

TECNOLOGÍA BIG/GT PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE CAÑA DE AZUCAR

**ARNULFO ANTONIO LOPEZ VILLALOBOS
DIANA CONSTANZA TOLOZA ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Facultad de ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga, 2008**

**TECNOLOGÍA BIG/GT PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA
BIOMASA RESIDUAL DE CAÑA DE AZUCAR**

**ARNULFO ANTONIO LOPEZ VILLALOBOS
DIANA CONSTANZA TOLOZA ROJAS**

**Trabajo de Grado para optar el título
de Ingeniero Químico**

**Director
Ing. Qco., Ph.D. HUMBERTO ESCALANTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Facultad de ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga, 2008**

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo se permiten a agradecer a:

- Dr. Humberto Escalante Hernández y Dr. Leonardo Acevedo Duarte por su gran apoyo en este trabajo.
- Ing. Qco., Fabián Viña, Ing. Qca., Yaneth Orduz, Ing. Qca., Lina Barco por su apoyo y colaboración.
- Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, CEIAM – UIS, y su personal por su apoyo institucional.
- Dr. Edgar Fernando Castillo M, director de Investigaciones Industriales de CENICAÑA, por su apoyo y colaboración.
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, CENICAÑA, y su personal de biblioteca e investigación por su apoyo institucional.
- Todas las personas que de alguna forma estuvieron vinculadas con este proyecto

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. PROCESO DE GASIFICACION DE BIOMASA	3
1.1 Etapas	3
2. GENERALIDADES DEL PROCESO DE GASIFICACION	4
2.1 Clasificación de los Gasificadores	4
2.2 Sistema de Gasificación en lecho fluidizado	4
2.3 Tecnologías de Cogeneración con residuo biomásico de caña	5
2.3.1 Sistemas de Combustión de Biomasa	5
2.3.2 Sistema de Gasificador con ciclo combinado	6
3. METODOLOGIA	8
3.1 Ubicación de la planta a nivel nacional	8
3.1.1 Analisis estadistico departamental	8
3.1.2 Análisis estadístico municipal	9
3.2 Selección de la tecnología	9
3.2.1 Cotejo entre Cogeneración y Ciclo BIG/GT	9
3.2.1.1 Criterio por eficiencia	9
3.2.1.2 Criterio Madurez de la Tecnología	11
3.2.1.3 Criterios por Costos de Instalación	12

3.3	<i>Diseño conceptual de la tecnología BIG/GT</i>	14
3.3.1	<i>Selección de los equipos de la tecnología</i>	14
3.3.2	<i>Costos de inversión total</i>	15
4.	RESULTADOS	16
5.	COCLUSIONES	27
6.	RECOMENDACIONES	28
7.	BIBLIOGRAFIA	29
	ANEXOS	32

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.	Esquema del principio de operación de gasificadores de lecho fluidizado	5
Figura 2a.	Esquema simple con turbina de vapor de contrapresión (BPST)	6
Figura 2b.	Ciclo con turbinas de vapor de contrapresión y de condensación	6
Figura 3.	Sistema BIG/GT (Planta de Varnamo en Suecia – Proceso BIOFLOW).	7
Figura 4.	Sistema de Cogeneración típico: (a) Sistema de cogeneración BPST 1.9 ton vapor/ton bagazo, (b) turbina de vapor extracción condensación con 2 extracciones 2 ton vapor/ton bagazo (CEST)	10
Figura 5.	Ciclo BIG/GT	20
Figura 6.	Simulación de gasificador con ciclo combinado. Hysys 3.2.	23

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de las alternativas estudiadas	11
Tabla 2. Tecnologías disponibles para la generación de electricidad a partir de biomasa para diferentes rangos de potencia	11
Tabla 3. Tecnologías de cogeneración	13
Tabla 4. Equipos Fundamentales para las Tecnologías de Cogeneración	14
Tabla 5. Departamentos de Colombia con mayor producción de Caña de Azúcar	16
Tabla 6. Selección del Gasificador	18
Tabla 7. Cálculos termodinámicos del Ciclo BIG/GT.	21
Tabla 8. Costos de equipos	23

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Modelo del Potencial Energético (PE)	<i>I</i>
Anexo B. Características fisicoquímicas de la biomasa de caña de azúcar	<i>III</i>
Anexo C. Análisis estadístico departamental y municipal	<i>IV</i>
Anexo D. Reacciones en un proceso de gasificación con biomasa.	<i>V</i>
Anexo E. Determinación de los costos y diseño conceptual	<i>VII</i>
Anexo F. Ubicación geográfica de Palmira	<i>IX</i>

RESUMEN

TITULO: TECNOLOGIA BIG/GT PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE BIOMASA RESIDUAL DE CAÑA DE AZUCAR.*

AUTORES: LOPEZ VILLALOBOS, Arnulfo Antonio., TOLOZA ROJAS, Diana Constanza. **

PALABRAS CLAVES: Cogeneración, Ciclo Combinado, Biomasa de Caña, Turbina de gas.

