

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA  
BIOMASA AGRÍCOLA Y URBANA EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN BOLÍVAR, SANTANDER**

**LUIS FELIPE SALAZAR SARMIENTO  
JONATHAN JULIAN SANCHEZ MONDRAGÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA  
BIOMASA AGRÍCOLA Y URBANA EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN BOLÍVAR, SANTANDER**

**LUIS FELIPE SALAZAR SARMIENTO  
JONATHAN JULIAN SANCHEZ MONDRAGÓN**

**Trabajo para optar por el título de Ingeniero Electricista**

**DIRECTOR  
OSCAR ARNULFO QUIROGA QUIROGA  
PhD. en tecnología**

**CODIRECTOR  
GABRIEL ORDOÑEZ PLATA  
PhD. en Ingeniería Industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	15
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b>	16
1.1 ANTECEDENTES	16
1.2 FORMULACIÓN Y DECLARACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	20
1.4 OBJETIVOS	21
1.4.1 Objetivo General	21
1.4.2 Objetivos Específicos	21
1.5 ALCANCE	22
<b>2. ANÁLISIS DE LA BIOMASA DISPONIBLE</b>	23
2.1 BIOMASA URBANA - RESIDUOS SOLIDOS URBANOS (RSU)	24
2.2 BIOMASA AGRÍCOLA	25
<b>3. REVISIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOMASA</b>	29
3.1 GENERACIÓN POR COMBUSTIÓN	29
3.2 LA COGENERACIÓN BASADA EN LA BIOMASA (CHP)	31
3.3 GASIFICACIÓN DE BIOMASA	32
3.4 DIGESTIÓN ANAERÓBICA	35
3.5 CUADRO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS MENCIONADAS	36

3.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA GASIFICACIÓN FRENTE A LA COMBUSTIÓN	38
3.7 CASOS DE PLANTAS DE COMBUSTIÓN Y GASIFICACIÓN	39
3.7.1 Algunas plantas de combustión de residuos sólidos urbanos	39
3.7.2 Algunas plantas de gasificación	41
3.7.3 Caso en Colombia	42
<b>4. ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA EN BOLIVAR SANTANDER</b>	<b>44</b>
4.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INCINERACION DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS	44
4.1.1 Calderas acuotubulares	47
4.1.2 Turbina de vapor	47
4.1.3 Generador sincrono	48
4.1.4 Aerocondensadores	48
4.1.5 Bombas de impulsión de agua	49
4.2 TECNOLOGÌAS PARA GENERACIÓN A PARTIR DE BIOMASA AGRÍCOLA (PODA DE MORA)	49
4.2.1 Gasificadores de lecho fijo	49
4.2.2 Gasificadores de lecho fluidizado	56
4.3 COMPARACIÓN DE LECHO-FIJO Y GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO	60
4.4 CARACTERÍSTICAS A TENER EN CUENTA PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS	60
<b>5. CAPACIDAD DE GENERACIÓN A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE PODA Y RSU EN BOLIVAR SANTANDER</b>	<b>62</b>

<b>5.1 POTENCIAL DE GENERACIÓN CON RESIDUOS SOLIDOS URBANOS (RSU)</b>	62
5.1.1 Cantidad de residuos solidos urbanos	63
5.1.2 Calculo del poder calorifico inferior PCI	67
5.1.3 Ciclo de vapor	71
5.1.4 Esquema del ciclo de vapor	71
5.1.5 Cálculos del ciclo de vapor	72
5.1.6 Caudal del vapor generado	72
5.1.7 Caudal de extracciones del ciclo de vapor	73
5.1.8 Potencia en la turbina	74
5.1.9 Energía posible a producir con la cantidad de residuos sólidos urbanos en el municipio de Bolívar Santander	74
5.1.10 Aspectos económicos biomasa urbana	76
<b>5.2 POTENCIAL DE GENERACIÓN CON RESIDUOS AGRÍCOLAS</b>	77
5.2.1 Grupo electrógeno	80
<b>5.3 ASPECTOS TÉCNICOS</b>	84
<b>5.4 ASPECTOS ECONÓMICOS</b>	86
5.4.1 Inversión inicial biomasa agrícola	87
5.3.2 Estudio financiero acumulado anual	87
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	89
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	97
<b>ANEXOS</b>	103

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Procesos termoquímicos	18
Figura 2. Ubicación del municipio de Bolívar Santander.	23
Figura 3. Panorámica de un cultivo de mora de castilla	26
Figura 4. Panorámica poda de mora de Castilla	27
Figura 5. Residuos de poda de la mora	27
Figura 6. Esquema de la tecnología de la combustión	31
Figura 7. Esquema de la tecnología de la cogeneración	32
Figura 8. Esquema de la tecnología de Gasificación	34
Figura 9. Esquema de la tecnología Digestión anaeróbica	36
Figura 10. Plantas generadoras de electricidad apartir de residuos solidos urbanos en Europa.	40
Figura 11. Planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos en san Andrés	41
Figura 12. Planta NECOCLÍ	43
Figura 13. Horno de parilla para la incineración de residuos sólidos urbanos	46
Figura 14. Caldera acuotubular	47
Figura 15. Aerocondensador de agua	49
Figura 16. Gasificador en contracorriente	51
Figura 17. Gasificador co-corriente	52
Figura 18. Gasificador Cross-Draft	54
Figura 19. Gasificador de lecho fluidizado	58

Figura 20. Ciclo Rankine con regeneración con un precalentador	71
Figura 21. Precalentador	73
Figura 22. Gasificador Shandong Lvhuan	81
Figura 23. Gasificador Qingdao Huanhai	82
Figura 24. Gasificador Westitan	83

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Cuadro comparativo de tecnologías	37
Tabla 2. Ventajas y desventajas de tecnologías posibles	38
Tabla 3. Casos de plantas de biomasa en España	41
Tabla 4. Aspectos importantes de gasificadores estudiados	60
Tabla 5. Numero de usuarios por sector analizado	63
Tabla 6. Caracterización de los residuos que ingresan al carrasco	67
Tabla 7. Humedad de los componentes principales que se encuentran en los residuos sólidos urbanos	68
Tabla 8. Caracterización de los residuos sólidos urbanos en base humedad y en base seca	69
Tabla 9. Composición química de los residuos sólidos urbanos	69
Tabla 10. Valores del ciclo Rankine	72
Tabla 11. Potencial energético (PE) para las biomásas residuales de cinco cultivos representativos de Santander	79
Tabla 12. Costos gasificador (pesos colombianos)	87

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. ANÁLISIS DE COSTOS	103

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA AGRÍCOLA Y URBANA EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN BOLÍVAR SANTANDER<sup>\*</sup>

**AUTORES:** JONATHAN JUIAN SANCHEZ MONDRAGON  
LUIS FELIPE SALAZAR SARMIENTO<sup>\*\*</sup>

**PALABRAS CLAVE:** biomasa, residuos sólidos urbanos, gasificación, combustión, ciclo de vapor, peletización, generación, energía eléctrica.

### **DESCRIPCIÓN:**

El incremento del consumo energético mundial, el interés por reducir la dependencia del petróleo por parte de los países importadores y la necesidad de disminuir los problemas ambientales asociados con el uso de los combustibles fósiles, ha direccionado los esfuerzos de las empresas, los gobiernos y la academia hacia el estudio de los potenciales de fuentes alternativas y renovables de energía. En la dinámica de la economía global, el uso racional de la energía y la búsqueda del aprovechamiento máximo de los recursos renovables, los sistemas han evolucionado hacia la eficiencia energética. En este proyecto se analiza la cantidad de biomasa disponible en el casco urbano y las zonas agrícolas del municipio de Bolívar Santander; así mismo el potencial energético disponible en la biomasa agrícola, proveniente de la poda de la mora, y los residuos sólidos urbanos (RSU). Mediante los procesos termodinámicos de la gasificación y la combustión respectivamente. Como complemento se realiza un estudio en las tecnologías asociadas a los dos tipos de biomasa y un análisis económico a la biomasa agrícola para así poder establecer la viabilidad económica de la implementación de un proyecto en esta zona del país. Que le garantizaría al municipio de ser viable este proyecto independizarse del sistema interconectado nacional, y tener autosuficiencia energética.

---

<sup>\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: PhD. Luis Felipe Salazar Sarmiento

## ABSTRACT

**TÍTULO:** PREFEASIBILITY STUDY FOR BIOMASS UTILIZATION OF AGRICULTURAL AND URBAN IN ELECTRIC ENERGY GENERATION IN BOLIVAR SANTANDER\*.

**AUTHORS:** JONATHAN JUIAN SANCHEZ MONDRAGON  
LUIS FELIPE SALAZAR SARMIENTO\*\*

**KEYWORDS:** biomass, municipal solid waste, gasification, combustion, steam cycle, pelletizing, generation, electrical energy.

### DESCRIPTION:

The increase in global energy consumption, the interest in reducing dependence on oil by importing countries and the need to reduce environmental problems associated with the use of fossil fuels, has directed the efforts of companies, governments and academy to study the potential of alternative and renewable energy sources. In the dynamics of the global economy, rational use of energy and the search for the maximum use of renewable resources, systems have evolved towards energy efficiency. This project is analyzes the amount of biomass available in the town and the agricultural areas of the municipality of Bolívar Santander; likewise, the energy potential available in agriculture, from the pruning of Mulberry biomass, and municipal solid waste (MSW). Using the thermodynamic processes of the combustion and gasification respectively. As a complement, it is study in the technologies associated with the two types of biomass and an economic analysis to agricultural biomass as well to establish the economic viability of the implementation of a project in this area of the country. This project warrant to the municipality to be viable this project independent of the interconnected system, and have energy self-sufficiency.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School.  
Director: PhD. Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga.

## INTRODUCCIÓN

La biomasa constituye un recurso natural que dependiendo de la tasa de consumo puede ser tratado como una fuente renovable de energía. El sistema renovable del recurso, conlleva a que el ciclo sea cerrado en términos globales, fijando el mismo carbono que se emite a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> durante los procesos de combustión y oxidación; al mismo tiempo el contenido de azufre, ceniza y metales pesados en la biomasa es bajo en comparación con los combustibles derivados del petróleo y el carbón, y por tanto los niveles de contaminación por unidad de energía generada son significativamente menores a los niveles producidos con carbón e hidrocarburos (UPME-AENE, 2003).

Las fuentes de biomasa son abundantes, bien sea como cultivos establecidos o como residuos agroindustriales o desechos forestales. Colombia tiene un alto potencial en residuos orgánicos de la agricultura que se cultiva en los diferentes tipos de siembra, sin embargo, aún es reducida la participación de cultivos de biomasa para aprovechamientos energéticos (UPME-AENE, 2003).

Este proyecto tiene como objetivo establecer una hipótesis con las características técnicas de un sistema, que permita la utilización de la biomasa agrícola y urbana procedente del municipio de Bolívar, Santander, a fin de obtener energía eléctrica. Para desarrollar la premisa mencionada será necesario determinar la cantidad de biomasa generada por el municipio de Bolívar y según el resultado, determinar los métodos adecuados que permitan la obtención de energía eléctrica.

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

En el presente capítulo se muestran los principales elementos considerados para la formulación del trabajo de grado, como son: los antecedentes, la motivación y la declaración del problema.

### **1.1 ANTECEDENTES**

En la dinámica de la economía global, el uso racional de la energía y la búsqueda del aprovechamiento máximo de los recursos renovables ha evolucionado hacia la eficiencia energética. De este modo, la eficiencia energética es un concepto de la cadena productiva en permanente cambio, en el que confluyen los nuevos enfoques del desarrollo sostenible en la disminución de los impactos ambientales, el incremento de la productividad, el manejo eficiente de los recursos y su trascendencia en las organizaciones y en los procesos productivos.

El incremento del consumo energético mundial, el interés por reducir la dependencia del petróleo por parte de los países importadores y la necesidad de disminuir los problemas ambientales asociados con el uso de los combustibles fósiles, ha direccionado los esfuerzos de las empresas, los gobiernos y la academia hacia el estudio de los potenciales de fuentes alternativas y renovables de energía (Caicedo, 2010). La biomasa en la actualidad, es la fuente renovable más utilizada, con la capacidad de hacer una gran contribución en la generación sostenible de energía, debido a que posee un gran potencial para la producción de calor, electricidad, y la obtención de bio-combustibles para transporte (UPME, 2010).

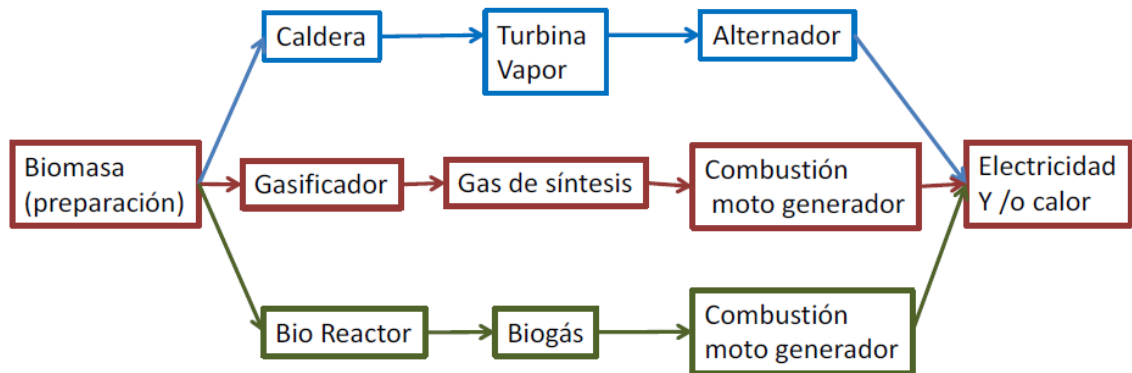
La biomasa es la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales. Dentro de la biomasa se distinguen cuatro fuentes energéticas diferentes: biomasa sólida, biogás, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) y biocarburantes, también llamados biocombustibles líquidos (CORPOEMA-CREG, 2012).

En Colombia el potencial de biomasa residual del sector agrícola en el año 2010 para generación eléctrica, según estudio realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) era de 16.267 MWh/año de energía primaria (esto representa menos del 0,2% del consumo eléctrico total para el año 2009), siendo los residuos de la caña de azúcar los de mayor potencial con 2744,9 MWh/año, seguidos por la caña panelera con un potencial de 1876. MWh/año, residuos de café con 1136 MWh/año y otros cultivos agrícolas con un gran potencial (UPME. IDEAM, MINISTERIOS DEL RAMO, COLCIENCIAS, UIS, 2009) (CORPOEMA-CREG, 2012).

Para la producción de electricidad a partir de biomasa sólida se requieren sistemas complejos; lo anterior debido al bajo poder calorífico de esta fuente energética, y a su alto contenido de humedad y de residuos volátiles. Actualmente, las centrales para la generación por biomasa requieren mayores inversiones que aquellas que utilizan combustibles convencionales. Por lo anterior y sumado a la dificultad que conlleva el aprovisionamiento de la biomasa en el balance de esta forma de energía, el peso de la biomasa para la generación eléctrica es menor que el peso de la biomasa para usos térmicos (Cerdá, 2012) sin embargo la generación eléctrica con biomasa sólida posee la ventaja de ser una fuente de energía altamente gestionable, que la distingue de otras fuentes renovables dado que puede estar disponible independientemente de las condiciones meteorológicas, lo cual proporciona garantías de suministro al sistema.

Para la conversión de biomasa sólida en electricidad se utilizan procesos termoquímicos en donde se destaca la combustión y la gasificación.

**Figura 1. Procesos termoquímicos**



Fuente: (CORPOEMA-CREG, 2012)

La combustión de la biomasa, es el proceso con el cual el carbono y el hidrógeno contenidos en el combustible reaccionan con el oxígeno para formar dióxido de carbono y agua y así liberar calor. Para mejorar la eficiencia de estos sistemas se utiliza la co-combustión, que consiste en la combustión de la biomasa junto con carbón mineral, y la cogeneración, que consiste en encontrar una aplicación para aprovechar el calor residual y generar energía eléctrica simultáneamente; es el caso de la industria de la caña de azúcar en Colombia (UPME-AENE, 2003), (Cerdá, 2012), (Quaak, 1999).

La gasificación de la biomasa es el proceso de oxidación parcial de la biomasa a través del calor. Como resultado del proceso se produce un combustible compuesto por una mezcla de gases, rico en monóxido de carbono y en hidrógeno de alto valor calorífico. El gas obtenido puede ser enriquecido para obtener una mezcla de gases de mayor calidad, lo que se conoce como gas síntesis de biomasa o *syngas* (CORPOEMA-CREG, 2012), (J. A. Ruiz). La gasificación es más eficiente que la combustión y aunque esta tecnología aún se encuentra en

desarrollo, es la más recomendada para plantas de pequeña escala < 5 a 10 MW (CORPOEMA-CREG, 2012).

## **1.2 FORMULACIÓN Y DECLARACIÓN DEL PROBLEMA**

El cultivo de la mora es una de las principales actividades productivas de un gran número de familias que participan en la producción asociativa de este producto, con un enfoque de modelo de finca campesina, en la zona fría del municipio de Bolívar Santander.

El cultivo de la mora genera gran cantidad de residuos agrícolas, debido a que las plantas deben ser podadas frecuentemente para la formación, mantenimiento o renovación de las mismas. La poda de formación es la primera que se hace y consiste en eliminar las ramas débiles que no van a servir, lo que hará que la planta tenga un mejor manejo para su producción. La poda de mantenimiento consiste en eliminar las ramas secas, látigos o bejucos (estériles), quebradas o leñosas, y las que ya hayan producido. Su objetivo es tener un cultivo tecnificado y de alta producción que se lleva a cabo mensualmente. Finalmente, cuando la planta ha presentado bajas considerables en la calidad y cantidad de fruta producida o en caso grave de enfermedades o plagas, se hace la renovación total o parcial de la planta eliminando las ramas afectadas, dándole un nuevo aire a la planta.

