceso, la cantidad de combustible que reacciona y la composición de los gases de chimenea.

La humedad y el poder calorífico son parámetros que podrían determinar que tipo de residuos son apropiados para tratamientos térmicos a seleccionar. Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización el capacho y las hojas secas se presentan como las mejores alternativas para este tipo de procesos.

### **3.2 Ubicación de la Planta Piloto de Combustión de BR de Maíz**

Como se puede observar en la tabla 4, a nivel nacional el Departamento de mayor producción agrícola de Maíz es Córdoba, ubicado en la región Caribe al Noroccidente del País; con un potencial de 4614.01 TJ/año. Los datos fueron obtenidos del Atlas de3 Potencial Energético de Biomasa Residual en Colombia.

Nombre de Departamento	Área Cosechada, He	Producción Producto principal, Ton/Año	Cantidad de Residuo Tn/Año	Potencial, TJ/Año
Córdoba	70741.00	206657	291386.40	4614.01
Valle del Cauca	31568.00	157931	222682.60	3526.11
Bolívar	78093.00	154616	218008.60	3452.1
Cesar	52455.00	103235	145561.40	2304.92
Antioquia	50079.00	90892	128157.80	2029.34

Tabla 4. Producción de Maíz en los Principales Departamentos de Colombia.

Luego de haber seleccionado el Departamento, se procedió a realizar un estudio a nivel municipal analizando la cantidad de residuo, el potencial de BR de Maíz y la ubicación geográfica e hidrográfica (Cuenca del Río Sinú) de los municipios (Graf. 2).



Grafico 2. Ubicación Geográfica de la Planta Piloto

Como se puede observar en las graficas 1 y 2, el municipio seleccionado que se posiciona como la mejor alternativa y que obtuvo los mejores datos es Cereté.

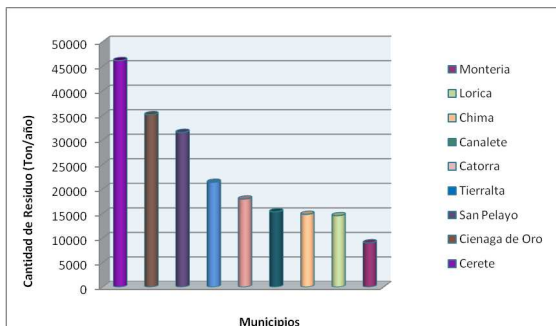


Grafico 3. Cantidad de BR de Maíz en los municipios de Córdoba [2].

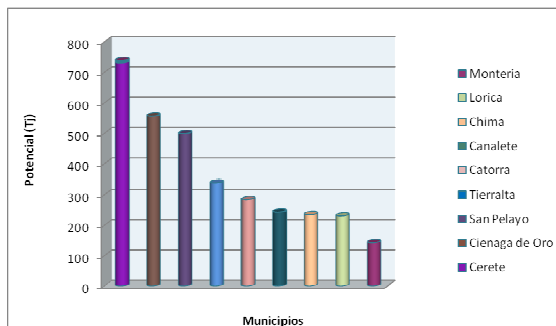


Grafico 4. Potencial de BR de Maíz en los municipios de Córdoba [2].

### 3.3 Resultados de la Selección de la tecnología.

La evaluación se realizó variando los factores de importancia para los indicadores en la HMVST, que genera puntajes para cada una de las tecnologías seleccionadas y las clasifica de forma descendente mostrando la mejor alternativa para cada uno de los criterios. Los resultados obtenidos de los criterios e indicadores, se muestran en las Tablas 5,6 y 7:

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia			Puntaje	Clasificación
	0.58	0.31	0.11		
	Descargas	Entorno afectado	Contaminación sonora		
	Número de Orden Parcial				
Combustión	1	3	2	1.73	2
Pirólisis	3	1	1	2.16	3
Gasificación	2	1	1	1.58	1