La biomasa residual de caña de azúcar consta de Residuos Agrícola de Caña (RAC) y Residuo Agrícola de Industria (RAI) o bagazo, contiene un alto potencial energético aprovechable, por ello es bien conocida su utilización como fuente para producir energía. Colombia es productor de caña de azúcar especialmente en el departamento del valle del cauca con una producción de 1.819.889 Ton/año, demandando grandes cantidades de residuos que son utilizados mediante tecnologías de cogeneración.

Debido a la composición fisicoquímica del residuo de caña de azúcar, para su aprovechamiento energético se han implementado tecnologías termoquímicas en las que se encuentran Combustión, Gasificación y Pirolisis. La tecnología de gasificación integrada con turbinas de gas, turbina de vapor y un proceso adecuado en el tratamiento de limpieza del combustible conforma el ciclo BIG/GT¹.

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar un ciclo BIG/GT, para la biomasa residual de caña de azúcar utilizando un gasificador de lecho fluidizado circulante atmosférico, obteniendo un gas combustible de poder calorífico de 12 MJ/Nm³ y una fracción molar de los siguientes compuestos CO 0.11, CO₂ 0.793, CH₄ 0.253, H₂ 0.2312, O₂ 0.258, N₂ 0.286, H₂O 0.0086 con una eficiencia global del proceso de 45% para potencias totales entre 35 a 50 Mw.

¹ Biomass Integrated Gasifier / Gas Turbine.

Tecnología BIG/GT para el aprovechamiento energético de la biomasa residual de caña de azúcar.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Humberto Escalante. Codirector Fabian Viña.

ABSTRACT

TITLE: TECHNOLOGY BIG / GT FOR THE USE OF BIOMASS ENERGY RESIDUAL SUGAR CANE. *

AUTHORS: LOPEZ VILLALOBOS, Arnulfo Antonio., TOLOZA ROJAS, Diana Constanza. **

KEY WORDS: Cogeneration, Combined Cycle, Biomass Cane, Gas turbine.

Biomass residual sugar cane waste consists of Agricultural Cane (RAC) and Agricultural Waste Industries (RAI), or bagasse, contains a high energy potential profitable, it is well known for its use as a source for energy. Colombia is a producer of sugar cane especially in the department Valle de Cauca with a production of 1,819,889 tons / year, demanding large quantities of waste that are used by cogeneration technologies.

Due to its chemical composition of the waste from sugar cane for energy have been thermochemical implemented technology for which there is combustion, gasification and pyrolysis. The integrated gasification technology with gas turbines, steam turbine and a proper process in dealing with cleaning up the fuel cycle BIG/GT¹.

The main objective of this work was to design a cycle BIG / GT, for biomass residual sugar cane using a circulating fluidized bed gasifier atmospheric, with a calorific value of gas fuel 12 MJ/Nm³ and a mole fraction of the following CO 0.11 compounds, CO₂ 0.793, CH₄ 0.253, H₂ 0.2312, O₂ 0.258, N₂ 0.286, H₂O 0.0086 with an overall efficiency of the process of 45% for total power between 35 to 50 Mw.

¹ Biomass Integrated Gasifier / Gas Turbine.

Tecnología BIG/GT para el aprovechamiento energético de la biomasa residual de caña de azúcar.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Humberto Escalante. Codirector Fabian Viña.

INTRODUCCIÓN

La biomasa en general representa alrededor del 14% de la energía consumida en el mundo y el 35% del consumo en los países del tercer mundo. La demanda actual y futura de combustibles limpios ofrece un potencial promisorio para los cultivos productores de biomasa residual. En Colombia, uno de los principales cultivos es la caña de azúcar; el cual se encuentra principalmente en el Valle del Cauca en una extensión de 159.258 Ha [12].

El bagazo de caña constituye, después de la leña, el tipo de biomasa con mayor importancia y potencial como combustible. Anualmente en el mundo se cosechan 1.104×10^{10} toneladas de caña de azúcar con una producción de 0.245×10^9 toneladas de bagazo [1, 2].

La agroindustria de caña de azúcar produce gran cantidad de residuos sólidos que son Residuos Agrícola de Caña (RAC) y Residuo Agrícola de Industria (RAI), que poseen características fisicoquímicas, específicas para su aprovechamiento energético tales como el Poder Calorífico Inferior (PCI) de 19.385 MJ/Kg y el porcentaje en peso de carbono de 49,5.