Con el presente trabajo de grado pretende revisar la viabilidad de aprovechar los distintos tipos de biomasa generados en el municipio de Bolívar Santander, analizando los potenciales de biomasa sólida del tipo residual o secundaria conformada por los residuos agrícolas leñosos producto de la poda de la mora (a este tipo de residuo se le dará prioridad en el análisis), residuos forestales producto de la limpieza de los potreros y residuos agrícolas herbáceos como la

caña del maíz. En la zona también crecen algunas especies forestales leñosas como el sauce o el eucalipto que aún no son explotadas como cultivos energéticos para la producción de biomasa. Así mismo, en la zona hay un potencial de biomasa representado en la fracción orgánica de los residuos sólidos que se generan en la cabecera municipal, cuya transformación en energía se puede realizar a través de la incineración, lo cual ayudaría indirectamente con la gestión de las basuras dado que el municipio no posee relleno sanitario, siendo necesario transportar los desechos hasta otros municipios para su disposición final.

La producción y aprovechamiento de la biomasa contribuirá a la explotación de residuos con poca o nula utilización, reduciendo las necesidades para el tratamiento de estos, la generación de mano de obra, creando fuentes de empleo más estables en el entorno rural. Así mismo se contribuirá al desarrollo sustentable y al cuidado del medio ambiente.

### **1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo y aprovechamiento de alternativas energéticas renovables es una prioridad para los gobiernos y la comunidad científica en todo el mundo, pues actualmente se busca reducir la dependencia de la energía fósil y disminuir los efectos sobre el ambiente causados por los gases del efecto invernadero; contribuir en la solución de estos problemas revisando alternativas para el aprovechamiento de los recursos renovables disponibles a nivel rural, motiva el presente trabajo de grado.

En la zona fría del municipio de Bolívar, Santander, la principal actividad agrícola es el cultivo de la mora. Este cultivo genera residuos orgánicos debido a su poda, los cuales no están siendo aprovechados.

Así mismo, en Colombia no se conocen experiencias específicas sobre la utilización de los desechos de poda de la mora como se propone en el presente trabajo de grado, la cual de resultar viable puede ser fácilmente masificada en la región y reproducida en otros lugares. El estudio y selección de las tecnologías más apropiadas para el aprovechamiento de la biomasa serán los principales aportes del proyecto.

La materialización de proyectos en este ámbito que viabilicen el aprovechamiento de recursos renovables en la región, beneficiará la generación de mano de obra local, contribuirán a la reducción de la brecha tecnológica de estas regiones menos desarrolladas y promoverán la atención y el cuidado del medio ambiente.

## **1.4 OBJETIVOS**

**1.4.1 Objetivo General** Analizar la prefactibilidad de generación de energía eléctrica a pequeña escala, a partir de la utilización de la biomasa procedente de residuos agrícolas y urbanos en el municipio de Bolívar, Santander.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Cuantificar el potencial energético de las principales fuentes de obtención de biomasa, para cada una de las tecnologías a tener en cuenta para el estudio.
- Establecer la capacidad de generación de energía eléctrica que se pudiera obtener con la biomasa aprovechable, las alternativas tecnológicas disponibles y los costos asociados a cada una de ellas.

## **1.5 ALCANCE**

El alcance del presente proyecto de investigación está delimitado al estudio de alternativas técnicas y tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa en la zona escogida, según la cuantificación energética que se halle, y que sean más adecuadas para la generación de electricidad. El estudio se centrará en cuantificar la biomasa y revisar las tecnologías para luego establecer un potencial en bruto. Principalmente en el análisis de la biomasa obtenida a partir de los residuos de poda de la mora en la zona fría del municipio de Bolívar Santander, considerando también otras fuentes de biomasa aprovechables y teniendo en cuenta las particularidades geográficas, medioambientales, sociales y económicas de esa región, para así establecer un aproximado, de la energía eléctrica que se pudiera obtener y la mejor tecnología a emplear.

## 2. ANÁLISIS DE LA BIOMASA DISPONIBLE

Bolívar es un municipio de Colombia, situado al norte del país, en el departamento de Santander (provincia de Vélez). Su territorio limita por el norte con los municipios de Landázuri y Cimitarra, por el este con Vélez y Guavatá, por el sur con El Peñón, Sucre, La Belleza y Puerto Boyacá (departamento de Boyacá) y al oeste con el departamento de Antioquia (Bolivar-Santander, Alcaldía de Bolivar, 2015). En la siguiente ilustración se puede observar la ubicación del municipio.

**Figura 2. Ubicación del municipio de Bolívar Santander.**



Fuente: (WIKIPEDIA, 2016)

Bolívar posee tres tipos de climas: clima frío, templado y cálido, y cuenta con un territorio de 971.5 kilómetros cuadrados aproximadamente, uno de los municipios más grandes del departamento. Al presentar varios climas potencializa el desarrollo de la agricultura, facilitando el cultivo de legumbres, hortalizas, cacao y café. Actualmente Bolívar se está consolidando en la comercialización de Mora y Caña de azúcar, productos que desde el año 2000 se ha convertido en unos de los principales ingresos para las familias campesinas. (Bolivar-Santander, Alcaldia de Bolivar, 2015).

Dentro de los principales tipos de biomasa aprovechables para generación de electricidad en el municipio de Bolívar Santander se encuentran principalmente la biomasa conformada por los residuos agrícolas producto de la poda de la mora (a este tipo de residuo se le dará prioridad en el análisis). Así mismo, en la zona hay un potencial de biomasa representado en la fracción orgánica de los residuos sólidos que se generan en la cabecera municipal, cuya transformación en energía se puede realizar a través de la incineración, lo cual ayudaría indirectamente con la gestión de las basuras dado que el municipio no posee relleno sanitario, siendo necesario transportar los desechos hasta otros municipios para su disposición final.

El análisis se centrará en los residuos generados por el cultivo de mora que representa una de las mayores actividades económicas del municipio y también en los residuos sólidos urbanos que allí se producen dada la problemática que existe para su disposición final.

## **2.1 BIOMASA URBANA - RESIDUOS SOLIDOS URBANOS (RSU)**

Gran cantidad de desechos urbanos se generan diariamente en el planeta, esto causa un problema para la sociedad y el medio ambiente. De igual manera, los

desechos urbanos ocasionan un impacto económico importante debido a los costos asociados, al tratamiento y disposición final de los mismos. La solución está ligada a los conceptos actuales de gestión de los residuos sólidos urbanos, donde se busca minimizar su producción y valorizarlos mediante procesos de recuperación energética (Aguilar, 2016).

La literatura considera muchos factores que influyen en la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) per cápita, entre estos se tienen: el estrato, el ingreso económico, el nivel de educación formal, el nivel de educación no formal, etc. Se afirma que la producción de RSU per cápita está relacionada directamente con el estrato, el ingreso económico, el nivel de educación y el consumo de energía, no obstante, se observa que la capacidad de una persona de tener más ingresos lo deja ubicarse en un estrato alto, también le permite mayor consumo de bienes y servicios, por lo cual desecha más. La relación entre el ingreso económico y el consumo de energía, indica que cuanto mayor es la capacidad adquisitiva de las personas, mayor es el uso de energía, debido a que tiene mayor número de electrodomésticos (Villegas, 2012).

Los resultados de la cantidad de residuos sólidos urbanos que se pueden producir en Bolívar son de 14-28 kg/hora, se puede observar su cálculo detallado en el capítulo 5.

## **2.2 BIOMASA AGRÍCOLA**

Para la estimación de la cantidad de biomasa agrícola disponible para generación eléctrica, se recolectó información con la Asociación Campesina de Productores (Morelia) del municipio de Bolívar. Según la información aportada por Morelia sobre los cultivos de sus productores asociados (no todos los productores de mora de Bolívar están asociados a Morelia), los datos son:

- Periodicidad de poda: quincenal
- Volumen de poda: 400.000 kg cada 15 días
- Número de hectáreas cultivadas de productores asociados: 100 has
- Hectáreas cultivadas totales estimadas en el municipio y municipios aledaños: 300 has

La obtención de esta biomasa dependiendo del clima y otras características biológicas, puede ser del 75 al 100%, ya que condiciones como exceso de humedad o densidad de la materia exigen el no uso de estos desechos para aprovechamiento. Su eficiencia radica en que es un fruto que se cultiva durante todo el año y que además ostenta de gran demanda en los centros de abastos de la zona de Bogotá (Cerdá, 2012).

A continuación, se ilustra los cultivos y sus residuos que actualmente no tienen ninguna disposición, estos residuos son depositados al margen de los cultivos donde se les incinera o se convierten en foco para la propagación de enfermedades o plagas.

### **Figura 3. Panorámica de un cultivo de mora de castilla**



**Figura 4. Panorámica poda de mora de Castilla**



**Figura 5. Residuos de poda de la mora**



### **3. REVISIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOMASA**

Cuando se desea generar energía con biomasa se puede optar por diferentes, procesos termoquímicos (combustión, pirolisis y gasificación) y procesos bioquímicos (digestión anaeróbica) (Cerdá, 2012).

La elección entre uno y otro depende de las características de los recursos, de la cuantía disponible y del tipo de demanda energética requerida. En general, los sistemas comerciales existentes en el mercado para utilizar la biomasa residual seca se pueden clasificar en dos grupos: los basados en la combustión del recurso y los centrados en su gasificación. Los sistemas que aprovechan el contenido energético de la biomasa residual húmeda están basados en su digestión anaeróbica. Por último, para ambos tipos de recursos (biomasa seca y húmeda), existen tecnologías que posibilitan la obtención de biocarburantes.

#### **3.1 GENERACIÓN POR COMBUSTIÓN**

La combustión directa es el sistema más antiguo y común de obtención de calor a partir de la biomasa y su conversión a energía. Debido a que la combustión es un proceso, bien establecido hay una amplia variedad de tecnologías comerciales, aprovechables de acuerdo a las características de la biomasa y la escala de aplicación (CORPOEMA-UPME, 2010).

Se trata de un proceso en el que el combustible reacciona químicamente con el exceso de oxígeno “en una reacción exotérmica, obteniéndose dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua (H<sub>2</sub>O) y si los elementos, azufre y nitrógeno forman parte de los

reactivos, óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_x\text{O}_2$ ), así mismo liberar calor”. Mediante la combustión directa de la biomasa se produce la transformación de la energía química almacenada en ella, en energía calórica. El calor generado, puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica y/o calefacción (Cerdá, 2012).

El sistema de calentamiento con madera (leña) ha sido usado desde el comienzo de la civilización, y aun es la mayor tecnología de conversión de biomasa aplicada en la generación de energía, y aunque las unidades modernas como las calderas para pellets utilizadas en co-generación tienen eficiencias tan altas como el 90%, la mayoría de las herramientas de combustión en uso, son de baja eficiencia del 5 al 30% tales como los hornos de cocción utilizados en los países de desarrollo (CORPOEMA-UPME, 2010).

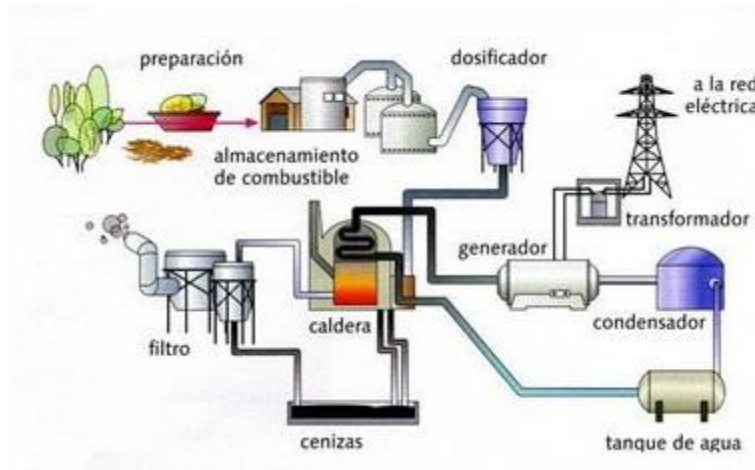
En los procesos de combustión está la co-combustión la cuál trata con combustibles fósiles.

- **CO-COMBUSTIÓN**

La co-combustión de productos provenientes de la biomasa junto con los provenientes de los combustibles fósiles, por lo general carbón, en los procesos de aprovechamiento de calor y electricidad, es de interés para todas las escalas de operación, en especial, en los países del norte de Europa, en los que la co-combustión es una práctica común utilizando un 40% de biomasa con turba o carbón de muy bajo rango. Esta aplicación ha demostrado ser lo más rentable y eficiente a gran escala en la conversión de la biomasa en electricidad. Este enfoque aprovecha la infraestructura existente de la planta de carbón y por tanto requiere una mínima inversión en los sistemas de alimentación y pre-tratamiento de la biomasa. Asimismo, se han hallados ganancias en las eficiencias de

conversión con respecto a estas plantas con sólo carbón (CORPOEMA-UPME, 2010).

**Figura 6. Esquema de la tecnología de la combustión**

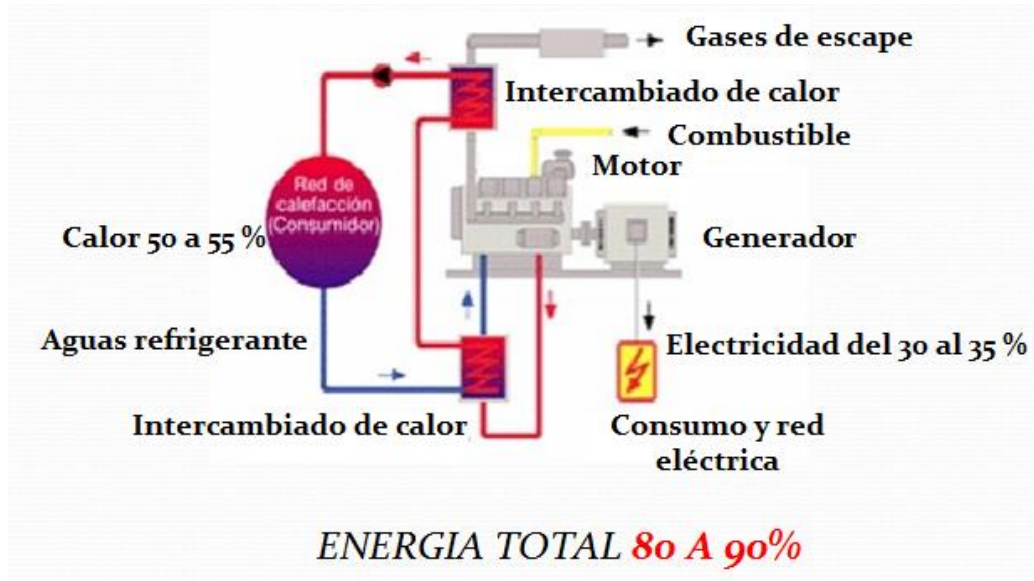


Fuente (Energía, s.f.).

### **3.2 LA COGENERACIÓN BASADA EN LA BIOMASA (CHP)**

El principal medio para aumentar significativamente la eficiencia global de una planta de energía (y por tanto su competitividad) es encontrar una aplicación económica para su calor residual y electricidad al mismo tiempo, también llamadas plantas de cogeneración. “En esta forma la eficiencia en la utilización de la energía puede estar el rango de 80-90%” (AIE 2008). Este suele ser el caso, por ejemplo, en la industria de la caña de azúcar en Colombia. Con la cogeneración se ha demostrado que para las instalaciones independientes de gran escala se puede reducir el costo de producción de energía en un 40- 60%. (CORPOEMA-UPME, 2010)

**Figura 7. Esquema de la tecnología de la cogeneración**



Fuente: (INVERGIA, 2016).

### 3.3 GASIFICACIÓN DE BIOMASA

La gasificación es un proceso termoquímico en el que la biomasa se transforma en una mezcla de varios gases combustibles ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) y vapor de agua. Esta mezcla de gases llamada gas de síntesis o “syngas”, tiene un poder calorífico inferior (PCI) del orden de la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante, que es un gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para iniciar las reacciones, y oxígeno (IDAE, 2007).

La proporción obtenida de cada uno de los componentes son función de los materiales empleados (composición, grado de humedad, tamaño y uniformidad de las partículas, etc.), de las condiciones en que se lleva a cabo el proceso (con aire o con oxígeno puro, presión de operación, temperatura del proceso, etc.) y del tipo de gasificador utilizado.