Tabla 5. Matriz de Valoración Ambiental

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0.50	0.50		
	Materia Prima	Proceso		
	Número de Orden Parcial			
Combustión	2	1	2.50	2
Pirólisis	2	3	3.50	3
Gasificación	1	2	2.00	1

Tabla 6. Matriz de Valoración Tecnológica

Alternativa de Tratamiento	Factor de Importancia		Puntaje	Clasificación
	0.60	0.40		
	Costos	Eficiencia de la Tecnología		
	Número de Orden Parcial			
Combustión	1	1	1.00	1
Pirólisis	3	1	2.20	2
Gasificación	2	3	2.40	3

Tabla 7. Matriz de Valoración Económica

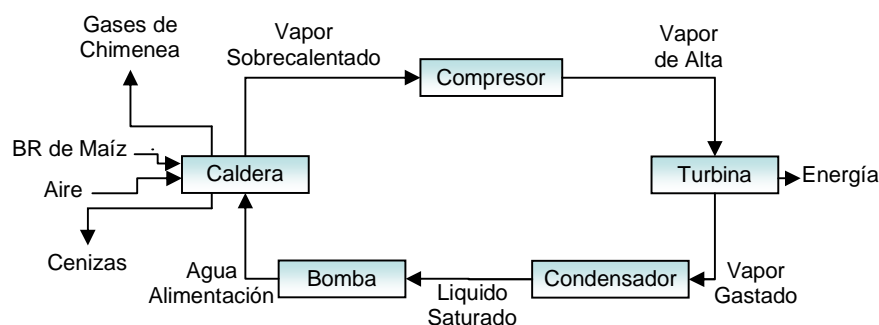
El criterio de mayor importancia para la selección de la tecnología fue el económico, sin hacer a un lado los valores obtenidos en los otros (especialmente el ambiental). En la Tabla 8 se muestra el resultado de la matriz global con la jerarquía, obteniendo La Combustión, como tecnología a aplicar.

Alternativa Tecnológica	Factor de Importancia				Puntaje Final	Jerarquía
	0.35	0.19	0.4	0.06		
	Criterio Ambiental	Criterio Tecnológico	Criterio Económico	Criterio Social		
	Puntaje Valoración Parcial					
Combustión	2	2	1	2	1.6	1
Pirólisis	3	3	2	1	2.48	3
Gasificación	1	1	3	3	1.92	2

Tabla 8. Matriz Global de valoración de Alternativas Tecnológicas

### 3.4 Diseño Conceptual de la Planta y Simulación del Proceso

La grafica 5, es el diagrama de bloques del proceso de la planta piloto de combustión para aprovechamiento energético de BR de Maíz.



Grafica 5. Diagrama de Bloques de la Planta Piloto de Combustión de BR de Maíz

El proceso inicia desde la recolección de la Biomasa Residual de Maíz que se hace directamente desde el cultivo y es transportada hasta la planta en camiones

donde son pesados e identificados. Los camiones descargan la BR en una fosa de almacenamiento en un depósito cerrado. El humo generado por los camiones y los olores que se generan en el almacenamiento son extraídos por grandes ventiladores que van directamente a los hornos para proporcionar aire de combustión y para evitar la fuga de ellos. La BR es inspeccionada en la fosa de almacenamiento donde se le realizan análisis fisicoquímicos para su caracterización, antes de ser alimentada a los hornos por las grandes grúas o por bandas transportadoras.

La BR de Maíz entra al proceso a condiciones ambientales (35 °C y 101,325 kPa), se quema a altas temperaturas (más de 600 °C) en los hornos. El aire utilizado como comburente es sometido a un precalentamiento para cumplir las condiciones adecuadas para el proceso (200 °C y 1000 kPa). El calor de la combustión generado en la caldera convierte el agua de alimentación en vapor sobrecalentado, que pasa al compresor donde se aumenta la presión hasta 8600 kPa (Vapor de Alta), posteriormente en la turbina, conectada a un generador, propicia la producción de electricidad. La energía generada por la planta suple el consumo de sus necesidades y el exceso se vende a las electrificadoras y / o utilizados por las industrias cercanas a la planta. El vapor de agua que ha pasado por la turbina, ya a menor presión y temperatura, se lleva al condensador. Debido a ese descenso térmico, el vapor se convierte de nuevo en agua a 46.47 °C (valor obtenido de la simulación HYSYS 3.2), y este líquido se bombea a la caldera iniciándose de nuevo el proceso. Los valores de la eficiencia de la turbina y bomba son valores seleccionados en la revisión bibliográfica realizada anteriormente.