Las características del combustible biomásico residual de caña de azúcar presentan diferencias entre el bagazo y el RAC en el contenido de cenizas (Tabla 10, Anexos). El bagazo de la caña aporta alrededor de 0.8 % de cenizas y los RAC 2.6 % aproximadamente. Se plantea que el porcentaje de ceniza fluctúa entre 0,78 y 3,22 dependiendo del tipo de suelo y recolección. Un cambio del 1% en el contenido de cenizas corresponde a un cambio de 2% en el poder calórico.

El bagazo húmedo que proviene del la planta de beneficio de caña de azúcar es obtenido mediante un proceso de molienda de la materia prima; esta humedad es la propiedad más importante desde el punto de vista de la producción de vapor. Cuando el proceso de molienda de caña es deficiente, es decir, cuando existe un mal ajuste en la presión del último de los molinos, el contenido de humedad del

bagazo será superior al 55 %, mientras que con un buen trabajo su contenido será de un 48 %; normalmente este valor oscila en un rango estrecho de 44 a 50 % [14].

La granulometría depende mucho del grado de preparación que tenga la caña en el proceso de extracción de jugo, el número de juegos de cuchillas, desmenuzadoras y molinos, así como su calidad; al aumentar estos aumentará el contenido de finos como resultado de la preparación de la fibra. La presión y el grado de desgaste de los molinos son otros dos factores muy importantes que se deben ir controlando durante la zafra (Inicio de cosecha) y que influyen sobre la granulometría del bagazo.

Dentro de las tecnologías adecuadas para el aprovechamiento energético de la biomasa de caña de azúcar se encuentran las termoquímicas; por ejemplo, el uso actual de la combustión es la quema directa de biomasa de caña en calderas bagazeras [7]. La pirolisis es poco usual en el mundo por los altos costos de producción del bio-oil [12]. La gasificación con bagazo de caña se obtiene un gas con un alto poder calorífico para su uso como combustible en turbinas de gas. El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), ha realizado estudios para la evaluación y análisis del uso de los RAC y RAI de la caña de azúcar como fuente de energía eléctrica. CENICAÑA ha planteado como primera opción, para la producción de energía a partir de estos residuos, la combustión del bagazo en calderas adaptadas para la quema directa. Además se considera que la tecnología de gasificación remueve el azufre y las partículas generando emisiones más limpias [2].

1. PROCESO DE GASIFICACION DE BIOMASA

La gasificación puede ser definida generalmente como la conversión termoquímica de sólidos o líquidos, basados en material carbonoso, en un producto combustible gaseoso (gas combustible) por medio del suministro de un agente gasificante. Convertir un sólido o un líquido en un gas combustible a través de su oxidación parcial a temperaturas elevadas, en este caso se refiere a la biomasa donde las moléculas sólidas son convertidas por reacciones de oxidación-reducción en pequeñas moléculas de gas combustible [9]. El gas producido, puede ser empleado en otro proceso de conversión para generar calor, potencia mecánica o un combustible líquido.

1.1 Etapas

El proceso de gasificación consta de varias etapas:

Etapa de pirólisis o descomposición térmica (volatilización), que se da a temperaturas aproximadas de 600 °C.

Oxidación parcial del carbono fijo del combustible, proceso que constituye la fuente de energía térmica para la volatilización y la gasificación.

Gasificación que incluye reacciones heterogéneas entre gases y el carbono residual, así como reacciones homogéneas entre los productos ya formados.

Craqueamiento del alquitrán proceso de destrucción química de las moléculas de los compuestos que lo conforman obteniéndose CO, CO₂, CH₄ como otros gases producto de esta etapa.

Oxidación parcial de los productos de pirólisis [5].

2. GENERALIDADES DEL PROCESO DE GASIFICACION

2.1 Clasificación de los gasificadores

Los gasificadores son de una gran variedad tecnológica y pueden ser calificados de diferentes formas como se indica a continuación [11, 17].

De acuerdo al Poder calórico del gas producido:

Gas de bajo poder calórico hasta 5 MJ/Nm^3

Gas de medio poder calórico de 5 a 15 MJ/Nm^3

Gas de alto poder calórico de 15 a 40 MJ/Nm^3

Nm^3 es el volumen de gas medido a condiciones normales, 1 atmosfera de presión y 0°C .

De acuerdo al tipo de agente de gasificación: Aire, Vapor de Agua u Oxígeno

Los gasificadores de lecho fluidizado se consideran convenientes para la aplicaciones de gran capacidad como el sistema Biomass Integrated Gasifier / Gas Turbine (BIG/GT), por causa de su alta flexibilidad en relación al combustible (permite utilizar combustibles de baja densidad y granulometría fina, como en el caso de la mayoría de los residuos agro-industriales), así como por facilidad de escalado. Los sistemas presurizados permiten disponer de instalaciones compactas, aunque el sistema de alimentación de la biomasa es más complicado. Según Studsvik la ventaja de una presión elevada es evidente para instalaciones de mayor potencia 80-150 MWe [3].