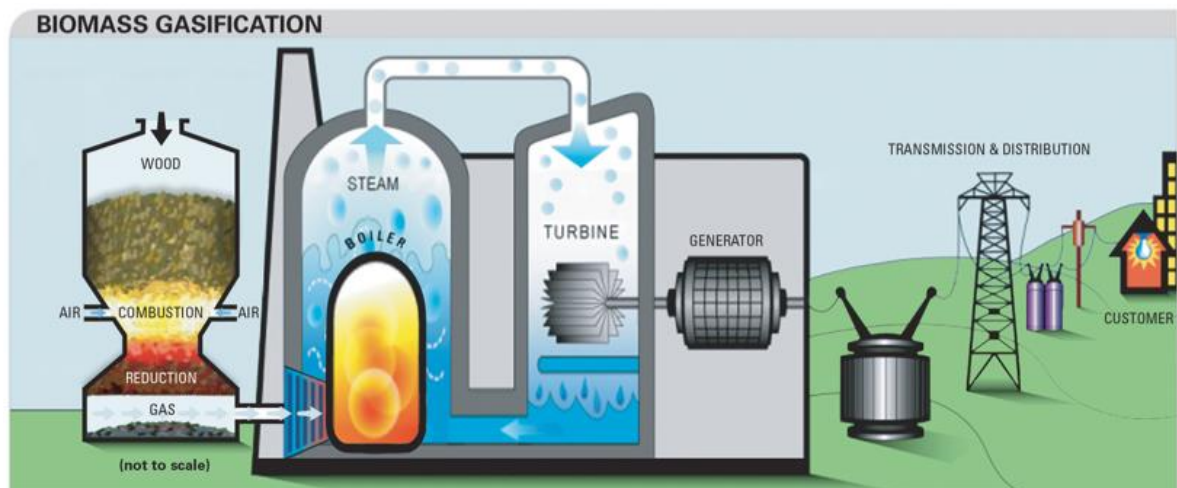
Tiene dos ventajas claves sobre combustión directa; en primer lugar, la gasificación es un proceso muy adaptable, cualquier materia prima de la biomasa se puede convertir en gas combustible con una alta eficiencia; en segundo lugar, el gas combustible puede ser utilizado directamente en aplicaciones para la producción de calor, de energía eléctrica o acondicionado como gas de síntesis para la producción de biocarburantes.

La aplicación de la gasificación para generación eléctrica es particularmente importante para plantas de pequeña escala (<5 - 10 MWe), donde los sistemas de gasificación son relativamente simples y se pueden combinar con motores de gas; a estos tamaños los sistemas basados en vapor se encuentran en desventaja como consecuencia de los costos de escala. A escalas mayores a (> 30 MW eléctricos), los sistemas basados en la gasificación, junto con sistemas combinados de turbinas a gas y de vapor (IGCCB), ofrecen ventajas en comparación con la eficiencia de combustión directa. Sin embargo, estas plantas son de mayor cuidado para su funcionamiento y requieren operarios más calificados en comparación con las instalaciones de combustión directa, su eficiencia y fiabilidad aún no han sido establecidas plenamente (CORPOEMA, 2010).

Como se comentó anteriormente la gasificación también puede co-producir una gama de productos finales, tales como calor y electricidad, así como los combustibles líquidos y posiblemente otros productos de bio-refinerías. Estos conceptos avanzados se están investigando a nivel de investigación básica y de plantas piloto. Así la gasificación de biomasa además de sustituir a combustibles ligeros de origen fósil, permite obtener altos rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de moto-generadores accionados por syngas, lo que es difícil mediante combustión directa para generación de vapor y posterior expansión de éste en un turbo alternador, ya que con un ciclo Rankine convencional simple las cifras rondan un 22% de rendimiento eléctrico (IDAE, 2007).

El uso de gasificadores para aplicaciones de calor se realiza principalmente en los países emergentes, mientras que los gasificadores para los productos de mayor escala como en la generación de energía eléctrica tiene su mayor importancia en los países desarrollados. Cientos de gasificadores de biomasa de tamaño pequeño se extienden y operan intermitentemente en China, India y en el sureste de Asia con pagos retornables (The World Bank Group, 2006).

**Figura 8. Esquema de la tecnología de Gasificación**



Fuente: (NEIRA, 2006).

Dentro de la gasificación hay un proceso muy importante el cuál se usa en varios procesos tecnológicos llamado pirólisis.

- **PIROLISIS**

La pirólisis es el método utilizado para descomponer materia orgánica a través de la oxidación que es el calentamiento de materia original con la ausencia total de oxígeno, con el propósito de obtener compuestos sólidos (carbón vegetal), líquidos y gaseosos aptos como materiales para distintas industrias o combustibles; las cantidades relativas de los tres productos que se obtienen dependen de la

temperatura a la que se opere y del tiempo de residencia utilizado en el proceso. La pirolisis convencional requiere el calentamiento de materia original con la ausencia total de oxígeno. La biomasa empleada (residuos agrícolas y forestales, residuos sólidos urbanos) y las condiciones de operación del proceso (temperatura, presión, etc.) son los factores que determinan la composición y tipo de producto obtenido (Cerdá, 2012).

### **3.4 DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

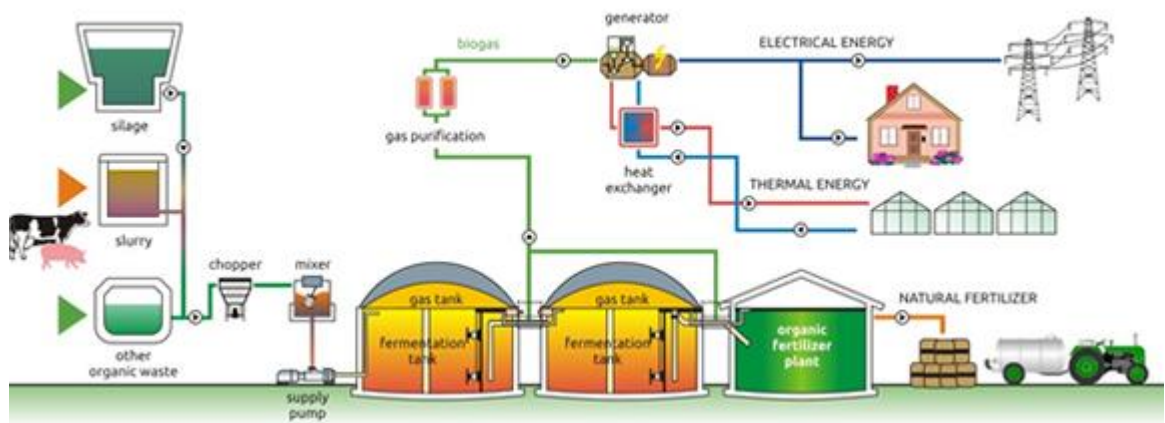
La digestión anaeróbica es la degradación biológica de la biomasa en condiciones libres de oxígeno, el principal producto es el biogás, el cual es un gas rico en metano. El biogás puede ser quemado en los motores de generación de energía, en co-generación, y si las normas lo permiten, inyectarlo como bioetanol purificado en la red doméstica de gas natural o para su utilización como biocombustible en los motores de combustión interna tal como se hace con el gas natural en la actualidad en Colombia.

La digestión anaeróbica es especialmente adecuada para las materias primas húmedas como el estiércol de los animales, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, residuos agrícolas húmedo y la fracción orgánica de los RSU. La digestión anaerobia también ocurre naturalmente en los vertederos subterráneos y produce gases de vertederos que se pueden recuperar para su uso en aplicaciones de energía. En definitiva, esta es una tecnología bien establecida comercialmente y aunque su argumento económico depende en gran medida en la disponibilidad de materia prima muy barata o gratuita, como los lodos de las aguas residuales, estiércol y otros residuos agrícolas, es importante tener en cuenta los costos ambientales para la colección y separación del gas metano. Hoy en día, China es el mayor productor de biogás en el mundo, con alrededor de 18 millones

de hogares agrícolas y con 3.500 digestores de biogás de media a gran escala (DEFRA, 2007).

En Europa, Alemania es el líder en esta tecnología, con unos de 550 MW de capacidad instalada en 2006 (similar a la de una central eléctrica de carbón). Con el fin de aumentar la productividad, se utiliza cada vez más materia prima suplementaria como residuos agrícolas (CORPOEMA-UPME, 2010).

**Figura 9. Esquema de la tecnología Digestión anaeróbica**



Fuente (Claros, 2014)

### 3.5 CUADRO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS MENCIONADAS

A continuación, se hará un análisis comparativo de las tecnologías acabadas de mencionar donde se compararán por medio de 4 aspectos, que son el aspecto tecnológico, el aspecto ambiental, el aspecto económico y los equipos que cada una de estas tecnologías utiliza.

**Tabla 1. Cuadro comparativo de tecnologías**

<b>Tecnologías</b>	<b>Evaluación de la tecnología</b>	<b>Evaluación Ambiental</b>	<b>Evaluación Económica</b>	<b>Equipos</b>
<b>Gasificación</b>	Mezcla de gas combustible conocido como gas pobre, y este es de bajo poder calorífico.	De efecto neutro en cuanto a los gases de efecto invernadero.	A pequeña escala los costos aumentan en comparación con proyectos de gran escala.	-Gasificador de biomasa, generador, turbina.
<b>Digestión anaeróbica</b>	Obtención de un gas llamado biogás, se compone de metano, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> .	Las emisiones estarán por debajo de las normas prescritas.	Actualmente la tecnología es costosa de implementar, pero se espera que a largo plazo los costos disminuyan.	-Captura de gas, soplador, triturador de gas, quemador
<b>Combustión</b>	Vapor de agua, obtenido por la quema de los residuos de la biomasa agrícola o urbana.	Es una tecnología probada y aprobada, y se considera que los efectos ambientales son mínimos.	A gran escala la tecnología es viable, a pequeña escala no es recomendable implementar esta tecnología.	-Horno parrilla, turbina, generador, calentador.

Para el estudio que estamos realizando la digestión anaeróbica no la tendremos en cuenta puesto que esta tecnología requiere de biomasa líquida, tales como aguas residuales, abonos líquidos etc. Como la biomasa que estamos analizando es biomasa seca solo tendremos en cuenta la combustión y la gasificación puesto que estas necesitan de biomasa seca.

### 3.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA GASIFICACIÓN FRENTE A LA COMBUSTIÓN

En la siguiente tabla se resumirá en un cuadro comparativo las ventajas y las desventajas de las dos tecnologías más utilizadas en la generación de energía eléctrica a partir de la biomasa seca, las cuales son la combustión y la gasificación.

**Tabla 2. Ventajas y desventajas de tecnologías posibles**

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>COMBUSTIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sencillez del proceso</li> <li>• Tecnología altamente desarrollada a través de los años.</li> <li>• Amplio uso industrial</li> <li>• Muy usada para calefacción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendimientos bajos de aproximadamente el 30%.</li> <li>• Genera gran cantidad de residuos sólidos.</li> <li>• Mantenimiento de la caldera alto.</li> <li>• Gestión de los residuos complicada.</li> <li>• Tecnología con un rendimiento poco Relevante para la producción eléctrica.</li> </ul>
<b>GASIFICACIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integración de pirolisis y combustión en El proceso.</li> <li>• Flexibilidad de combustibles.</li> <li>• Generación de residuos y gases de Efecto invernadero bajas.</li> <li>• Fácil gestión de residuos.</li> <li>• Aprovechamiento de productos Secundarios en otras industrias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión elevada.</li> <li>• Tecnología poco madura.</li> <li>• Mayor dificultad en el control del Proceso.</li> </ul>

Se destaca del siguiente cuadro comparativo que los residuos sólidos urbanos (RSU), es mejor tratarlos por medio de la tecnología de la combustión ya que la gasificación aún está en etapa de estudio para este tipo de biomasa, y para los residuos de la mora la mejor opción es la gasificación ya que en Colombia existen proyectos con esta tecnología la cual está en proceso de estudio y aplicación.

### **3.7 CASOS DE PLANTAS DE COMBUSTIÓN Y GASIFICACIÓN**

En esta sección se muestran algunos casos de la aplicación de las tecnologías de combustión para RSU y gasificación para biomasa agrícola, tanto en el ámbito nacional como internacional.

#### **3.7.1 Algunas plantas de combustión de residuos sólidos urbanos**

Históricamente el tratamiento que se le ha dado a los residuos sólidos urbanos a nivel global ha sido el de depositarlos en vertederos. Pero no es la única alternativa que existe para tratar estos desechos. La evolución para el manejo de los desechos urbanos en Europa ha sido muy eficiente, no solo aprovechan los residuos sólidos urbanos para generar electricidad y calor, sino que también aportan significativamente al medio ambiente, controlando sustancialmente las emisiones de gas metano que estos desechos emiten a la atmosfera cuando son acumulados en los rellenos sanitarios.

En la siguiente imagen aparecen algunas plantas generadoras de electricidad a partir de residuos sólidos urbanos en Europa.

**Figura 10. Plantas generadoras de electricidad a partir de residuos sólidos urbanos en Europa.**



**PLANTA HURUM**  
 UBICACION : NORWICH  
 OPERACION : 2001  
 CAPACIDAD : 39000 TONELADAS/AÑO  
 PRODUCCION DE ENERGIA : 105 GWh  
 termico/año



**PLANTA ISLA DE WIGHT**  
 UBICACION: REINO UNIDO  
 OPERACION : 2009  
 CAPACIDAD : 30000 TONELADAS/AÑO  
 PRODUCCION DE ENERGIA : (eléctrica)  
 1,8 MW



**PLANTA DONCASTER**  
 CAPACIDAD : 120000 TONELADAS/AÑO



**PLANTA BARRY**  
 CAPACIDAD : 80000 TONELADAS/AÑO



**PLANTA MINDEM**  
 UBICACION : ALEMANIA  
 OPERACION : 2001  
 CAPACIDAD : 35000 TONELADAS/AÑO  
 PRODUCCION DE ENERGIA : 98 GWh  
 termico /año



**PLANTA SARPSBORG 2**  
 UBICACION : NORWICH  
 OPERACION : 2010  
 CAPACIDAD : 78000 TONELADAS/AÑO  
 PRODUCCION DE ENERGIA : 256 GWh  
 termico/año



**PLANTA BRADFORD**  
 CAPACIDAD : 160000 TONELADAS/AÑO

Fuente: (INTI, 2011)

- **PLANTA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA CON RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN SAN ANDRES**

En el año 2010 inició el proyecto de construcción de una planta en la isla de San Andrés con el apoyo por el gobierno colombiano, con el fin de producir 4GWh año aprovechando los residuos sólidos urbanos. La planta se encuentra en operación y tiene una capacidad instalada de 1,8 MW y puede procesar hasta 28 toneladas de basura al día (10220 toneladas/año). La inversión del proyecto fue de cerca 34.000 millones de pesos (Sopesa, s.f.).

**Figura 11. Planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos en san Andrés**



Fuente (Sopesa, s.f.)

**3.7.2 Algunas plantas de gasificación** España es uno de los países que más ha avanzado en el aprovechamiento de los recursos renovables para generación de energía. En la tabla 3 se muestran algunos proyectos desarrollados para el año 2010, en donde se destaca la tecnología empleada, el tipo de residuos aprovechados, la capacidad de generación y su ubicación (IDAE , 2007) (DIARIO DE LEON , 2008).

**Tabla 3. Casos de plantas de biomasa en España**

Planta	Tipo de tecnología	Alimentación	Potencia suministrada	Ubicación
TECNOGAS (POLIGAS) Ambiente S.L	Lecho fluidizado burbujeante	Residuos plásticos de la industria cerámica 20.000 ton/año	8,3 MW	Ribesalbes (Castellón)

Planta	Tipo de tecnología	Alimentación	Potencia suministrada	Ubicación
CIDAUT	Lecho fijo	Biomasa 125-625 kg/h (planta piloto)	100-500 kW	Valladolid
GUASCOR	Lecho móvil en corrientes paralelas	Biomasa, pruebas con porcentajes de residuos plásticos	1,4 MW	Vitoria
INERCO	Lecho fluidizado burbujeante	Biomasa 1 ton/día	3 MW	Sevilla
TAIM-TFG	Lecho móvil en corrientes paralelas	Biomasa leñosa	795 kW	Zaragoza

Fuente: (Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de Navarra, Fondo Europeo de Desarrollo Regional, 2010)

**3.7.3 Caso en Colombia** De los últimos avances y mayores inversiones que se han llevado en Colombia está una planta ubicada en el municipio de Necoclí, Antioquia. La planta fue construida en el 2008 y se trata de un proyecto adelantado por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas, IPSE, que cuenta con el acompañamiento de la Universidad Nacional de Colombia (CVNE, 2008).

La planta consta de un gasificador de 40 kW de fabricación hindú y requirió una inversión inicial de alrededor de 800 millones de pesos, destinados para la infraestructura, equipos, evaluaciones y obras complementarias (Cerdá, 2012).

El proyecto suministraba seis horas de energía en promedio al día y beneficiaba a 48 hogares, para un total de 200 habitantes aproximadamente. No obstante, la planta dejó de funcionar en el 2011 cuando la región se interconectó al sistema de transmisión nacional.