Los más recientes equipos de control de contaminación eliminan las partículas, gases ácidos, y otras emisiones de los gases generados en el proceso de combustión. La ley de Aire Limpio y otras normas ambientales son alcanzadas por una combinación de equipo como secadores, spray dryers, baghouses, y sistemas de inyección de carbonatos.



En la composición de los gases de chimenea se puede observar la presencia de Oxígeno que se adicionó para garantizar una combustión completa y a su vez evitando que se lleven a cabo reacciones secundarias que puedan generar contaminantes (CO).

La Energía Generada por el proceso es 677.2 KWh; siendo el consumo de la planta 62 KWh (compresor y bomba), obteniendo así 615.2 KWh de energía para la venta.

### 3.5 Costos

Los costos obtenidos en la Tabla 10, se obtuvieron a partir de los directos e indirectos a partir del porcentaje de la inversión fija de la planta siendo igual a USD 636.365,25 el costo de todos los componentes de la planta.

Costos Directos		
Componentes	%If	Precio (USD)
Equipos	35	222727.8375
Instalación de Equipos	6	38181.915
Instrumentación y Sistemas de Control	3	19090.9575
Tuberías y Accesorios	8	50909.22
Materiales y Equipos Eléctricos	5	31818.2625
Instalación de Servicios	7	44545.5675
Edificaciones	6	38181.915
Adecuación de Terreno	2	12727.305
Terreno	1	6363.6525
Costos Indirectos		
Componentes	%If	Precio (USD)
Ingeniería Y Supervisión	11	70000.1775
Gastos de Construcción	9	57272.8725
Imprevistos	7	44545.5675
<b>Costo Total</b>		<b>636365.25</b>

**Tabla 10. Costos de la Planta**

#### **4. CONCLUSIONES**

En base a la gran acumulación de BR de Maíz y por su gran potencial energético se seleccionó al municipio de Cereté, en Córdoba, como la mejor alternativa y punto estratégico para la ubicación y montaje de la planta.

Después de realizar el estudio utilizando la Herramienta Matemática para Evaluar Tecnologías (HMVST), que analizó los criterios: ambiental, tecnológico, económico y social; sugirió a la Combustión como la tecnología más viable para el aprovechamiento energético de la BR del Maíz.