2.2 Sistema de gasificación en lecho fluidizado

En un gasificador de lecho fluidizado el agente de gasificación (aire, oxígeno o vapor de agua) y la biomasa se mezclan en un lecho caliente de material sólido (ejemplo: arena). Debido a la mezcla homogénea, las distintas zonas (secado,

pirolisis, oxidación, reducción) no pueden diferenciarse. La temperatura es relativamente uniforme en todo el lecho. El gas producido tiene ciertas cantidades de alquitranes que hay que eliminar [3]. Básicamente existen dos diseños de reactores: lecho fluidizado burbujeante y lecho fluidizado circulante (Figura 1). El rendimiento del gasificador de lecho fluidizado circulante es considerablemente mayor, pero el diseño es más complejo. Cada uno de estos diseños a su vez puede utilizar sistemas de calentamiento directo y de calentamiento indirecto [3, 9, 12]. Los gasificadores de lecho fluidizado deben ser operados a plena carga, a fin de mantener en el lecho material en circulación.

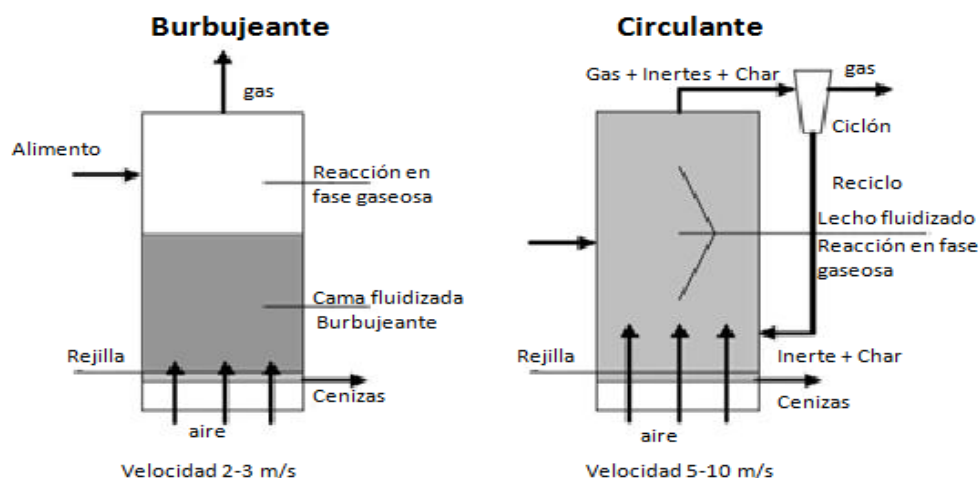


Figura 1: Esquema del principio de operación de gasificadores de lecho fluidizado. Izquierdo: lecho fluidizado burbujeante, Derecha: lecho fluidizado circulante.
 Fuente: Obornberger I. 2006

2.3 Tecnologías de Cogeneración con residuo biomásico de caña

2.3.1 Sistemas de Combustión de Biomasa

Las tecnologías de cogeneración utilizadas en la industria azucarera pueden ser clasificadas en tres grandes grupos, atendiendo al tipo de esquema termoenergético que se utilice: a) turbina de vapor de contrapresión (BPST),

Figura 2^a, b) turbinas de vapor de extracción condensación (CEST), Figura 2b y c) con Turbina de Gas e Integración de la Biomasa (tecnología BIG/GT), que permite potenciar la utilización de los ciclos combinados (CC), Figura 3 [4].

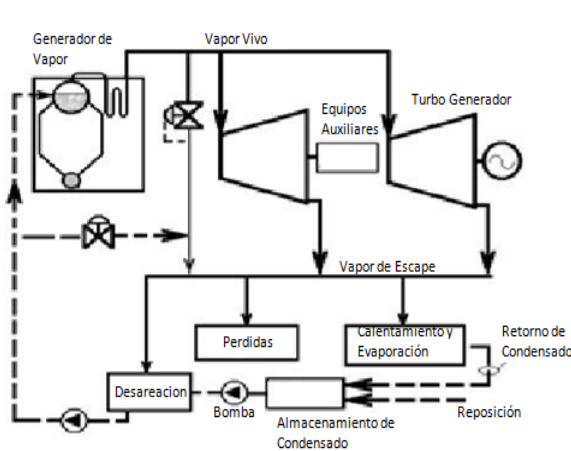


Figura 2 a). Esquema simple con turbina de vapor de contrapresión (BPST)