**Figura 12. Planta NECOCLÍ**



Fuente: (Solar, 2010)

## **4. ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA EN BOLIVAR SANTANDER**

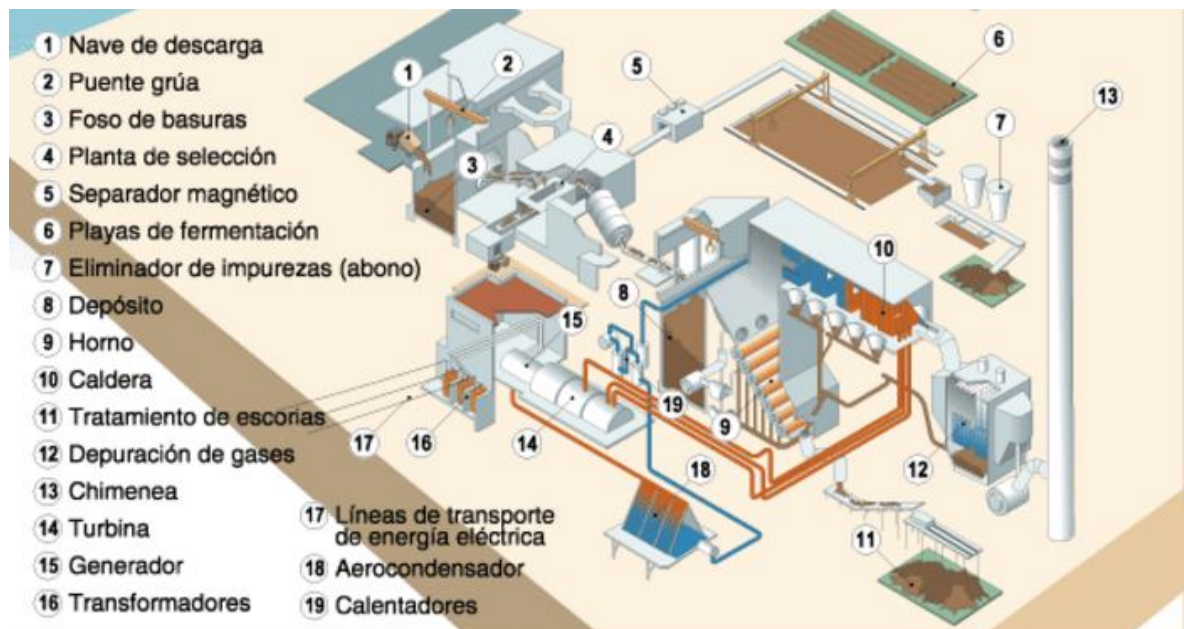
Como se indicó en el CAPÍTULO 2, las principales fuentes de biomasa aprovechables identificadas en el municipio de Bolívar fueron los residuos de poda de mora y los RSU del área urbana. Así mismo, de acuerdo con lo descrito en el CAPÍTULO 3, las tecnologías de generación eléctrica aplicables a estos dos tipos de biomasa son la combustión para los RSU y la gasificación en lecho fijo o fluido para los residuos agrícolas. A continuación, se analizarán en detalle las tecnologías mencionadas haciendo énfasis en los equipos necesarios para el procesamiento de la biomasa.

### **4.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INCINERACION DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS**

La incineración de residuos con aprovechamiento energético es un proceso muy utilizado actualmente en el mundo, esta tecnología consiste, fundamentalmente, en una combustión con generación de vapor y la posterior expansión de este en una turbina convencional acoplada a un generador eléctrico (UNESA, s.f.).

En la siguiente imagen se observa el esquema general de una planta de incineración de (RSU), y los principales equipos que la conforman.

**Figura 14. Esquema de una central incineradora de residuos sólidos urbanos (RSU)**



Fuente (UNESA, s.f.)

Debido a que existen diferentes tipos de residuos se le debe dar un tratamiento adecuado a cada uno de ellos. Algunas de las aplicaciones tecnológicas más utilizadas para el manejo de estos desechos son:

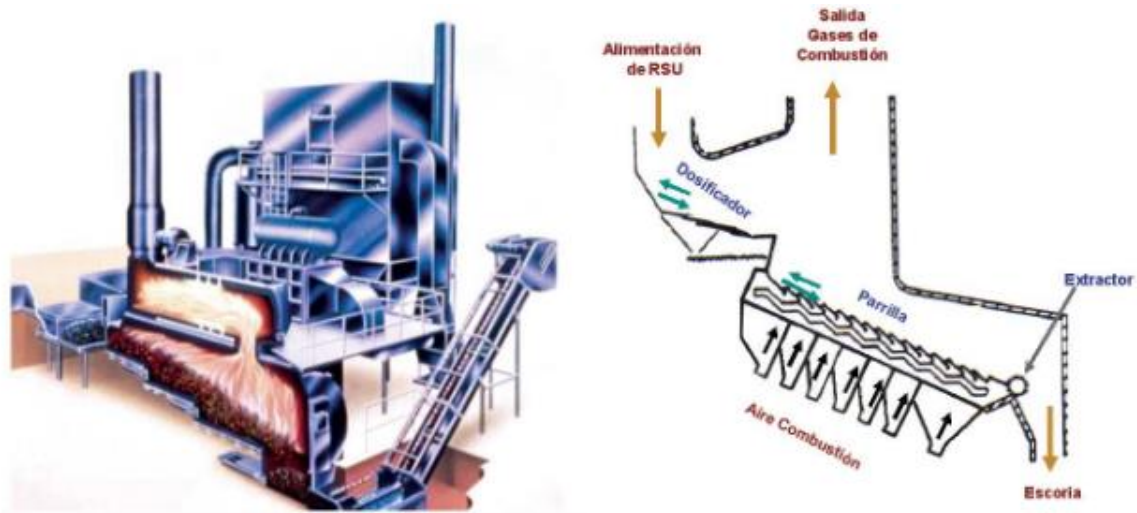
- Hornos de parrilla.
- Hornos rotativos.
- Hornos de lecho fluidizado.

Existen diferencias al momento de seleccionar el horno más adecuado para la incineración de los residuos, esta selección depende de las características de los desechos. Por ejemplo, el horno de lecho fluidizado requiere que los residuos tengan un rango específico de tamaños de partícula, lo que generalmente requeriría de una selección y un tratamiento previo antes de la incineración. En cambio, los hornos de parrilla se suelen utilizar para Residuos sólidos urbanos con

nula o escasa selección previa; y los hornos rotativos son más eficientes en el control de la combustión, pero tienen limitaciones de tamaño (UNESA, s.f.).

A continuación, se menciona la información adecuada del horno de parrilla puesto que es el más adecuado para el caso.

**Figura 13. Horno de parrilla para la incineración de residuos sólidos urbanos**



Fuente (TORRES, 2000)

Las principales funciones que realiza el horno de parrilla son:

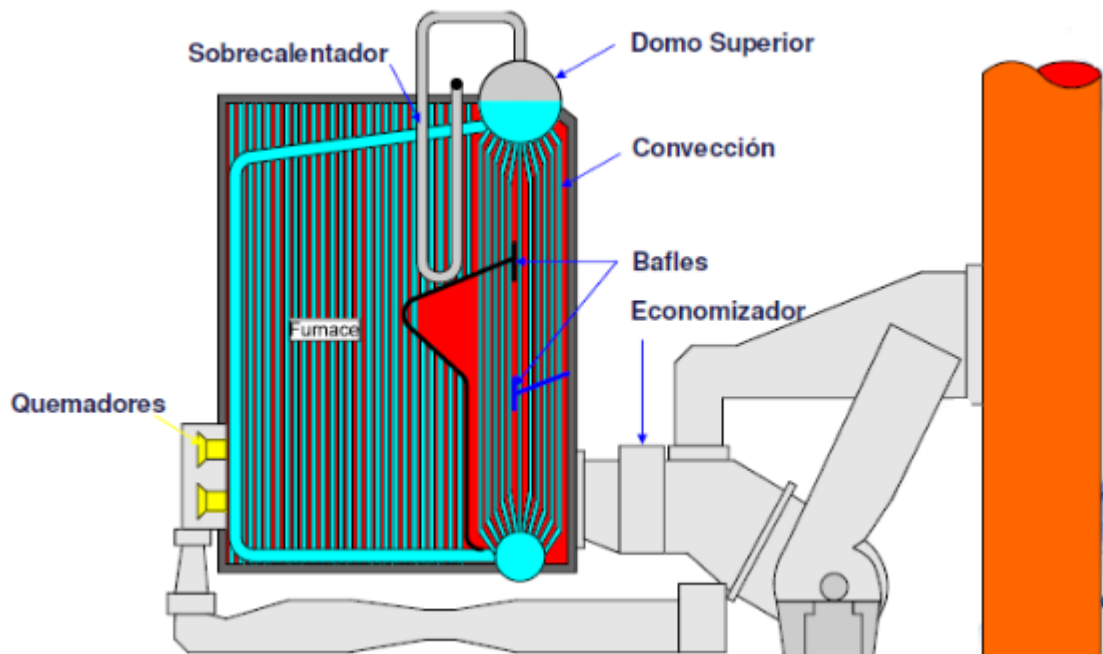
- Transporte de los materiales a incinerar a través del horno
- Carga y aflojamiento de los materiales a incinerar
- Posicionamiento de las zonas de incineración principal en la cámara de incineración, posiblemente en combinación de medidas de control de rendimiento del horno.

Cabe destacar otros equipos que hacen parte el proceso termodinámico y eléctrico de la planta

**4.1.1 Calderas acuotubulares** Para convertir el agua en vapor sobrecalentado es necesario utilizar una caldera la cual se encarga de producir vapor, proveniente de la incineración realizada en el horno de parrilla el cual contiene una cámara de incineración. Para el análisis se optó por la caldera acuotubular este tipo de calderas se utiliza principalmente en centrales eléctricas y algunas aplicaciones industriales, son más seguras y se utilizan principalmente para presiones altas,

“Se construyen para capacidades mayores a 20 toneladas de vapor por hora” (Nelly, s.f.).

**Figura 14. Caldera acuotubular**



Fuente (Nelly, s.f.)

**4.1.2 Turbina de vapor** El funcionamiento básico de una turbina de vapor se puede explicar, como un motor rotativo que convierte la energía de una corriente de un gas o agua en energía mecánica. En la aplicación de la incineración (Aguilar, 2016) afirma que:

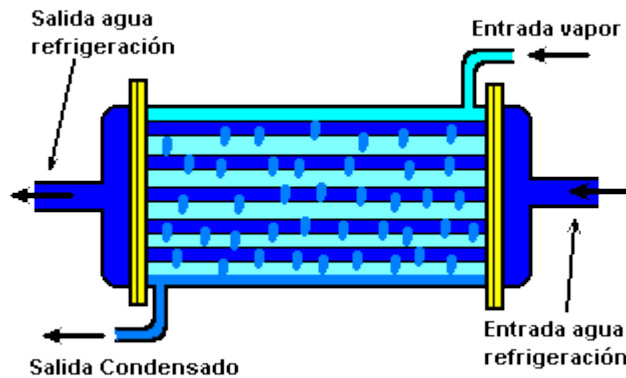
El concepto de este tipo de turbinas, consiste básicamente en un motor térmico cíclico rotativo, donde la combustión es externa y su movimiento se debe al empuje del vapor, quien proporciona la energía mecánica. Los tipos de turbinas existentes de acuerdo a las aplicaciones y necesidades son muy variados, para este caso de estudio se hace mención de las turbinas condensadoras, debido a que son utilizadas generalmente en las plantas de potencia eléctrica. El vapor expulsado por este tipo de turbinas se encuentra parcialmente saturado usualmente con una calidad mayor al 90%, con presiones inferiores a la atmosférica se dirige posteriormente al condensador.

**4.1.3 Generador sincrónico** Los generadores síncronos son máquinas rotativas capaces de transformar energía mecánica en energía eléctrica. (Aguilar, 2016)  
.Define su funcionamiento:

Cuya velocidad de rotación se vincula directamente con la frecuencia de la red de corriente alterna. En la mayoría de las instalaciones eléctricas se emplean con mayor frecuencia los generadores de energía eléctrica, también llamados alternadores. Las máquinas más usadas son las trifásicas, que se encuentran compuestas por tres bobinas en el inducido con ángulos de  $120^\circ$ , las cuales generan tres ondas de tensión en cada bobina, para obtener así la llamada onda trifásica.

**4.1.4 Aerocondensadores** El aerocondensador, es un refrigerador que condensa el vapor inyectando considerable cantidad de agua, esta depende de la diferencia de temperatura entre el vapor y el agua (Aguilar, 2016).

**Figura 15. Aerocondensador de agua**



Fuente (Daza, s.f.) .

**4.1.5 Bombas de impulsión de agua** Según el funcionamiento de la mayoría de tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa para la obtención de energía se necesita la inyección de agua que “debe ser impulsada entre los distintos elementos del ciclo, así como también debe tomar y reingresar el fluido de trabajo al tanque de alimentación. Estas bombas se encargan de proporcionar las características de caudal y presión requeridas durante cada etapa” (Aguilar, 2016).

## **4.2 TECNOLOGÍAS PARA GENERACIÓN A PARTIR DE BIOMASA AGRÍCOLA (PODA DE MORA)**

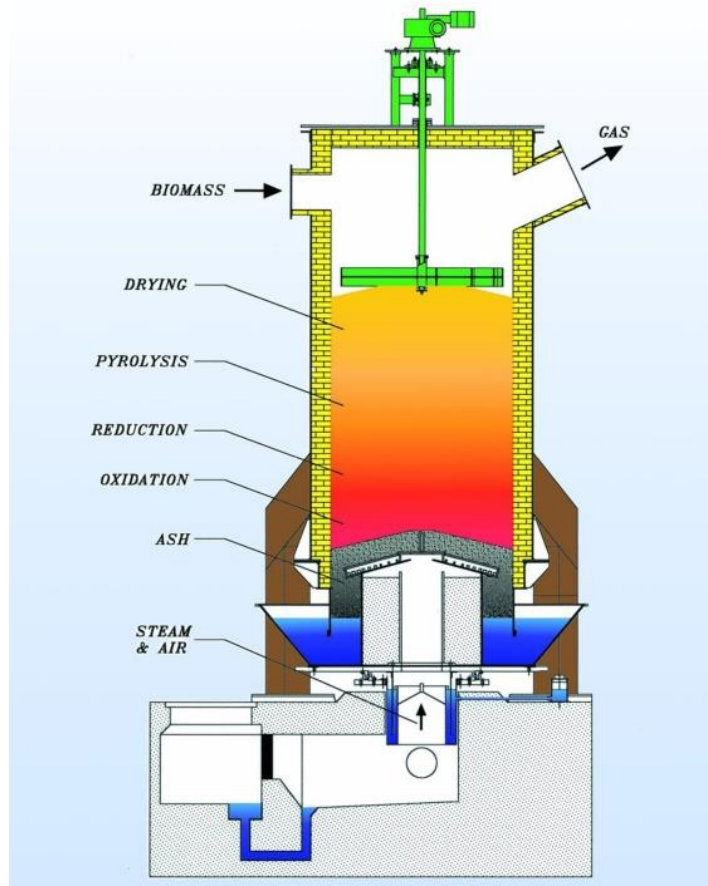
Acorde con las propiedades físico-químicas de la biomasa y los requerimientos técnicos de las distintas tecnologías disponibles, las que presentan mayores ventajas acorde con lo descrito en el CAPÍTULO 3, son los gasificadores de lecho fijo y de lecho fluidizado.

**4.2.1 Gasificadores de lecho fijo** Los principales gasificadores de lecho fijo según el funcionamiento se dividen en:

- Gasificadores en corriente ascendente o contracorriente
  - Gasificadores en corriente descendente o cocorriente
  - Gasificadores en cross-draft
- 
- **GASIFICADORES EN CORRIENTE ASCENDENTE O EN CONTRACORRIENTE**

El tipo más sencillo de gasificador es el gasificador de lecho fijo en contracorriente. En él, la biomasa se alimenta en la parte superior del reactor y se mueve hacia abajo como resultado de su conversión y eliminación de cenizas. El aire se toma en la parte inferior y deja el gas en la parte superior. La biomasa se mueve en contra de la corriente del gas y pasa sucesivamente a través de zonas de: secado, destilación, reducción, y chimenea. En la primera zona, la biomasa se seca. En la zona de destilación, que es la zona de vaporización, se descomponen en gases volátiles y carbón sólido. El calor para la pirolización y el secado se suministra principalmente por el gas productor con flujo ascendente y por la radiación de la zona de chimenea. En la zona de reducción, se producen reacciones (carbonización, dióxido de carbono y vapor de agua) que, al convertir carbono a monóxido de carbono e hidrógeno, se produce el componente principal del gas productor. En la zona de chimenea, el carbón restante se quema proporcionando calor, dióxido de carbono y vapor de agua, para las reacciones que ocurren en la zona de reducción (Zanzi, 2014).

**Figura 16. Gasificador en contracorriente**



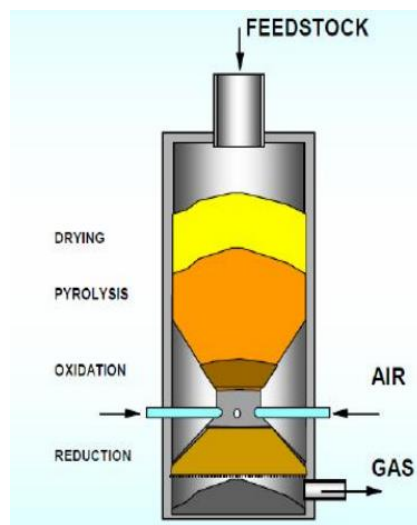
Fuente: (Zanzi, 2014)

- **GASIFICADOR DE CORRIENTE DESCENDENTE O CO-CORRIENTE**

En un reactor de corriente descendente, la biomasa se alimenta en la parte superior, y la entrada de aire se encuentra en la parte superior o en los laterales (como se muestra en la figura 17). La salida de gas está ubicada en la parte inferior del reactor. Las zonas son similares a las del gasificador de corriente ascendente, en diferente orden. La biomasa transita por la zona de secado y se piroliza en la zona de destilación. Estas zonas se calientan principalmente por la radiación de calor (y en parte por convección) de la zona de chimenea, donde se quema una parte del producto en la carbonización. Los gases que se producen en

la pirólisis también pasan a través de esta zona de chimenea. La medida en que los gases de pirólisis se queman en realidad depende del diseño, la materia prima de la biomasa y las habilidades del operador. Después de la zona de oxidación, los gases restantes de pirólisis quemados, el dióxido de carbono de productos de combustión y el vapor de agua, pasan a la zona de reducción donde se forman CO y H<sub>2</sub> (Prando, 2015).

**Figura 17. Gasificador co-corriente**



Fuente: (Prando, 2015)

Por lo tanto, la principal ventaja de un gasificador de corriente descendente es la producción de un gas con bajo contenido de alquitrán adecuado para motores.

En la práctica, sin embargo, un gas libre de alquitrán es rara vez alcanzado durante la vida útil de los equipos. La razón principal parece ser que no todos los gases pasan a través de las zonas más calientes. También su tiempo de residencia en la zona de combustión puede ser demasiado corto. En cada diseño particular, se incluyen otras características que ayudan a darse cuenta de una alta tasa de conversión de los gases de pirólisis.