El proceso fue diseñado para una capacidad de 5000 Kg de BR de Maíz/hora, 21600 Ton/Año, produciendo 677.2 KWh de los cuales 62 KWh son consumidos por la planta, para un total 2.65 GW/Año, que podrían abastecer a 1472 Hogares al año, tomando un valor estadístico para un usuario residencial, el consumo mensual promedio es de 150 KW, 1800 KW/Año; y generando Gases de Chimenea de composición (Fracción Másica): 0.2079 CO<sub>2</sub>, 0.0002 SO<sub>2</sub>, 0.0405 O<sub>2</sub>, 0.6594 N<sub>2</sub>, 0.0920 H<sub>2</sub>O.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **McKENDRY, PETER.** *Enegy Production from Biomass (part 1): Overvies of Biomasa.* Bioresource Technology. UK. Pág. 1. (2001).
- [2] **ESCALANTE, HUMBERTO PhD; ORDUZ, JANNETH; LAVERDE, DIONISIO PhD; ZAPATA, HENRY; YEPES, LUZ D.** *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia.* Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), Universidad Industrial de Santander (UIS). 2008.
- [3] **MANTEROLA, HECTOR., MIRA, JORGE.** *Uso de los Residuos de los Cultivos del Maíz.* Fundación para la Innovación Agraria del Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. Pág. 222 (1999)
- [4] **FREAR, CRAIG., ZHAO, BINGCHENG.** *Biomass Inventory and Bioenergy Assessment.* Washington State Department of Ecology, Washington State University. Washington D.C. Pág. 26. (2005)
- [5] Ministerio de Minas y Energía, COLCIENCIAS Colombia, TERMÓLISIS S.A. Unidad de Plantación Minero Energética, Evaluación de los Proyectos Presentados. Pág. 7. (2006)
- [6] **VERGAGNI, GUSTAVO A.,** E.I. du Pont de Nemours and Company Desarrollos Empresarios, Argentina (2007).
- [7] **THEODORE, LOUIS., WEISS, KENNETH N.** *Perry's Chemical Engineers' Handbook.* Section 22: Waste Management. The McGraw-Hill Companies. United States of America. Pág. 94,95. (2008).
- [8] Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, Secretaria Técnica Comercio Exterior Maíz Tecnificado en Colombia. Pág. 1-2 (2004).
- [9] **CONSONNI, S., GIUGLIANO, M., GROSSO, M.** *Alternative Strategies for Energy Recovery from Municipal Solid Waste. Part A: mass and Energy Balances.* Waste Management. Milano, Italia. (2004).
- [10] **McKENDRY, PETER.** *Enegy Production from Biomass (part 2): Conversion Technologies.* Bioresource Technology. UK. Pág. 1,2. (2001).

- [11] **PERRY, ROBERT H., GREEN, DON W.**, *Perry Manual del Ingeniero Químico*, Sexta Edición. Tomo III, editorial McGraw-Hil, México D.F.. Pág. 9-44 a 9-49, (1992)
- [12] **ELIAS, XAVIER**. *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*. Fundación Universitaria Iberoamericana. Capítulo 3: “La Combustión. Factores Endógenos y Exógenos”. Editorial Díaz de Santos. España. Pág. 150 – 215, (2005).
- [13] **VIÑA, FABIÁN**. *Potencial Energético de la Biomasa Residual Agrícola*. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Bucaramanga. Pág. 1,2. (2008).
- [14] **BARCO, LINA M.**, *Diseño de una Herramienta Matemática para Evaluar las Tecnologías Existentes para el Aprovechamiento Energético de la Cascarilla de Arroz*. Trabajo de Grado Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Pág. 14-31, (2008).
- [15] **SMITH, J.M., VAN NESS, H.C.** *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. Capítulo Siete: Termodinámica de Procesos de Flujo. Capítulo Ocho: Producción de Energía a Partir de Calor. Cuarta Edición. Editorial McGraw-Hill. Pág.173-176, 282-293 y 306-320, (1997).
- [16] **HOWELL, JHON R., BUCKIUS, RICHARD O.** *Principios de Termodinámica para Ingenieros*. Capítulo Cinco: Entropía y Segunda Ley de la Termodinámica. Capítulo Seis: Ciclos Termodinámicos y Sistemas Térmicos Usuales. Primera edición. Editorial McGraw-Hill. Pág. 285-295 y 302-308, (1990).
- [17] **FOCER**, Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para America Central. *Manuales sobre Energía Renovable, BIOMASA*. Primera edición. Editorial Users Network. Costa Rica. Pág. 4,5, 13-15, (2002).
- [18] **GARCÍA, MANUEL, PENEDO, MARGARITA**. *Obtención de Fracciones Liquidadas a Partir de la Pirolisis del Bagazo de Caña*. Universidad de Oriente. Tecnología Química, Vol. XIX. Pág. 70,71, (1999).
- [19] **HERVAS, LORENZO**. *Los Residuos Urbanos y Asimilables*. Capítulo nueve. Junta de Andalucía. España. Pág. 296, 297, (2000).