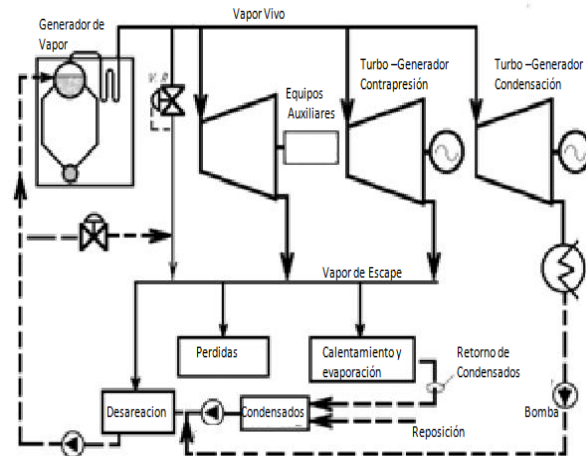


Figura 2 b). Ciclo con turbinas de vapor de contrapresión y de condensación

2.3.2 Sistema de Gasificador con ciclo combinado

La combinación gasificador/turbina de gas es una tecnología sumamente promisoría para la cogeneración de la industria azucarera conociéndose estos sistemas por las siglas BIG/GT (Biomass Integrated Gasifier / Gas Turbine Technologies) [1].

Existen diferentes variantes para la realización práctica de un ciclo térmico con turbinas de gas utilizando biomasa residual de caña de azúcar como combustible, básicamente las diferencias se presentan en términos de las turbinas adoptadas:

Sistemas BIG/GT (Biomasa Integrated Gasifier/Gas turbine) en estos sistemas que son los más prometedores, la biomasa residual de caña es gasificada y el gas combustible producido, una vez limpio de alquitrán, cenizas y metales alcalinos, es inyectado en la cámara de combustión de la turbina, como se presenta en la Figura 3 (Beenackers y Maniatis, 1996).

Modificaciones realizadas a la turbina de gas con el objetivo de aumentar su eficiencia derivaron a los ciclos BIG/STIG (Biomasa Integrated Gasifier/ Steam Inject Gas Turbine).

La inyección de vapor es una modificación de las turbinas aeroderivativas del ciclo simple que permite incrementar la potencia y eficiencia de las mismas, los sistemas BIG/GT aplicados a la industria azucarera permitirían obtener más de 275 Kwh de electricidad por tonelada de caña molida, en comparación con 115 Kwh para sistemas convencionales de alta presión y aproximadamente 20 Kwh para los sistemas de cogeneración actuales [5].

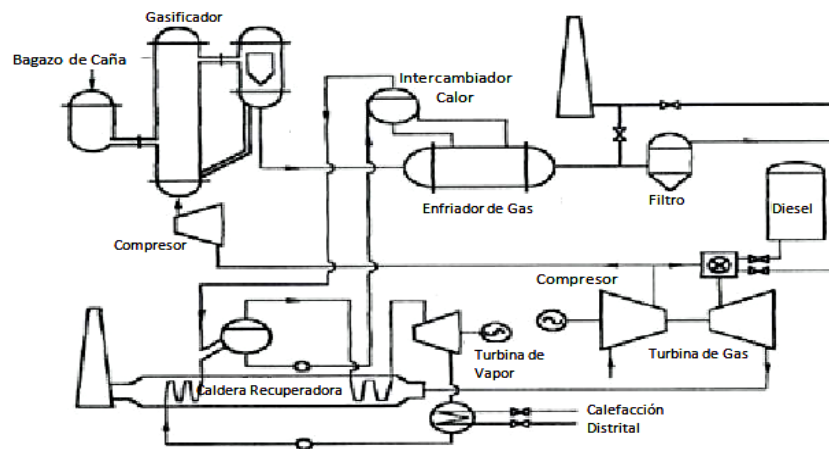


Figura 3. Sistema BIG/GT (Planta de Varnamo en Suecia – Proceso BIOFLOW).

En este trabajo de investigación se hizo el estudio de un sistema de cogeneración del ciclo BIG/GT para RAC y RAI del cultivo de caña mediante un gasificador de lecho fluidizado con el propósito de obtener un gas de medio poder calorífico. Con base en la revisión bibliográfica, se llevo a cabo el diseño conceptual de la tecnología (BIG/GT) con gasificador de lecho fluidizado atmosférico circulante que constituye la planta de cogeneración. Posterior a este análisis y por medio del Modelo Matemático del Potencial Energético de la Biomasa Residual Agrícola [23], y con la información de la base de datos del Anuario Estadístico Agropecuario 2006 se realizó la ubicación de la planta en el departamento del Valle del Cauca municipio de Palmira.

3. METODOLOGÍA

El trabajo se desarrollo en tres etapas: a) ubicación de la planta a nivel nacional, b) selección de la tecnología más recomendable para el aprovechamiento energético de la biomasa y c) diseño conceptual para los procesos de la tecnología seleccionada. Los componentes de cada etapa se esquematizan así:



3.1 Ubicación de la planta a nivel nacional

3.1.1 Analisis estadistico departamental

Los datos recopilados del Anuario Estadístico Agropecuario 2006 (Ministerio de Agricultura) se ordenaron a fin de obtener una base de información sectorizada de la biomasa de caña de azúcar con respecto al área cosechada, producción del producto principal, cantidad de residuo y potencial. Se llevo a cabo un análisis clasificando los departamentos con mayor producción de biomasa de caña de azúcar en Colombia mediante el potencial energético y cantidad anual de biomasa.