Este tipo de gasificador se utiliza en aplicaciones de producción de energía que van desde 80 hasta 500 kWe o más.

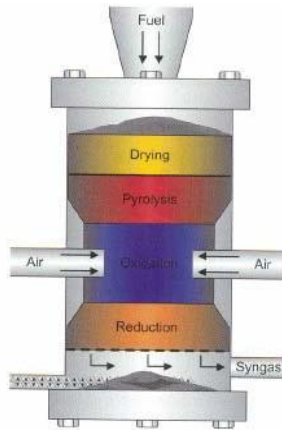
Los inconvenientes del gasificador a corriente descendente pueden resumirse como sigue:

- El gas al pasar por la zona de oxidación se contamina por gran cantidad de pequeñas partículas de ceniza y polvo.
- Las necesidades de combustible son relativamente estrictas; el combustible debe ser de un tamaño uniforme a partir de 4 a 10 cm a fin de no bloquear la garganta y permitir que los gases de pirólisis fluyan hacia abajo y el calor de la zona de chimenea fluya hacia arriba; por lo tanto, la peletización o hacer briquetas de la biomasa es a menudo necesario.
- El contenido de humedad de la biomasa debe ser inferior al 25% (en base húmeda).
- La temperatura relativamente alta de los resultados de los gases de combustión de salida da menor eficiencia a la gasificación.

- **GASIFICADORES CROSS-DRAFT**

Los gasificadores Cross-Draft son adaptados para el uso de carbón vegetal. La gasificación de carbón vegetal da como resultado temperaturas altas (1.500 °C y superiores) en la zona de chimenea, que puede conducir a problemas materiales locales. Las ventajas del sistema radican en la pequeña escala a la que se puede operar. En los países en desarrollo, se utilizan instalaciones de potencia en el eje menores de 10 kWe. Esto es posiblemente debido al tren simple de limpieza del gas (un ciclón y un filtro de lecho).

**Figura 18. Gasificador Cross-Draft**



Fuente: <http://www.inerco.com>

Un inconveniente es la capacidad mínima de alquitrán convertido, necesitando carbón de alta calidad.

- **LOS DESARROLLOS EN GASIFICADORES DE LECHO FIJO**

La mayoría de los gasificadores de corriente descendente tienen una "garganta" en forma de V. La zona de chimenea está en la parte más estrecha de la garganta. El propósito de la garganta es crear una zona de alta temperatura concentrada y la fuerza a través de él hace que los gases de pirólisis rompan el alquitrán. El aire es introducido directamente en esta zona por medio de toberas o bien por medio de una tubería de suministro de aire central o de entrada de aire, situados en las paredes de la garganta. En la elección de un diámetro de garganta, debe lograrse un equilibrio entre: a) la disminución del riesgo de los gases de alquitrán cargados, que se escapan de la zona de oxidación y b) una tasa de flujo óptimo del combustible y las velocidades de gas en la garganta. Esta tasa no debe ser tan alta ya que la ceniza es barrida y se recoge por la corriente de gas, causando alto contenido de polvo.

En los últimos diseños, la gasificación se hace a través de un reactor de doble pared. El gas pobre se alimenta a través del espacio entre las paredes, lo que permite un intercambio de calor entre el gas pobre, el combustible en la pirólisis, y el reactor de la zona de secado. La eficacia de este intercambio de calor se mejora considerablemente con el uso de pequeños diámetros del reactor, que aumentan la superficie de intercambio de calor considerablemente.

En algunos diseños, los gases de pirólisis que se condensan en la portada se drenan a través de una tubería y se recogen en un tanque. Los gases de pirólisis se distribuyen por la parte superior del gasificador, en la zona de combustión y por el agrietado de un reactor separado. Los gases de combustión son alimentados en la zona de chimenea del gasificador y se utilizan para quemar y gasificar el carbón. Los resultados de gases productores son relativamente libres de alquitrán.

- **PROBLEMAS TÉCNICOS Y OPERACIONALES CON GASIFICADORES LECHO-FIJO**

A pesar de los diferentes ingeniosos diseños de gasificadores, todavía no existe un gasificador de lecho fijo que produzca un gas libre de alquitrán. Aunque se muestra una relación de rechazo para cada tipo básico de gasificador, la operación parcial no es satisfactoria para la mayoría de los gasificadores. A continuación, se presentan algunos de los problemas técnicos más comunes dentro de la operación de gasificadores de lecho fijo, según "Energy from Biomass: A review of Combustion and Gasification Technologies":

- **Explosiones.** Las explosiones se pueden producir cuando los gases combustibles se fugan a través de: el sistema de alimentación, el sistema de descarga de cenizas, o cualquier otro punto de fuga. Después de la parada de un gasificador, los gases combustibles permanecerán en el equipo. Si el gasificador se enciende de nuevo, sin ventilación por primera vez del equipo de

aire fresco, los gases combustibles siguen presentes y pueden explotar. Para reducir estos riesgos, los gasificadores deben estar ubicados en habitaciones bien ventiladas o al aire libre. Los operadores deben ser instruidos sobre los riesgos de los equipos de gasificación, especialmente durante el arranque y la parada.

- **Los bloqueos de combustible.** Los bloqueos de combustible pueden ocurrir en la garganta del gasificador. Estos bloqueos son causados por una combinación de propiedades como la morfología, la distribución de tamaño, el contenido de cenizas, el comportamiento de la densidad aparente y, las propiedades de flujo de carbón derivado. El diseño del gasificador debe adaptarse a las propiedades del combustible.
- **Corrosión.** La corrosión puede ser un problema, especialmente en superficies de áreas de alta temperatura del gasificador, como en la garganta. Esta corrosión puede ser causada por la combinación de las altas temperaturas y los contaminantes en el material de alimentación. El diseño debe ser adaptado para bajar la temperatura, o hacer uso de materiales resistentes al calor.
- **La producción de alquitrán.** Es imposible evitar la producción de alquitrán. La producción excesiva de alquitrán puede ser causada por el uso de propiedades de combustible inapropiados tales como morfología, distribución de tamaño, el contenido de humedad y el flujo inapropiado del producto de carbonización. Durante los períodos de carga variable o parcial, la operación puede producir excesos de alquitrán. El diseño de un gasificador debe ser adecuado a las propiedades del combustible, y las plantas deben operar constantemente, tanto como sea posible, preferiblemente bajo condiciones de carga completa.

**4.2.2 Gasificadores de lecho fluidizado** La gasificación de lecho fluidizado fue originalmente desarrollada para superar los problemas de funcionamiento de la

gasificación de lecho fijo de combustibles con alto contenido de cenizas. En comparación con los gasificadores de lecho fijo, la temperatura de gasificación es relativamente baja, de aproximadamente 750 ° a 900 °C. En los gasificadores de lecho fijo, la temperatura en la zona de chimenea puede ser tan alta como 1.200 ° C, y en gasificadores de carbón puede ser de hasta 1.500 °C (Aguilar, 2016).

El combustible se alimenta en un lecho de arena caliente suspendida (burbujeo de lecho fluidizado) o de circulación (lecho fluidizado circulante).

El lecho se comporta como un fluido y se caracteriza por una alta turbulencia. Partículas de combustible se mezclan rápidamente con el material del lecho, lo que resulta en una rápida pirólisis y una cantidad relativamente grande de gases de pirólisis. Debido a las bajas temperaturas, las tasas de conversión de alquitrán no son muy altas (Prando, 2015).

Las ventajas de los reactores de lecho fluidizado en la comparación con reactores de lecho fijo son las siguientes:

- Tamaño y peso reducidos, debido a los tipos de cambio y de reacción de alta temperatura debido a la mezcla intensiva en el lecho.
- La flexibilidad a los cambios en el contenido de humedad, cenizas y otras características de los combustibles; habilidad para tratar con materiales suaves y de grano fino que tienen un alto contenido de cenizas, de baja densidad aparente, o ambos.
- Puntos de fusión relativamente bajos de ceniza debido a las bajas temperaturas de reacción.

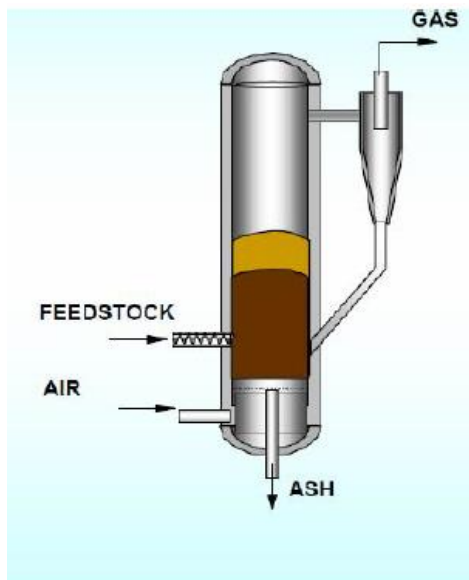
Los inconvenientes son los siguientes:

- Alto contenido de alquitrán y polvo del gas pobre.
- Las altas temperaturas para producir gases dejan metales alcalinos en estado de vapor.

- El consumo incompleto del carbón.
- Operación compleja debido a la necesidad de controlar el suministro de aire y de combustible sólido.
- Necesidad de consumo de energía para la compresión de la corriente de gas.
- El agotamiento de carbono en la circulación de los gasificadores de lecho fluidizado es considerablemente mejor que en lechos fluidizados burbujeantes.
- La flexibilidad en el tamaño de las partículas del combustible no es alta en comparación con la combustión en lecho fluidizado. Para la gasificación, se prefieren tamaños de partícula de combustible relativamente finas.

Un esquema de un gasificador de lecho fluidizado se da en la figura 19. Si la gasificación se realiza con oxígeno puro, el valor calórico del gas productor será mayor debido a la ausencia de nitrógeno (que por supuesto está presente en el aire). Sin embargo, la producción de oxígeno puro es caro, y por lo tanto sólo es factible en operaciones a gran escala, tales como la planta de energía de gasificación de carbón en Buggenum, Países Bajos.

**Figura 19. Gasificador de lecho fluidizado**



Fuente: (Prando, 2015)

- **GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDIZADO PRESURIZADO**

Para la producción de energía en aplicaciones de escala relativamente grande, las turbinas de gas parecen llegar a fuerzas motrices atractivas. Cuando se utiliza en una turbina de gas, el gas productor tiene que ser alimentado en la cámara de combustión a altas presiones (de 10 a 25 bares, dependiendo del diseño de la turbina de gas). Como consecuencia, el gas caliente productor del gasificador atmosférico debe ser enfriado y comprimido, lo que resulta en un alto nivel de consumo de energía interna. Es necesario el enfriamiento del gas debido a: a) la temperatura del gas aumenta la compresión, b) la resistencia a la temperatura de los compresores es limitado y, c) los gases calientes ocupan grandes volúmenes, lo que requiere un trabajo adicional para la compresión (Prando, 2015).

La alternativa de lecho fluidizado presurizado, es para gasificar en condiciones de presión la entrega de gas pobre, a la presión de la cámara de combustión de turbina de gas. Las ventajas de este enfoque son los siguientes (BTG, 1993):

- Bajo nivel de consumo de energía interna
- Diseño compacto que implica bajos costos de inversión específicos
- Disminución de sintonización de cenizas.

Los inconvenientes son los siguientes:

- El proceso de la alimentación de combustible en el gasificador es complejo.
- El enfoque requiere dispositivos de limpieza de gas productor de alta temperatura; esta tecnología está todavía en desarrollo y no probada comercialmente.
- La instalación es compleja y por lo tanto requiere una inversión sustancial para baja capacidad.

Tanto gasificadores presurizados y atmosféricos se utilizan actualmente en los diseños avanzados de gasificación de biomasa.

### 4.3 COMPARACIÓN DE LECHO-FIJO Y GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO

La Tabla 7 resume una serie de importantes parámetros técnicos y operativos para los diferentes sistemas.

**Tabla 4. Aspectos importantes de gasificadores estudiados**

CONCEPTO	CONTRACORRIENTE	COCORRIENTE	FLUIDIZADO
Potencia (kWt)	1000-10.000	100-1.000	>10.000
Hum máx. (%bh)	35	16	15
CO <sub>2</sub> %	10.0	12.9	15.0
CO%	20.0	18.0	15.4
H <sub>2</sub> %	14.0	14.2	14.8
CH <sub>4</sub> %	2.5	1.9	4.2
CO+H <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> %	36.5	34.1	34.4
N <sub>2</sub> %	53.5	53.0	39.6
Partículas g/Nm <sup>3</sup>	0.1-0.5	0.1-1	20-60
Alquitrán g/Nm <sup>3</sup>	50-150	0.5-2	7-10

Fuente: (Prando, 2015)

### 4.4 CARACTERÍSTICAS A TENER EN CUENTA PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS

A fin determinar la tecnología más adecuada, para estudiar la viabilidad del proyecto, se deben tener en cuenta las siguientes características:

- Capacidad instalada
- Humedad de la biomasa
- Eficiencia y especificaciones

## **CAPACIDAD INSTALADA**

La potencia que se puede suministrar según los cálculos del capítulo 2, en comparación a los aspectos necesarios en las tecnologías, es más baja del promedio puesto que la potencia nominal tiene como valor 1,7824 kW. Por capacidad instalada la tecnología más adecuada es la gasificación de lecho fijo en co-corriente, ya que el orden de potencia en la tecnología está en el promedio de 100 a 1000 kWt.

## **HUMEDAD**

El municipio de Bolívar, Santander está ubicado en zona fría del país, por esta razón la propiedad de humedad tiene un índice importante para el aprovechamiento de los residuos de poda de mora; si dichos residuos no tuvieran un pretratamiento como el secado, la tecnología más apropiada sería la gasificación de lecho fijo en contracorriente ya que su flexibilidad con el porcentaje de humedad es el más alta con un valor de aceptación cercano al 35%.

## **EFICIENCIA**

Siendo mínima la potencia nominal que se puede generar, se debe procurar ser lo más eficiente posible en la obtención de energía. En cuanto a la eficiencia en generación de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> para la generación de energía eléctrica, la tecnología con menores pérdidas y mejor aprovechamiento de energía, es la gasificación de lecho fluidizado.

En el siguiente capítulo de este trabajo se estudia y aplica la implementación de la tecnología adecuada según la disponibilidad de biomasa, aspectos económicos y técnicos.

## **5. CAPACIDAD DE GENERACIÓN A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE PODA Y RSU EN BOLIVAR SANTANDER**

En el capítulo anterior se mencionó que la tecnología más utilizada a nivel mundial para la obtención de energía eléctrica a partir de los residuos sólidos urbanos era la combustión, mientras que la gasificación es la mejor opción para residuos agrícolas con bajo porcentaje de humedad. A continuación, se describirá los cálculos para la obtención del potencial de generación a partir de los desechos urbanos, así mismo se seleccionará la planta de gasificación para los residuos agrícolas.

### **5.1 POTENCIAL DE GENERACIÓN CON RESIDUOS SOLIDOS URBANOS (RSU)**

Para el dimensionamiento de la planta de generación con RSU, se debe estimar el potencial de generación acorde con las cantidades de biomasa disponible según lo descrito en el CAPÍTULO 2. Para todos los cálculos que se realizaran a continuación se siguió el procedimiento establecido en el capítulo 3 por (Aguilar, 2016) en el trabajo titulado “Estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento de la biomasa depositada en rellenos sanitarios y su adaptabilidad mediante una micro-red eléctrica dimensionada en un 1 MW”.

Para poder obtener la potencia eléctrica que se puede generar por medio de la incineración de los (RSU) que se producen en el municipio de bolívar, hay que realizar el siguiente procedimiento. Se calcula la cantidad de residuos que se podrían producir en el municipio, posteriormente se calcula el poder calorífico inferior (PCI), de los (RSU) con tratamiento previo, teniendo en cuenta la humedad

y la composición química de los residuos con características de biotransformación. Después se analiza el ciclo de vapor (ciclo Rankine) donde se analizan las entalpías halladas en la turbina, precalentador y la caldera; también se analiza el caudal de extracciones del ciclo de vapor en el precalentador donde se realiza un balance másico y un balance energético. Analizados estos datos se procede a calcular el caudal del vapor generado por medio de la fórmula  $\eta_{Horno - Caldera}$ . Una vez obtenido este valor se procede a calcular la potencia en la turbina y posteriormente la potencia generada por medio de la ecuación de la eficiencia de la turbina.

**5.1.1 Cantidad de residuos sólidos urbanos** Para estimar la cantidad de RSU per cápita producida en el municipio de Bolívar, se puede recurrir a las estadísticas realizadas con poblaciones similares, como es el caso de los corregimientos pertenecientes al área metropolitana de Bucaramanga. En diciembre de 2004 el AMB realizó un estudio detallado para aquellos sectores donde la población se encuentra relativamente concentrada en caseríos relativamente alejados de los principales centros urbanos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla (Alcaldía de Bucaramanga, 2015).

**Tabla 5. Numero de usuarios por sector analizado**

SECTOR	MUNICIPIO	USUARIOS	PCC/USUARIO (ton/us/mes)
Vijagual	Bucaramanga	30	0,029
Km.9 - km. 22	Floridablanca	128	0,045
Ruitoque bajo		80	0,055
Acapulco	Girón	574	0,046
Chocoita		110	0,037
Bocas		247	0,038
Guatiguará	Piedecuesta	145	0,046
San Francisco Bajo		50	0,023
TOTAL		1.364	0,047

Fuente: (Alcaldía de Bucaramanga, 2015)

La tabla 5 muestra los sectores analizados (corregimientos o caseríos) del área metropolitana con mayor cantidad de familias concentradas, siendo el corregimiento de Acapulco del municipio de Girón el que tiene mayor población (usuarios). Allí cada usuario (que en promedio consta de 4 personas) produce en promedio 0,046 toneladas de residuos sólidos mensualmente. En promedio, la estadística arrojó que, considerando todos los asentamientos pertenecientes al área metropolitana de Bucaramanga, se tenían para la fecha alrededor de 1364 usuarios (familias) donde cada uno producía alrededor de 0.047 toneladas de RSU mensualmente (Alcaldía de Bucaramanga, 2015).