## **ANEXO A.**

### **DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE CARBONES**

#### **OBJETIVO**

Verificar y determinar como mediante el quemado de 1 gramo de Carbón en exceso de Oxígeno en una bomba calorimétrica BICASA (Fabbric apparecchi scientifici e mobili per laboratorio chimici e industriali) se puede determinar su poder calorífico a volumen constante.

#### **GENERALIDADES**

El poder calorífico del carbón, expresa su valor como combustible. Se puede considerar como la suma de los calores de combustión de los materiales combustibles; es decir carbono, del hidrogeno y del azufre, menos el calor de descomposición de los materiales carbonases y mas o menos calores de reacciones menores que pueden ocurrir entre las impurezas presentes.

La materia mineral y la humedad se pueden considerar "inertes" y su presencia en el carbón reduce el poder calorífico en proporción directa a su contenido, también sirve para la clasificación de los carbones para sus múltiples usos.

#### **MATERIALES Y EQUIPOS**

- Bomba Calorimétrica BICASA A
- Recipiente Colorimétrico B
- Camisa de Agua C

- Agitador de Agua D
- Termómetro de alta precisión E
- Circuito de ignición F
- Crisoles de cuarzo
- Equipo auxiliar de presión
- Temporizador

## **REACTIVOS**

- Acido benzoico estándar
- Alambre fusible de Ni-Cr, 0.16 mm de diámetro
- Hilo blanco de algodón
- Oxígeno menor 99.5%
- Carbonato de sodio
- Indicador metil-naranja

## **PROCEDIMIENTO**

- Pesar 1 gramo de muestra
- Ensamblar la bomba
- Lavar la bomba con agua destilada
- Poner el crisol sobre el apósito soporte de la bomba
- Conectar 10 cm de alambre fusible a los electrodos internos de la bomba
- Amarre 5 cm de hilo de algodón (debe estar pesado) al alambre fusible y poder en contacto con el acido benzoico
- Cerrar la bomba y cargarla con 30 atm de Oxígeno.
- Poner en el recipiente colorimétrico 2.25 lts de agua
- Poner la bomba en el recipiente colorimétrico y conectar los terminales

- Prender el agitador esperar 5 minutos para que se alcance el equilibrio.
- Leer la temperatura "Ta".
- Provocar la ignición de la muestra
- Después de la ignición tomar las lecturas de temperatura cada 30 segundos, hasta que sea constante por 5 minutos.
- La temperatura cada 30 segundos, hasta que sea constante por 5 minutos
- La temperatura final "Tc" leída después de "C" minutos es la primera lectura depuse que la variación de cambio térmico se ha puesto uniforme.
- Contenido de la bomba: remover la bomba y dejar salir lentamente los gases residuales.
- Lavar el crisol y el interior de la bomba con chorro de agua destilada que contiene metil-naranja, hasta que no se observe mas reacción acida.
- Poner el liquido de lavado en un Beaker de 250 ml
- Titular con solución estándar de Na2CO3 para la corrección acida.
- Remover y medir los pedazos de alambre fusible que no se quemaron.

## CÁLCULOS

Calcular el poder calorífico bruto a volumen constante.

$$Q = \frac{\Delta T * C - e1 - e2 - e3}{m}$$

Donde:

Q: Poder calorífico, Btu/lb

$\Delta T$ : Incremento de temperatura, Tc-Ta

C : Capacidad Térmica del calorímetro Btu/lb\*gr/°C

5088.366

m : peso de la muestra

e1 : calor de combustión del algodón

7524 \* peso del algodón usado, gr (Btu/lb) \* gr

e2 : calor de combustión del alambre fusible Ni-Cr

0.41 – alambre quemado, mm (Btu/lb)\*gr

e3 : calor de formación del ácido sulfúrico

10.0 \* ml de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ( 0.394 N) usados (Btu/lb)\*gr

#### PREPARACIÓN DE STANDARS

- Solución de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.394 disolver 20.90 gr de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en 1000 ml de agua destilada.

- Indicador Metil – Naranja, disolver 0.02 gr de metil-naranja en 100 ml de agua destilada caliente, luego filtrar.