3.1.2 Análisis estadístico municipal

Posterior al análisis de ubicación departamental se realiza la sectorización por municipios, clasificándolos de acuerdo a los parámetros realizados en la sectorización anterior y se encuentra de esta manera los municipios de la zona del departamento con mayor cantidad de Biomasa residual de Caña de Azúcar.

3.2 Selección de la tecnología

3.2.1 Cotejo entre Cogeneración y Ciclo BIG/GT

En ingeniería para la selección de la tecnología más apropiada para un proceso en particular, puede realizarse mediante el desarrollo de métodos matemáticos en los cuales se tengan en cuenta diferentes criterios básicos. En el presente trabajo se tuvo en cuenta los criterios de eficiencia, madurez tecnológica y costos de instalación para las tecnologías de combustión (Turbina extracción/condensación y Turbina Contrapresión) y gasificación con ciclo combinado.

Un análisis de cada criterio da a conocer cuál es la tecnología adecuada para el aprovechamiento energético de la biomasa de caña.

3.2.1.1 Criterio por Eficiencia

Un estudio realizado en Cuba acerca de la cogeneración de bagazo de caña de azúcar muestra dos tipos de tecnologías de combustión: contrapresión (BPST) y extracción/condensación (CEST), Figura 4 [5].

El estudio fue hecho en una planta de capacidad de 7000 ton de caña/día y de acuerdo a los resultados se concluye que para este estudio el sistema de extracción/condensación es más eficiente en cuanto al gasto total de energía requerida.

La tecnología de combustión de extracción/condensación consume menor energía por tonelada de caña procesada y además de esto la cogeneración de energía (Kwh/Ton caña) es mayor.

Si se realiza la comparación de las tecnologías de ciclo combinado contra extracción/condensación se observa los resultados de la Tabla 1 que la tecnología (BIG/GT) tiene menor energía requerida (MJ/Ton caña), mayor cogeneración de energía por tonelada de caña (Kwh/Ton caña) y cuenta con un superávit mayor al del ciclo extracción/condensación, siendo la tecnología de gasificación con ciclo combinado la indicada para el aprovechamiento energético de biomasa residual de caña de azúcar [5].

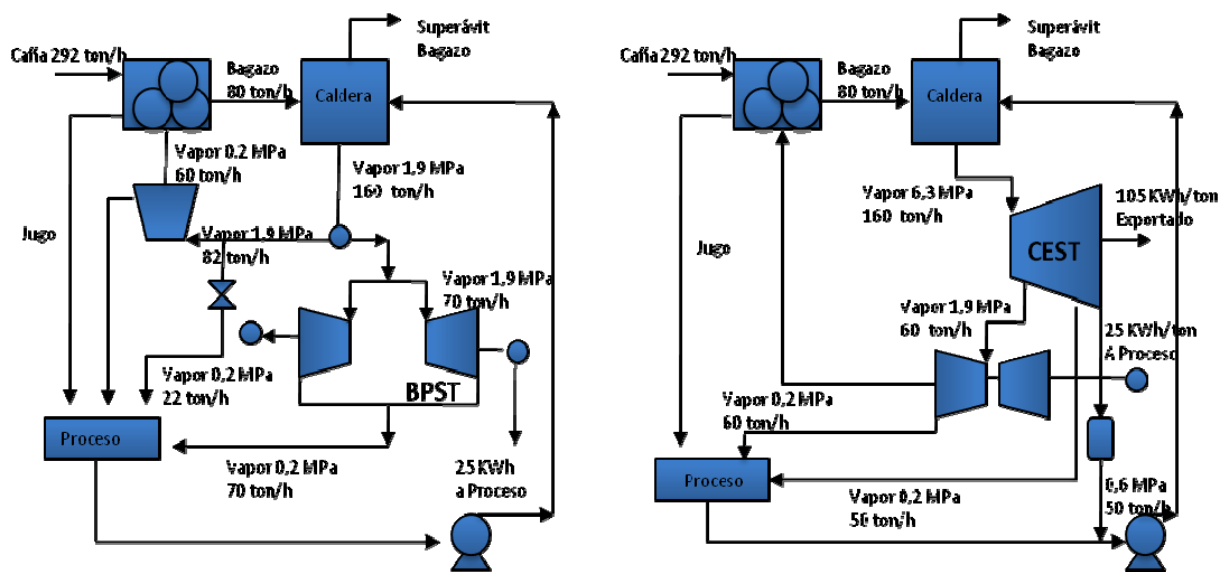


Figura 4. Sistema de Cogeneración típico: (a) Sistema de cogeneración BPST 1.9 ton vapor/ton bagazo, (b) turbina de vapor extracción condensación con 2 extracciones 2 ton vapor/ton bagazo (CEST) [14].