A partir de la información indicada en la tabla 1, se puede hacer una estimación de la cantidad de RSU en kg/h producido por habitante, en la zona urbana del municipio de Bolívar, Santander.

Según la alcaldía del municipio de Bolívar Santander y con la proyección del DANE, la población para el 2015 era de 12351 habitantes, donde el 89.3 % corresponde a personas del sector rural y el 10,67% corresponde a personas del casco urbano.

Teniendo en cuenta el número de personas que conforman un usuario, que habitan el municipio de Bolívar Santander, se calcula el índice de RSU que produce una persona al día, de la siguiente manera:

$$0.047 \frac{\text{ton}}{\text{usuario mes}} * \left( \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} \right) * \left( \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \right) * \left( \frac{1 \text{ usuarios}}{4 \text{ personas}} \right) * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}}$$
$$= 0,0164 \frac{\text{kg}}{\text{persona hora}}$$

Con este índice y con el número de habitantes del área urbana, se halla la cantidad de RSU generados en el área urbana del municipio.

**12351 habitantes \* 0,1067 = 1318 habitantes del sector urbano**

$$1318 \text{ personas} * 0,0164 \frac{\text{kg}}{\text{persona hora}} = 21,62 \frac{\text{kg}}{\text{hora}}$$

Es decir que, considerando para los habitantes del área urbana de Bolívar, unos hábitos de consumo similares a los que se presentan en los caseríos pertenecientes a la zona metropolitana de Bucaramanga, la cantidad de residuos generados por habitante, se estima en 21,62 kg/h.

Otra alternativa para estimar el índice de RSU que produce una persona al día en el casco urbano del municipio de Bolívar, es tomar como referencia los datos del relleno sanitario “El Carrasco” en donde se disponen los desechos recolectados en las áreas urbanas de 11 municipios de Santander. Según datos de la EMAB, para el año 2014, la cantidad de residuos recolectados en el relleno fue de 328.351 toneladas los cuales fueron generados por una población estimada de 1.119.111 personas (Aguilar, 2016).

Cabe resaltar que este número de personas corresponden al área urbana de los respectivos 11 municipios, aclarando que solo en los cascos urbanos se cuenta con un sistema de recolección de basuras.

Determinado el número de habitantes que producen los desechos depositados en “El Carrasco” y definida la cantidad de la misma que ingresa por año a este depósito sanitario, se logra calcular el índice que produce cada persona en kg/h.

$$328351 \frac{\text{toneladas}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tonelada}} = 37483,04 \frac{\text{kg}}{\text{hora}}$$

$$\frac{37483,04 \frac{\text{kg}}{\text{hora}}}{1119111 \text{ personas}} = 0,0334 \frac{\text{kg}}{\text{persona hora}}$$

Es decir, que en promedio cada habitante de estas zonas ampliamente urbanizadas, produce alrededor de 0.0334 kg/h de residuos.

De esta forma, tomando un índice de RSU de 0.0334 kg/h por habitante y considerando el número de habitantes del área urbana de Bolívar, se producirán en promedio 44 kg/h de residuos, como se indica en el siguiente cálculo:

$$1318 \text{ personas} * 0,0334 \frac{\text{kg}}{\text{persona hora}} = 44 \frac{\text{kg}}{\text{hora}}$$

Los resultados hallados anteriormente también los podemos expresar en toneladas año.

$$21,62 \frac{\text{kg}}{\text{hora}} * \frac{1 \text{ tonelada}}{1000 \text{ kg}} * \frac{8760 \text{ horas}}{1 \text{ año}} = 189 \frac{\text{toneladas}}{\text{año}}$$

$$44 \frac{\text{kg}}{\text{hora}} * \frac{1 \text{ tonelada}}{1000 \text{ kg}} * \frac{8760 \text{ horas}}{1 \text{ año}} = 385 \frac{\text{toneladas}}{\text{año}}$$

Los resultados muestran que utilizando el factor dado para una población semiurbana como son los corregimientos aledaños al área metropolitana de Bucaramanga, se obtiene para el municipio de Bolívar en su área urbana, una cantidad de 21,62 kg/h por habitante, mientras que, si el factor usado es el correspondiente a las áreas urbanas que depositan los residuos en el Carrasco, los resultados son de 44 kg/h, que equivale al doble de una población semiurbana.

Por otro lado, es necesario considerar que, de la cantidad total de residuos sólidos urbanos producidos, tienen una capacidad de biotransformación cercana al 64%, es decir que pueden utilizarse en el proceso de incineración para recuperación energética.

**Tabla 6. Caracterización de los residuos que ingresan al carrasco**

<b>RESIDUOS CON CARACTERISTICAS FISICAS DE BIOTRANSFORMACION</b>		
<b>COMPONENTES DEL RESIDUO</b>	<b>TOTAL(Kg)</b>	<b>%</b>
Residuos de comida	1,694	50,3
Papel y cartón sucios o pequeñas	0,007	0,2
Madera forestales aserrín	0,261	7,8
Carbón cenizas escorias	0,083	2,5
Pañales desechables	0,099	2,9
Huesos, vísceras, cueros	0	0
<b>TOTAL BIOTRANSFORMACION</b>	<b>2,143</b>	<b>63,7</b>

Fuente: (Aguilar, 2016)

Con la información anterior, se puede obtener la cantidad de residuos urbanos disponibles para generación de energía en el municipio de Bolívar Santander. Los resultados muestran que dicha cantidad puede variar entre 14 kg/h a 28 kg/h.

**5.1.2 Calculo del poder calorífico inferior PCI** Se define el poder calorífico como el valor absoluto de la entalpía de combustión, lo cual significa, la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo. Es muy importante conocer entre el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI). En el poder calorífico superior se considera que el agua de los productos se encuentra en la fase líquida, mientras que en el poder calorífico inferior se considera vapor.

En el caso del PCS, se puede aprovechar el calor de la condensación, por lo cual aumentará el rendimiento de la planta si se utilizara, pero para el análisis se hizo estudio de los cálculos con el PCI, puesto que, para aprovechar el calor de la

condensación, solamente se puede usar con combustibles totalmente libres de azufre (como el gas natural), para evitar condensaciones acidas. Para conocer el poder calorífico de los residuos es necesario conocer la composición física y química de los residuos, así como el contenido de humedad.

En las siguientes tablas se mostrarán los porcentajes de humedad de cada uno de los componentes principales que se encuentran en residuos sólidos urbanos, así como también su composición química.

- **HUMEDAD DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS**

En un estudio realizado por la Universidad industrial de Santander, y empresas públicas de Bucaramanga en 1996 para la recuperación del relleno sanitario el Carrasco, se realizó un análisis sobre las características de los residuos sólidos que ingresaban en su momento al relleno sanitario y se establecieron los porcentajes de los materiales más representativos. En la tabla que se muestra a continuación se encuentran los porcentajes de humedad de cada uno de los componentes principales que se encuentran en los residuos sólidos urbanos. Estos datos fueron adaptados de la enciclopedia del medio ambiente urbano.

**Tabla 7. Humedad de los componentes principales que se encuentran en los residuos sólidos urbanos**

<b>HUMEDAD RESIDUOS SOLIDOS URBANOS</b>		
<b>COMPONENTES</b>	<b>HUMEDAD EN %</b>	
	<b>Sin mezclar</b>	<b>Mezclados</b>
<b>Orgánicos</b>	68	65
<b>Papel y Cartón</b>	12	24
<b>Plásticos</b>	1	2
<b>Madera</b>	20	24
<b>Textiles</b>	12	19
<b>Vidrio</b>	2	3
<b>Metales</b>	2	2

Fuente (Aguilar, 2016)

Con base en los porcentajes de humedad mostrados en la tabla anterior, se calculan los valores de la caracterización de los residuos sólidos urbanos en base húmeda y en base seca, como se muestra a continuación.

**Tabla 8. Caracterización de los residuos sólidos urbanos en base humedad y en base seca**

TIPO DE RESIDUO	BASE (KG)	HUMEDAD (%)	BASE SECA (KG)
Material orgánico	56	70	16,8
Papel/cartón	8,8	11	7,83
Plástico	19,4	2	19,01
Vidrio	4,2	2	4,12
Metales	2,4	3	2,33
Textiles	4,6	10	4,14
Cuero	1,9	10	1,71
Residuos Sanitarios	2,7	20	2,16
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>41,9</b>	<b>58,1</b>

Fuente: (Aguilar, 2016)

Para conocer la composición química de los residuos sólidos urbanos, se toma como referencia la siguiente tabla, en donde se muestra la composición química de cada uno de los componentes que conforman los RSU.

**Tabla 9. Composición química de los residuos sólidos urbanos**

RESIDUOS	base seca	Carbono (C)	Hidrogeno (H)	Oxigeno (O)	Nitrógeno (N)	Azufre (S)	Cenizas
Material orgánico	16,8	8,064	1,0752	6,3168	0,4368	0,0672	0,84
Papel / Cartón	7,83	3,4461	0,4699	3,4931	0,0235	0,0157	0,4699

RESIDUOS	base seca	Carbono (C)	Hidrogeno (H)	Oxigeno (O)	Nitrógeno (N)	Azufre (S)	Cenizas
Plástico	19,01	11,4072	1,3689	4,3347	-----	-----	1,9012
Vidrio	4,12	0,0206	0,0041	0,0165	0,0037	-----	4,0707
Metales	2,33	0,1048	0,014	0,1001	0,0021	-----	2,1068
Textiles	4,14	2,277	0,2732	1,2917	0,1904	0,0062	0,1035
Cuero	1,71	1,026	0,1368	0,1984	0,171	0,0068	0,171
Residuos sanitarios	2,16	0,5681	0,0648	0,0432	0,0108	0,0043	1,4688
<b>TOTAL %</b>	<b>58,1</b>	<b>26,9137</b>	<b>3,4069</b>	<b>15,7944</b>	<b>0,8383</b>	<b>0,1002</b>	<b>11,132</b>

Fuente (Aguilar, 2016)

Con las cantidades de los componentes químicos y el porcentaje de humedad de los residuos sólidos urbanos podemos hallar el poder calorífico PCI de la mezcla de residuos, por medio de la formula Doulong:

- **FORMULA DE DOULONG**

$$PCS \left( \frac{kcal}{kg} \right) = 80,8 * (%C) + 344 * [(%H2) - ((%O2)/8)] + 22,2 * (%S) + 5,56 * (%N2)$$

$$PCS \left( \frac{kcal}{kg} \right) = 80,8 * (26,9) + 344 * [(3,4) - ((15,8)/8)] + 22,2 * (0,1) + 5,56 * (0,83)$$

$$PCS = 2674,3 \left( \frac{kcal}{kg} \right)$$

$$PCI \left( \frac{kcal}{kg} \right) = PCS - 5,97 * [(%H2O) + 9 * (%H2)]$$

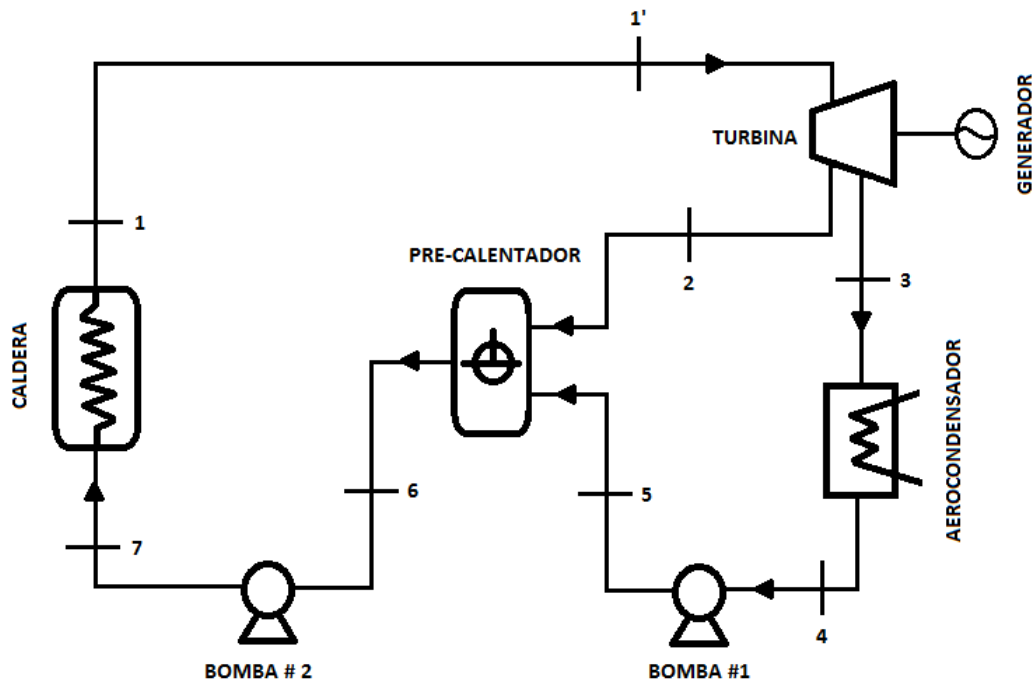
$$PCI \left( \frac{kcal}{kg} \right) = PCS - 5,97 * [(41,9) + 9 * (3,4)]$$

$$PCI = 2241 \left( \frac{kcal}{kg} \right)$$

**5.1.3 Ciclo de vapor** El ciclo de vapor, es un ciclo térmico que trabaja con el agua como fluido, en el cual se aprovecha el calor de los gases generados en la combustión de los residuos. Permite que mediante el intercambio de calor que se produce en la caldera, el agua se convierta en vapor sobrecalentado y pase a través de una turbina de vapor que se encuentra acoplada a un generador, produciendo energía eléctrica.

**5.1.4 Esquema del ciclo de vapor** El ciclo utilizado para la recuperación de energía, es un ciclo Rankine con regeneración y con un pre-calentador abierto.

**Figura 20. Ciclo Rankine con regeneración con un precalentador**



Fuente: (Aguilar, 2016)

### 5.1.5 Cálculos del ciclo de vapor

Punto 1. Valores de la Salida de la caldera.

Punto 2. Extracción real de la turbina.

Punto 3. Salida real de la turbina.

Punto 5. Entrada al precalentador.

Punto 6. Salida del precalentador.

Punto 7. Entrada a la caldera.

En la siguiente tabla se resumen todos los valores calculados del ciclo de vapor, donde los puntos corresponden a los números del esquema del ciclo Rankine de la figura 20.

**Tabla 10. Valores del ciclo Rankine**

VARIABLES	PUNTOS CICLO RANKINE					
	1	2	3	5	6	7
T[°C]	410	156,03	60,06	60,06	140	140
P[bar]	40	4,15	0,2	4,15	4,15	40
H[kJ/kg]	3237,8	2764,64	2373,15	251,95	610,64	615,82

Fuente: (Aguilar, 2016)

**5.1.6 Caudal del vapor generado** Para conocer el caudal de vapor generado en el ciclo de vapor habrá que aplicar la fórmula del rendimiento del conjunto horno-caldera (Aguilar, 2016).

$$\eta_{\text{Horno - Caldera}} = \frac{w_{\text{salida\_caldera}}}{w_{\text{entrada\_caldera}}}$$

$$\eta_{\text{Horno - Caldera}} = \frac{\dot{m}_{\text{Vapor}} * (h_1 - h_7)}{\dot{m}_{\text{RSU}} * \text{PCI} + \text{Waire\_primario} + \text{Waire\_secundario}}$$

Despejando de la formula obtenemos el flujo de vapor:

$$\dot{m}_{\text{Vapor}} = \frac{\eta_{\text{Horno - Caldera}} * (\dot{m}_{\text{RSU}} * \text{PCI} + W_{\text{aireprimario}} + W_{\text{airesecundario}})}{(h_1 - h_7)}$$

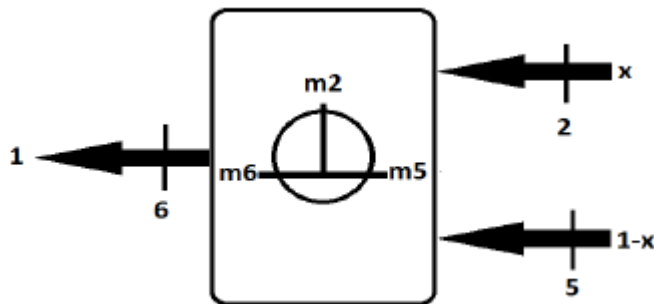
Dónde:

- El rendimiento del horno caldera ( $\eta_{\text{Horno-Caldera}}$ ), es del 80 %
- $W_{\text{aire\_primario}}=945,80 \text{ KW}$
- $W_{\text{aire\_secundario}}=756,64 \text{ KW}$

**5.1.7 Caudal de extracciones del ciclo de vapor** Para calcular el valor del caudal de la extracción del ciclo de vapor será necesario plantear el balance de masa en el pre-calentador.

El esquema del pre-calentador se muestra a continuación:

**Figura 21. Pre calentador**



Fuente: (Aguilar, 2016).

Balance másico:

- $m_6 = m_2 + m_5$

Balance energético:

$$- [h6 * 1] = [h2 * x] + [h5(1 - x)]$$

Despejando x de la ecuación:

$$x = \frac{h6 - h5}{h2 - h5} = 0.1425$$

**5.1.8 Potencia en la turbina** La potencia en la turbina vendrá dada por la expresión:

$$P_{turbina} = \dot{m}_{Vapor} * \frac{1 \text{ h}}{3600} * [(h1 - h2) + (1 - x) \cdot (h2 - h3)]$$

**5.1.9 Energía posible a producir con la cantidad de residuos sólidos urbanos en el municipio de Bolívar Santander** Podemos determinar la cantidad de potencia que se puede producir con la cantidad de residuos sólidos urbanos en el municipio de bolívar Santander, para este cálculo utilizamos la formula.

$$\eta_{Horno - Caldera} = \frac{w_{salida\_caldera}}{w_{entrada\_caldera}} = \frac{\dot{m}_{Vapor} * (h1 - h7)}{m_{RSU} * PCI + W_{aire\_primario} + W_{aire\_secundario}}$$

De donde se conoce el rendimiento del horno caldera que es del 80 %, y la cantidad de residuos sólidos urbanos con propiedad de biotransformación, también conocemos el poder calorífico inferior y la cantidad de aire primario y secundario a suministrar, los datos que conocemos son los siguientes (Aguilar, 2016).

$$h1 = 3237,8 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$h7 = 615,82 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$W_{aire\_primario} = 945,8 \text{ kW}$$

$$W_{aire\_secundario} = 756,64 \text{ kW}$$

$$PCI = 2241 \frac{kcal}{kg}$$

$$MRSU = 28,02 \left( \frac{kg}{h} \right)$$

Conociendo estos datos y por medio de la formula anterior podemos calcular la cantidad de flujo de vapor

$$\dot{m}_{Vapor} = 19,67 \frac{Kg}{hora}$$

Con el caudal de vapor hallado podemos calcular la potencia en la turbina por medio de la siguiente formula.

$$P_{turbina} = \dot{m}_{Vapor} * \frac{1 \text{ h}}{3600} * [(h1 - h2) + (1 - x) \cdot (h2 - h3)]$$

$$P_{turbina} = 4,4 \text{ (kW)}$$

Con la potencia hallada en la turbina podemos hallar la potencia que se podría generar con la cantidad de residuos sólidos urbanos que se producen en el

municipio de Bolívar Santander, este cálculo lo realizamos por medio de la siguiente formula.

$$\eta_{Turbina} = \frac{P_{GENERADA}}{P_{TURBINA}} * 100$$

Y suponiendo una eficiencia de la turbina del 95%.

$$P_{GENERADA} = 4,18 (kW)$$

Energía que se pudiera obtener en un año

$$E_{GENERADA} = 3010 \frac{kWh}{mes}$$

**5.1.10 Aspectos económicos biomasa urbana** “La incineración de residuos sólidos urbanos es la tecnología más implementada a nivel mundial con más de 1500 plantas operando. Esta es una tecnología probada y aprobada, que es discutida por grupos ambientalistas sin fundamento técnico según la INTI”.

En Holanda opera la planta incineradora más grande del mundo procesa 1.606.000 de toneladas de residuos al año (4.400 ton/día) y genera 125 MW por hora. En este país consideran que a la pirolisis y la gasificación todavía están en experimentación y no las recomiendan para tratar residuos urbanos”. “Creen que lo mejor es la incineración con hornos horizontales con bandejas o parrillas, para los holandeses, las plantas de este tipo son viables son a partir 250 toneladas de basura por día (INTI, 2011).

Después de realizados los respectivos cálculos con los residuos sólidos urbanos que se producen por día en el casco urbano del municipio de bolívar Santander, podemos establecer que la potencia que se lograría producir es muy pequeña, e

implementar un proyecto de combustión de biomasa para una potencia tan pequeña no es viable económicamente. Una solución alternativa sería acumular los desechos en un centro de acopio no solo de Bolívar sino de otros municipios aledaños y poder obtener la cantidad de desechos necesarios para la generación de energía y así poder garantizar que el proyecto sea viable. O la implementación de una planta que acepte los dos tipos de biomasa de una manera eficiente, aunque esta tecnología aún está en estudio por países con un desarrollo tecnológico más considerable.

## 5.2 POTENCIAL DE GENERACIÓN CON RESIDUOS AGRÍCOLAS

A fin de obtener el potencial total de biomasa disponible se toma en cuenta el 75% de la biomasa por propiedades de humedad, a continuación, se hace el cálculo del potencial energético de los residuos de poda:

$$P_b = PE * PC$$

$P_b$ : Potencial energético bruto en MWh/año de un cultivo de un residuo de cosecha o agroindustrial

$PE$ : Fracción del producto energético ton/año

$PC$ : Poder calorífico del producto energético de interés en MWh/año

Reemplazando las variables con los valores iniciales obtenidas, tenemos:

$$PE = \left( 400 \frac{\text{ton}}{15 \text{ días}} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} * 3 \right) * \left( 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} \right) * (75\%) = 21600 \text{ toneladas/año}$$

Se multiplica por el factor de 3 ya que las 400 toneladas son de una muestra de 100 has, habiendo 300 has en total.

El poder calorífico de los residuos de poda de moras se obtuvo de estudios predios realizados por la Escuela de Ingeniería Química de la UIS, en donde también se analizaron otros cultivos como se observa en la siguiente tabla (Johana Mejía González, 2013).

**Tabla 11. Potencial energético (PE) para las biomasas residuales de cinco cultivos representativos de Santander**

Cultivo	Residuo	Oferta residuo [t/año]	PCI [kJ/kg]	(PE) residuo [TJ/año]	PE CULLTIVO [TJ/año]
CEBOLLA JUNCA	Hojas	10286,12	13918,81	25,02	54,35
	Cebolla descarte	6991,1	14694,8	29,34	
PAPA	Cáscara	12971,77	14111,28	32,78	193,99
	Hojas y tallos	57582,34	13463,27	65,27	
	Papa descarte	26881,72	14073,44	95,94	
YUCA	Cáscara	1523,55	13901,54	6,47	168,03
	Yuca descarte	7569,33	14321,89	39,06	
	Hojas	3330,51	16577,76	33,25	
	Tallos	17787,93	15688,14	89,24	
PAPAYA	Cáscara y semillas	2916,53	14528,5	6,75	8,49
	Papaya descarte	569,22	13771,47	1,29	
	Hojas y tallos	155,75	13633,1	0,45	
MORA	Corona, corazón y semillas	4322,24	18804,44	13,49	442,42
	Mora descarte	5213,46	15626,75	13,10	
	Tallos y hojas	34756,42	16868,57	415,83	

Fuente: (Johana Mejía González, 2013)

$$PC = 16868,57 \frac{kJ}{kg}$$

Con este potencial y los datos anteriormente mencionados hallamos el potencial energético bruto. Esta tiene como potencial energético bruto:

$$P_b = 21600 \frac{ton}{año} * \left( 16868,57 \frac{kJ}{kg} * \frac{1 MWh}{3,6 * 10^6 kJ} * \frac{1000 kg}{1 ton} \right)$$

$$P_b = 135 \text{ GWh/año} = 11,2 \text{ GWh/mes} = 15,6 \text{ MWh/hora}$$

Por lo tanto, se concluye que el potencial energético de los residuos de mora de Bolívar es  $11,2 \text{ GWh/mes}$ . Este dato servirá para plantear cuál es la tecnología de generación que permitirá el mejor aprovechamiento de la biomasa disponible.

A partir de la información suministrada y los cálculos hallados se puede estimar una generación de energía por hora por encima de los 4 MWh, puesto que la eficiencia del equipo gasificador está en un aproximado del 30%, por lo tanto, se debe hacer una búsqueda del grupo electrógeno con una potencia nominal entre 5-10 MW puesto que se recomienda no trabajar las máquinas las 24 horas. Para ampliar la capacidad de generación se deben aceptar varios tipos de cultivo y para que la máquina los acepte, se debe usar una máquina peletizadora. La mejor alternativa en tecnología con esta máquina es la gasificación con lecho fluidizado.

**5.2.1 Grupo electrógeno** Se realizó la búsqueda de gasificadores de la capacidad específica para que los residuos disponibles se puedan aprovechar. Algunas plantas encontradas son:

- **GASIFICADOR SHANDONG LVHUAN POWER EQUIPMENT CO, LTD.**

**Figura 22. Gasificador Shandong Lvhuan**



**Modelo:** LHBMG20-200

**Precio:** US \$10.000

**Potencia Nominal:** 200 kW - 5 MW

**Fuente biomasa:** madera

**Humedad aceptada:** 90%

- **GASIFICADOR QINGDAO HUANHAI TONGDA MACHINERY CO., LTD.**

**Figura 23. Gasificador Qingdao Huanhai**



**Modelo:** LHBMG20-200

**Precio:** US \$10.000

**Potencia Nominal:** 200 kW - 5 MW

**Humedad aceptada:** 18%

**Tecnología:** Lecho fluidizado

**Necesario:** Pellets

- **GASIFICADOR WESTITAN**

**Figura 24. Gasificador Westitan**



**Precio:** US \$ 2000-400000

**Potencia:** 10 kW-10 MW

**Fuente:** Biomasa peletizada

**Humedad:**20%

**Modelo:** KX

Acorde con las opciones encontradas, el equipo que más se adapta a las características de la biomasa disponible, es el **WESTITAN** modelo **KX** con lecho fluidizado como mecanismo de gasificación, sin embargo, estos equipos requieren de biomasa peletizada, por lo que es necesario considerar adicionalmente una máquina peletizadora.

### **5.3 ASPECTOS TÉCNICOS**

En esta etapa de la investigación se proponen unas mejoras técnicas y observaciones para el cuidado y funcionamiento óptimo del gasificador (PADILLA, 2015).

- **Tratamiento de gas**

Antes de que el gas pobre puede ser usado en un motor de gas o turbina, debe ser enfriado y limpiado de alquitranes, metales alcalinos, y polvo. El alquitrán puede condensarse en las válvulas y accesorios, lo que dificulta la capacidad de las válvulas para funcionar correctamente, mientras que los metales alcalinos, el polvo y alquitranes provocan la corrosión y la erosión de las paredes del cilindro y los pistones. Cuando se utiliza el gas en una aplicación de calor, los requisitos para la calidad del gas no son estrictas, especialmente cuando el gas se mantiene en alto

Las temperaturas durante el transporte al quemador (esto evita que el alquitrán y metales alcalinos se condense).

- **La eliminación de alquitrán**

La forma clásica para eliminar los alquitranes es para enfriar el gas, que hace que los alquitranes se condensen. Un condensador puede ser construido a partir de tubos de ancho y se enfrió en el exterior por el aire circundante. Cuando se hace esto, los alquitranes se condensan en las paredes de los tubos y se pueden drenar fuera en la parte inferior. Este tipo de condensador de alquitrán es bastante grande para la cantidad tratada y por lo tanto no es adecuado para el tratamiento de grandes volúmenes de gas.

Enfriar el gas por pulverización de agua en la corriente de gas con un lavador venturi hace que los alquitranes se condensen en las gotitas de agua. La eficacia de la eliminación de alquitrán puede ser controlado por el ajuste de la caída de presión en la boquilla de pulverización, lo que influye tamaños de gota de la pulverización de agua. Lechos de relleno humidificado se aplican también a aumentar la superficie de enfriamiento en un dispositivo de alquitrán de condensación. El material del lecho puede consistir en aros especialmente diseñados u otras formas, pero también podría consistir, por ejemplo, de fibras de coco simples o pelotas de ping-pong, incluso.

En los sistemas de eliminación de alquitrán refrigerados por agua directos, algo del polvo, HC1, óxidos de azufre, y dependiendo de la temperatura en los metales de condensador-álcali también se eliminan por el agua.

Un inconveniente importante de los sistemas directos refrigerados por agua es la corriente de aguas residuales contaminadas con alquitrán, que necesita tratamiento antes de su eliminación. Si esta corriente de las aguas residuales se eliminan sin limpieza, causará graves daños ambientales.

Grietas en un lecho de carbón o un catalizador tal como níquel o dolomita a altas temperaturas (600 ° a 1000 ° C) de alquitrán puede ser una alternativa a los sistemas de limpieza de gas húmedo. En tales dispositivos, alquitranes pesados en el gas productor están agrietadas en gases ligeros, combustibles que no se condensan a las temperaturas normales de funcionamiento de un motor de gas. Sin embargo, tales sistemas de alquitrán de craqueo se encuentran todavía en desarrollo y por lo tanto aún no están disponibles comercialmente.

- **Eliminación del polvo**

Equipo de eliminación de polvo para los gases de combustión de combustión tales como ciclones, filtros de bolsa, precipitadores electrostáticos y también se puede utilizar para la limpieza de gas productor. Dependiendo del procesamiento aguas arriba del gas pobre, el tejido de los filtros de bolsa podría estar tapadas por los alquitranes y debe ser reemplazado periódicamente. Una alternativa puede ser filtros de cerámica, que tienen una alta temperatura y resistencia química. Un inconveniente de la cerámica es su sensibilidad a diferentes temperaturas en diferentes lugares de un mismo objeto. Tales variaciones pueden ocurrir como resultado de cambios rápidos en la carga de calor.

#### **5.4 ASPECTOS ECONÓMICOS**

El estudio a realizar sobre la metodología para la estimación de la factibilidad en costo, de los sistemas de energía renovable (biomasa), se hará con aproximaciones según los datos obtenidos de la alternativa planteada. Hay que tener en cuenta que estas tecnologías utilizadas para la obtención de energía eléctrica, por medio de recursos renovables tienen costos de inversión más elevados que las tecnologías convencionales, pero tienen la ventaja de emplear recursos energéticos renovables de la localidad por lo que presentan bajos consumos de combustibles fósiles y de ser independiente de su suministro.

Los costos que se considerarán son los que corresponden a: pre-inversión, inversión, administración, operación y mantenimiento (CORPOEMA-CREG, 2012).

**5.4.1 Inversión inicial biomasa agrícola** Se estimó la inversión inicial como lo muestra la siguiente tabla.

**Tabla 12. Costos gasificador (pesos colombianos)**

<b>Costo de construcción centro de acopio</b>	-\$150.000.000
<b>Grupo de electrógeno 10 MW</b>	-\$ 1.200.000.000
<b>Costos de montaje y compra de 3 tracto camiones</b>	-\$830.000.000
<b>COSTO IMPLEMENTACIÓN GASIFICADOR</b>	-\$2.180.000.000

En el costo de la inversión inicial se tuvo en cuenta el transporte e instalación de la planta además la construcción del centro de acopio, vale recalcar que el costo del transporte e instalación de la planta gasificadora se estimó como un gasto de \$830´000.000 (ochocientos treinta millones de pesos).

**5.3.2 Estudio financiero acumulado anual** Para este estudio se tomaron 20 años de estudio que serían los de la vida útil de la máquina, tomando en cuenta la inversión inicial.

En el ANEXO 1 se puede observar el estudio financiero a largo plazo y así mismo es posible sacar conclusiones de qué tan factible puede ser la propuesta. Algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta fueron

- Todos los valores en la tabla están expresados en pesos colombianos
- Cada año se necesita revisión y operación profesional, este se estimó con un costo de treinta y seis millones de pesos.
- El mantenimiento se estimó con valor de treinta y dos millones cuatrocientos mil pesos, y cada cinco años con un sobre costo adicional de seiscientos mil pesos.

- El factor del VPN (Valor Presente Neto), se estimó de 0.94 que se toma en cuenta el valor de la moneda en futuro debido al poder monetario que se pierde anualmente.
- Se estimó el beneficio monetario de energía con el costo actual del kWh en el país de aproximadamente 160,14 \$/kWh, y este se tomó como permanente ya que este no ha variado mucho en los últimos años.

De este anexo se puede concluir que es factible, ya que se estima que en el tercer año se recupera la inversión hecha y el balance económico es positivo. Además de esto, el costo del kWh sumando lo invertido da como resultado un aproximado de 21 \$/kWh.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el presente trabajo de grado se planteó como principal objetivo el de analizar el potencial de generación de energía eléctrica a pequeña escala, a partir de la utilización de la biomasa procedente de residuos agrícolas y urbanos en el municipio de Bolívar, Santander. Para lograr este objetivo general se propusieron dos objetivos específicos centrados en la cuantificación del potencial de generación para las principales fuentes de biomasa identificadas en la localidad e indagar sobre las alternativas tecnológicas para su explotación; las conclusiones derivadas son las siguientes:

El primer objetivo consistió en cuantificar el potencial energético de las principales fuentes de obtención de biomasa, para cada una de las tecnologías a tener en cuenta para el estudio. Se encontró que gran cantidad de biomasa agrícola se encuentra en el cultivo de la mora llevado a cabo por los campesinos del municipio de Bolívar, Santander; y con el análisis realizado a la biomasa obtenida de la poda de mora se halló que, el potencial energético en comparación con el de otros residuos agrícolas es menor, dado a sus características físico-químicas.

Con el fin de cuantificar la cantidad de desechos urbanos aprovechables se tuvo en cuenta aproximadamente el 10% de la población del total del municipio, ya que el otro 90% se localiza en la parte rural y no sería posible recolectar todos los desechos en un centro de acopio para darle utilidad.