Tabla 1. Parámetros de las alternativas estudiadas (Walter, 1996).

Parámetro		BPST _{BASE}	BPST	CEST	BIG/GT
Capacidad Instalada (Mw)		5	10	30	52
Potencia excedente (MW)	Zafra	0.82	4.78	15.57	35.85
Demanda de Biomasa (10 ³ t/año)	Zafra	233.89	237.31	295.81	194.8
Producción de Electricidad ^a (KWh/tc)		14.22	27.43	120.56	255.53
Electricidad Excedente ^b		0.24	1.39	9.48	22.22
Inversión (10 ³ US\$) ^b		894	15204	28314	82.035
Costo Unitario ^c (US\$/KW instalado)		1788	152	944	1400

^a Referido por (Mutanen, 1993)

^b Referido por (Oliveira, 1991)

^c Larson et al., 2001

3.2.1.2 Criterio Madurez de la Tecnología

En la tabla 2 se presentan las Tecnologías disponibles para la generación de electricidad a partir de biomasa, para diferentes rangos de potencia.

Tabla 2. Tecnologías disponibles para la generación de electricidad a partir de biomasa para diferentes rangos de potencia

Rango de Potencia (KW)	Tecnología	Madurez Tecnológica			Viabilidad Comercial			Comentarios
		A	M	B	A	M	B	
200-1000	Combustión / ciclo a vapor	X			X			Alto costo y baja eficiencia de conversión
	Gasificación / MCI		X			X		Algunas unidades demostrativas/comerciales
	Gasificación / CC			X			X	Modelación matemática
> 1000	Combustión / ciclo a vapor	X			X			Requiere un combustible de bajo costo
	Gasificación / TG (tecnología BIG/GT)		X				X	Algunas Unidades demostrativas. Alta eficiencia

Fuente: Nucleo de estudios de sistemas térmicos (NEST), Eng. MSc. Flavio Neves Teixeira. MCI- Motor de combustión interna, MTG- Microturbina a gas, MS-Motor Stirling, CC- Celula a combustible, TG- Turbina a gas

Las tecnologías para la Cogeneración de biomasa de Caña son de rango de potencia mayor a 1Mw en las que se encuentran Ciclo Integrado de Gasificación de Biomasa Gas Turbina y Combustión/ciclo a Vapor, estas tecnologías son comparadas tanto en Madurez Tecnología como Viabilidad Comercial.

En la tabla 2 se observa que el aprovechamiento del potencial de la biomasa residual de caña de azúcar es utilizado de forma óptima con la tecnología BIG/GT, ya que su madurez tecnológica es media y su viabilidad comercial es buena contrastada con la combustión con ciclo a vapor de madurez y viabilidad aceptable. La cogeneración con biomasa de caña de azúcar maneja altos rangos de potencia, la tecnología BIG/GT es ideal por su alta eficiencia lo que conlleva a disminuir los costos de producción US\$/Kwh.

3.2.1.3 Criterios por Costos de Instalación.

Un estudio preliminar realizado en la fábrica de azúcar “Sergio González” de Matanzas (Habana, Cuba), para la cogeneración eléctrica con tecnologías de turbina de vapor de condensación-extracción (CEST) y turbinas de gas con biomasa gasificada en ciclos combinados (BIG/GT-CC) muestra un análisis financiero de estas tecnologías en donde se destacan aspectos tales como la producción, costos de inversión y capacidad entre otros Tabla 3.

Este estudio se realizó por el investigador norteamericano (Eric. D. Larson en junio de 1994), a solicitud de la Dirección Nacional de Ministerio del Azúcar (MINAZ) [6].

Para este estudio se partió de asumir similares condiciones de trabajo y variables energéticas para la fábrica de azúcar, así como las mismas funciones lineales para un sistema de cogeneración CEST o BIG/GT.

Una estimación abreviada de flujos de caja de ambas tecnologías en esta fábrica de azúcar ofrece los resultados que aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Tecnologías de cogeneración

	CEST		BIG/GT-CC		UM
Capacidad	30		52,2		MW
Costo de Inversión	65,9		82,02		10 ⁶ \$
Horizonte	Presente	Cercano	Presente	Cercano	UM
Producción	185,4	195,3	394,4	360	GWh/año
Fuel-oil liberado	43,6	46	82,4	85	10 ³ t/año
Valor mín.	4,8	5	9	9,3	10 ⁶ \$/año
Valor máx.	9,6	10,1	18,1	18,6	10 ⁶ \$/año
VAN mín.	(22,3)	(20)	3,8	6,4	10 ⁶ \$
Máx.	21,2	26	86	90	10 ⁶ \$
TIR mín.	5,5	5,8	10,2	11	%
Máx.	14,1	14,5	22	23,5	%
PR mín.	13,7	13	8,6	8,4	Años
Máx.	6,8	6,5	4,3	4,2	años

Fuente: Calculo de los autores basado en la potencia de capacidad de generación eléctrica. VAN: Valor actual neto; TIR: Tasa interna de retorno; PR: Plazo de recuperación

Se ha encontrado que la tecnología BIG/GT es más atractiva por:

Multiplica por casi dos veces la producción eléctrica anual (1,8 veces) respecto a CEST.