El segundo objetivo se basó en establecer la capacidad de generación de energía eléctrica que se pudiera obtener con la biomasa aprovechable, las alternativas tecnológicas disponibles y los costos asociados a cada una de ellas, y para ello se exploraron todas las tecnologías acordes con el aprovechamiento óptimo de

biomasa para la obtención de energía eléctrica y se seleccionaron los procedimientos de lecho fijo, lecho fluidizado (biomasa agrícola) y combustión directa (biomasa urbana) de acuerdo a las particularidades de la biomasa y a las propiedades técnicas de cada método. La potencia máxima aprovechable, con los residuos agrícolas estimados hasta el momento es de  $135 \text{ GWh/año}$ , con lo que se deduce que es factible el uso de las fuentes alternativas de biomasa agrícola para la contribución de energía eléctrica a una considerable cantidad de hogares, puesto que según el costo del kW/h en el país que en la actualidad está a 160,14 pesos el kilowatt generado, se recuperaría la inversión a corto y mediano plazo por parte de la entidad prestadora de servicio.

Implementar un proyecto de incineración de RSU, en el municipio de Bolívar Santander no es la mejor opción ya que no se podría garantizar la viabilidad económica del proyecto, una alternativa sería incentivar el uso de biodigestores caseros en el municipio para aprovechar los desechos y así producir biogás, que puede ser utilizado para la cocción de alimentos, calefacción, o iluminación.

A modo de sugerencia se plantea el estudio de varias fuentes de biomasa agrícola para adquirir mayor energía, siempre y cuando se tenga en cuenta la adquisición de un secador de lecho fluidizado y una máquina peletizadora, puesto que es la tecnología conveniente para el procesamiento de desechos de diferentes propiedades y además, se recomienda invertir en la posibilidad de formar un centro de acopio con un municipio cercano de población urbana, de manera que aumente la cantidad de desechos urbanos y se incrementen los potenciales de generación de energía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, C. A. (2016). *Estudio de pre factibilidad para el aprovechamiento de la biomasa depositada en rellenos sanitarios y su adaptabilidad mediante una micro-red eléctrica dimensionada en 1 MW*. Bucaramanga: UIS.

Alcaldía de Bucaramanga. (2015). *ANEXO DE PLAN DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS PGIRS 2016-2027*. Bucaramanga.

Alcaldía de Bucaramanga. (2015). *PLAN DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS PGIRS 2016-2027*. Bucaramanga.

Alvarez, I. (Diciembre de 2009). *UTN*. Obtenido de [https://www4.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes\\_EyM/Capitulo\\_9\\_Maquina\\_Sincronica.pdf](https://www4.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes_EyM/Capitulo_9_Maquina_Sincronica.pdf)

Bolivar-Santander, Alcaldia de Bolivar. (2015). Obtenido de [http://www.bolivar-santander.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.bolivar-santander.gov.co/informacion_general.shtml)

Caicedo, O. P. (2010). *Programa de Uso Racional y Eficiente de Energia y Fuentes no Convencionales*. Bogotá.

Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. (ICE, Ed.) *ECONOMÍA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES*, 84, 117-140.

Claros, J. (2014). *AINIA Comunidad*. Obtenido de <http://comunidad.ainia.es/web/ainiacomunidad/blogs/sostenibilidad/>

/articulos/2vMk/content/produccion-sostenible-de-biogas-en-el-sector-agroalimentario:-hacia-el-autoconsumo-energetico

CORPOEMA-CREG. (2012). *Determinación de Inversiones y Gastos de Administración, Operación y Mantenimiento para la Actividad de Generación en Zonas No Interconectadas Utilizando Recursos Renovables*. Bogotá.

CORPOEMA-UPME. (2010). FORMULACIÓN DE UN PLAN DE DESARROLLO PARA LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN COLOMBIA (PDFNCE).

CVNE. (27 de Agosto de 2008). Obtenido de Ministerio de Educación: <http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/w3-article-169555.html>

DANE. (30 de Junio de 2005). *DANE*. Obtenido de [http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06\\_20/ProyeccionMunicipios2005\\_2020.xls](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls)

Daza. (s.f.). Obtenido de <https://profedaza.wordpress.com/componentes-sistema-de-refrigeracion/condensadores/>

DIARIO DE LEON . (13 de 11 de 2008). Obtenido de [http://www.diariodeleon.es/noticias/naturaleza/presentan-planta-biomasa-genera-energia-electrica-termica\\_417659.html](http://www.diariodeleon.es/noticias/naturaleza/presentan-planta-biomasa-genera-energia-electrica-termica_417659.html)

Energia, C. d. (s.f.). Obtenido de <http://centralese.blogspot.com.co/2009/02/centrales-termicas-de-biomasa.html>

Fabio Emiro Sierra V, C. A. (2011). EFICIENCIA ENERGETICA DE UNA PLANTA DE GASIFICACION DE LECHO FIJO CORRIENTE DESCENDENTE DE 12 kW

ALIMENTADA CON MADERA RESIDUAL Y AIRE COMO AGENTE OXIDANTE.  
*CIMM*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Grupo de investigación SUPREN. (17 de Junio de 2016). *Euskal Herriko Unibertsitatea*. Obtenido de Universidad del País Vasco:  
<https://www.ehu.eus/es/web/supren/pirolisi-eta-gasifikazioa>

IDAE . (2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid: IDAE.

INTI. (2011). *INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL* . Obtenido de <http://www.inti.gob.ar/e-renova/erBI/er24.php>

INVERGIA. (17 de Junio de 2016). *INVERGIA*. Obtenido de <http://invergia.org/cogeneracion/>

J. A. Ruiz, M. C. (s.f.). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable energy Reviews*, 18, 174-183.

Johana Mejía González, J. V. (2013). *Caracterización Físicoquímica De Biomasa Agrícola Representativa En Santander: "Papa, Yuca, Mora, Papaya, Cebolla Junca"*. Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, FACULTAD DE INGENIERÍAS FICOQUÍMICAS, ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA.

Lagüado, N. G. (2008). *SIMULACIÓN DE UN SISTEMA GASIFICADOR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR CONECTADO A UN REACTOR WGS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO*. Bucaramanga: UIS.

Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de Navarra, Fondo Europeo de Desarrollo Regional. (14 de Junio de 2010). PROYECTO GASREUR Aprovechamiento energético mediante Gasificación del Rechazo procedente del Tratamiento de Residuos Urbanos. Pamplona, España.

Naranjo, M. C. (2009). *GASIFICACIÓN DE BIOMASA Y RESIDUOS EN LECHO FLUIDIZADO: ESTUDIOS EN PLANTA PILOTO*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

NEIRA, G. A. (2006). *4.bp.blogspot*. Obtenido de [http://4.bp.blogspot.com/-VXSgFC40QbE/UCnhGOEF\\_yI/AAAAAAAAAFLw/33V4b8KqRKI/s1600/gasificacion-de-la-biomasa.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-VXSgFC40QbE/UCnhGOEF_yI/AAAAAAAAAFLw/33V4b8KqRKI/s1600/gasificacion-de-la-biomasa.jpg)

Nelly. (s.f.). *solo ejemplos*. Obtenido de <http://www.soloejemplos.com/ejemplo-de-tipos-de-calderas/>

PADILLA, J. L. (2015). *ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DE GASIFICACIÓN INTEGRADA A MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA, EMPLEANDO CASCARILLA DE ARROZ EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA*. BOGOTÁ: UNIVERSIDAD LIBRE.

Prando, R. y. (2015). *INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS TECNOLOGICOS INDUSTRIALES BIOMASA*.

Quaak, H. K. (1999). *Energy from Biomass: A review of Combustion and Gasification Technologies*". Washington: The World Bank Group.

Solar, D. A. (2010). Gasificación de Biomasa, Aplicación a Necoclí, Antioquia-Colombia. *VI Simposio Internacional de Energía y Frontera Tecnológica en el Sector Rural, Sabaneta, Antioquía, Colombia, 21 – 23 julio 2010*. Antioquia: Instituto de Ingeniería Energética - Universidad Politécnica de Valencia, Grupo LABDER.

Sopesa. (s.f.). Obtenido de <http://www.sopesa.com/proyectos/planta-de-generacion-rsu>

Tabarés, J. L. (s.f.). Procesos Termoquímicos Para La Obtención De Energía A Partir De La Fitomasa Residual (Combustión, Gasificación, Pirólisis).

TORRES, R. S. (2000). INCINERACION DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS Y GENERACION DE ELECTRICIDAD. *ENERGIA A DEBATE* .

UNESA. (s.f.). Obtenido de <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1348-central-rsu>

UPME - CONSORCIO ENERGÉTICO CORPOEMA. (30 de Diciembre de 2010). FORMULACIÓN DE UN PLAN DE DESARROLLO PARA LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN COLOMBIA (PDFNCE) VOLUMEN 2 – DIAGNÓSTICO DE LAS FNCE EN COLOMBIA. Bogotá, Colombia.

UPME. (2010). *Análisis y Revisión de los Objetivos de Política Energética Colombiana de Largo Plazo y Actualización de sus Estrategias de Desarrollo*.

UPME. (2015). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050.

UPME. IDEAM, MINISTERIOS DEL RAMO, COLCIENCIAS, UIS. (2009). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia.

UPME-AENE. (2003). *Potencialidades de los Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas en Colombia*. Bogotá.

Villegas, N. C. (2012). *Relación entre la producción per cápita de residuos sólidos domésticos (RSD) con algunos factores socioeconómicos de los habitantes del*

*municipio de Circasia-Quindío*. Ibagué: Universidad del Tolima . Obtenido de [http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac\\_Forestal/Documentos/TRABAJOS\\_ESP\\_IMPACTO\\_AMBIENTAL/Nidia%20Carolina%20Marn%20Villegas.pdf](http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/TRABAJOS_ESP_IMPACTO_AMBIENTAL/Nidia%20Carolina%20Marn%20Villegas.pdf) WIKIPEDIA. (17 de Junio de 2016). WIKIPEDIA. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Bol%C3%ADvar\\_\(Santander\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Bol%C3%ADvar_(Santander))

Yuste, P. S. (2014). *CERTIFICADOS ENERGETICOS*. Obtenido de <http://www.certificadosenergeticos.com/generacion-energia-basura-energia-100-limpia>

Zanzi, R. S. (2014). Gasificación en contracorriente.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, C. A. Estudio de pre factibilidad para el aprovechamiento de la biomasa depositada en rellenos sanitarios y su adaptabilidad mediante una micro-red eléctrica dimensionada en 1 MW. Bucaramanga: UIS. 2016

ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Anexo de plan de gestión integral de residuos solidos PGIRS 2016-2027. Bucaramanga. 2015

ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Plan de gestión integral de residuos solidos PGIRS 2016-2027. Bucaramanga. 2015

ALVAREZ, I. Maquina sincrónica [en línea] disponible en: [https://www4.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes\\_EyM/Capitulo\\_9\\_Maquina\\_Sincronica.pdf](https://www4.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes_EyM/Capitulo_9_Maquina_Sincronica.pdf)

ALCALDIA DE BOLIVAR Información general de Bolívar-Santander,. [en línea] disponible en: [http://www.bolivar-santander.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.bolivar-santander.gov.co/informacion_general.shtml)

CAICEDO, O. P. Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales. Bogotá. 2010

CERDÁ, E. Energía obtenida a partir de biomasa. (ICE, Ed.) Economía de las energías renovables, 84, 117-140. 2012

CLAROS, J. producción sostenible de biogás en el sector agroalimentario: hacia el autoconsumo energético [en línea] disponible en: <http://comunidad.ainia.es/web/ainiacomunidad/blogs/sostenibilidad/>-

/articulos/2vMk/content/produccion-sostenible-de-biogas-en-el-sector-agroalimentario:-hacia-el-autoconsumo-energetico

CORPOEMA-CREG. Determinación de Inversiones y Gastos de Administración, Operación y Mantenimiento para la Actividad de Generación en Zonas No Interconectadas Utilizando Recursos Renovables. Bogotá. 2012

CORPOEMA-UPME. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). 2010

Ministerio De Educación CVNE. [en línea] disponible en:  
<http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/w3-article-169555.html>

DANE. Protección municipios 2005 – 2020 [en línea] disponible en:  
[http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06\\_20/ProyeccionMunicipios2005\\_2020.xls](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls)

DAZA. Condensadores [en línea] disponible en:  
<https://profedaza.wordpress.com/componentes-sistema-de-refrigeracion/condensadores/>

DIARIO DE LEON Presentan planta biomasa genera energia electrica termica 2008, 11 13 [en línea] disponible en:  
[http://www.diariodeleon.es/noticias/naturaleza/presentan-planta-biomasa-genera-energia-electrica-termica\\_417659.html](http://www.diariodeleon.es/noticias/naturaleza/presentan-planta-biomasa-genera-energia-electrica-termica_417659.html)

ENERGIA, C. d. Centrales térmicas de biomasa [en línea] disponible en:  
<http://centralese.blogspot.com.co/2009/02/centrales-termicas-de-biomasa.html>

SIERRA V. Fabio Emiro, C. A. Eficiencia energética de una planta de gasificación de lecho fijo corriente descendente de 12 KW alimentada con madera residual y aire como agente oxidante. CIMM. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2011

GRUPO DE INVESTIGACIÓN SUPREN. Euskal Herriko Unibertsitatea. Universidad del País Vasco: 2016, Junio 17 [en línea] disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/supren/pirolisi-eta-gasifikazioa>

IDAE . Biomasa: Gasificación. Madrid: IDAE. 2007

INTI. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL . 2011 [en línea] disponible en: <http://www.inti.gob.ar/e-renova/erBI/er24.php>

INVERGIA. Cogeneración 2016, Junio 17 [en línea] disponible en: <http://invergia.org/cogeneracion/>

RUIZ J. A., M. C. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. Renewable and Sustainable energy Reviews, 18, 174-183.

MEJÍA GONZÁLEZ Johana, J. V. Caracterización Físicoquímica De Biomasa Agrícola Representativa En Santander: "Papa, Yuca, Mora, Papaya, Cebolla Junca". Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela Ingeniería Química. 2013

LAGÜADO, N. G. Simulación de un sistema gasificador de bagazo de caña de azúcar conectado a un reactor WGS para la producción de hidrógeno. Bucaramanga: UIS. 2008

MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN, GOBIERNO DE NAVARRA, Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Proyecto GASREUR Aprovechamiento energético mediante Gasificación del Rechazo procedente del Tratamiento de Residuos Urbanos. Pamplona, España. 2010, Junio 14

NARANJO, M. C. (). Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto. Sevilla: Universidad de Sevilla. 2009

NEIRA, G. A. Gasificación de la biomasa [en línea] disponible en: [http://4.bp.blogspot.com/-VXSgFC40QbE/UCnhGOEF\\_yI/AAAAAAAAAFLw/33V4b8KqRKI/s1600/gasificacion-de-la-biomasa.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-VXSgFC40QbE/UCnhGOEF_yI/AAAAAAAAAFLw/33V4b8KqRKI/s1600/gasificacion-de-la-biomasa.jpg)

NELLY. Solo ejemplos. [en línea] disponible en: <http://www.soloejemplos.com/ejemplo-de-tipos-de-calderas/>

PADILLA, J. L. análisis termoeconómico de gasificación integrada a motores de combustión interna, empleando cascarilla de arroz en el departamento de Córdoba. Bogotá: Universidad Libre. 2015

PRANDO, R. Introducción a los procesos tecnológicos industriales biomasa. 2015

QUAAK, H. K. Energy from Biomass: A review of Combustion and Gasification Technologies". Washington: The World Bank Group. 1999

SOLAR, D. A. Gasificación de Biomasa, Aplicación a Necoclí, Antioquia-Colombia. VI Simposio Internacional de Energía y Frontera Tecnológica en el Sector Rural, Sabaneta, Antioquía, Colombia, 21 – 23 julio 2010. Antioquia: Instituto de Ingeniería Energética - Universidad Politécnica de Valencia, Grupo LABDER. 2010

SOPESA. Planta de generación RSU [en línea] disponible en: <http://www.sopesa.com/proyectos/planta-de-generacion-rsu>

TABARÉS, J. L. Procesos Termoquímicos Para La Obtención De Energía A Partir De La Fitomasa Residual (Combustión, Gasificación, Pirólisis).

TORRES, R. S. Incineración de residuos sólidos urbanos y generación de electricidad. *energía a debate* 2000.

UNESA. Central RSU [en línea] disponible en: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1348-central-rsu>

UPME - CONSORCIO ENERGÉTICO CORPOEMA. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) volumen 2 – diagnóstico de las FNCE en Colombia. Bogotá, Colombia. 2010, Diciembre 30

UPME. Análisis y Revisión de los Objetivos de Política Energética Colombiana de Largo Plazo y Actualización de sus Estrategias de Desarrollo. 2010

UPME. Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. 2015

UPME. IDEAM, MINISTERIOS DEL RAMO, COLCIENCIAS, UIS. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. 2009

UPME-AENE. Potencialidades de los Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas en Colombia. Bogotá. 2003

Villegas, N. C. Relación entre la producción per cápita de residuos sólidos domésticos (RSD) con algunos factores socioeconómicos de los habitantes del municipio de Circasia-Quindío. Ibagué: Universidad del Tolima 2012. [en línea]

disponible en:  
[http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac\\_Forestal/Documentos/TRABAJOS\\_ESP\\_IMPACTO\\_AMBIENTAL/Nidia%20Carolina%20Marn%20Villegas.pdf](http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/TRABAJOS_ESP_IMPACTO_AMBIENTAL/Nidia%20Carolina%20Marn%20Villegas.pdf)

WIKIPEDIA. Bolívar Santander [en línea] disponible en:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Bol%C3%ADvar\\_\(Santander\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Bol%C3%ADvar_(Santander))

YUSTE, P. S. Certificados energéticos. [en línea] disponible en:  
<http://www.certificadosenergeticos.com/generacion-energia-basura-energia-100-limpia>

ZANZI, R. S. Gasificación en contracorriente. 2014

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. ANÁLISIS DE COSTOS**

(VER DOCUMENTO ADJUNTO)