Multiplica por casi cuatro veces la VAN respecto a CEST (de 3,5 ~4 veces).

Multiplica por casi dos veces la TIR respecto al CEST (de 1,5 ~ 1,8 veces).

En la tabla 4 se presentan los equipos fundamentales para las tecnologías de Cogeneración.

Tabla 4. Equipos Fundamentales para las Tecnologías de Cogeneración.

Extracción Contrapresión	CEST	BIG/GT
		Gasificador
		Sist. Limpieza de Gases
		TG a gas
Caldera AP	Caldera de AP	Caldera de recuperación
TG extrac/cp	TG extra/condensación	TG extra/condensación
	Condensador	Condensador
	Sistema de enfriamiento	Sistema de enfriamiento
Tratamiento de Agua	Tratamiento de Agua	Tratamiento de Agua
Subestación	Subestación	Subestación
	Equipamiento reducción de consumo de proceso	Equipamiento reducción de consumo de proceso
US\$ 500 a 600 /Kw inst.	US\$ 600 a 1200/Kw Inst.	US\$ 1400- 1800/Kw Inst.

Fuente. Estudio de caso en la fábrica de azúcar "Sergio Gonzales", Eric D. Larson, junio de 1994. Informe final

En los Principales equipos aplicados en las diferentes formas de cogeneración de Caña de Azúcar se ha encontrado que la tecnología de BIG/GT posee un número mayor de equipos Tabla 4, siendo esta la de mayor costo de instalación comparada con las otras dos formas de aprovechamiento energético de la biomasa de caña, esto repercute en la capacidad de la planta, ya que a mayor capacidad mayor costo de puesta en marcha y en la cogeneración a mayor potencia en Mw menor es el costo de \$/Kwh generado.

3.3 Diseño conceptual de la tecnología BIG/GT

3.3.1 Selección de los equipos de la tecnología.

Cascada energética de la tecnología de gasificación atmosférica con ciclo combinado.

Es ideal que la biomasa disminuya su humedad entre el 10-20% en un secador a partir de la energía de los gases que salen de la caldera recuperadora, y se

introduce al gasificador atmosférico junto con los agentes gasificante el aire y vapor de agua. Como resultado se obtiene gas de síntesis crudo que inicialmente es dirigido a un intercambiador de calor con el fin de aumentar la densidad del gas y posteriormente se hace pasar por un scrubber a fin de garantizar la calidad final. Este gas es comprimido e introducido a la cámara de combustión de la turbina de gas con el objetivo de aumentar el flujo másico del gas. Al gas resultante de los productos de combustión que salen del expansor (525°C) se le recupera parte de su energía en un ciclo Ranking. La energía cedida durante el enfriamiento del gas es recuperada mediante la adición de calor en la caldera HRSG. Este calor es aprovechado para la producción de vapor de agua que generara trabajo en una turbina de vapor. El sistema de gasificación atmosférico posee un rendimiento termodinámico menor que el presurizado, debido fundamentalmente a las pérdidas de energía que ocurren durante el enfriamiento del gas y la energía consumida para elevar su presión y poder introducirlo a la cámara de combustión de la turbina de gas.

3.3.2 Costos de inversión total

Relación entre costos y capacidad.

En un estudio realizado (Faaij A, Meuleman B, 1998) tomaron datos de los costos de gasificación por componente de una planta de un sistema BIG / GT de 30 MWe [12].

La relación general entre los costos y la capacidad viene dada por la ecuación siguiente:

$$\text{COST}_{\text{Size2}}/\text{COST}_{\text{Size1}} = [\text{SIZE}_2/\text{SIZE}_1]^R$$

Donde:

El $COST_{Size1}$ es el costo base, para este costo se conocen los valores (Tabla 13 Anexos), $COST_{Size2}$ es el que va hacer calculado, $SIZE_2$ es el flujo másico de alimentación de biomasa al sistema, $SIZE_1$ es el flujo másico base (*es decir, 8,4 kg / s de la madera*) [12]. Los costos por componente de la base de BIG / CC y sistema de valores R (factor de escala) se presentan en la Tabla 13 Anexos [12].

4. RESULTADOS

De las diferentes etapas de la metodología se obtuvieron los siguientes resultados

Analisis estadistico departamental

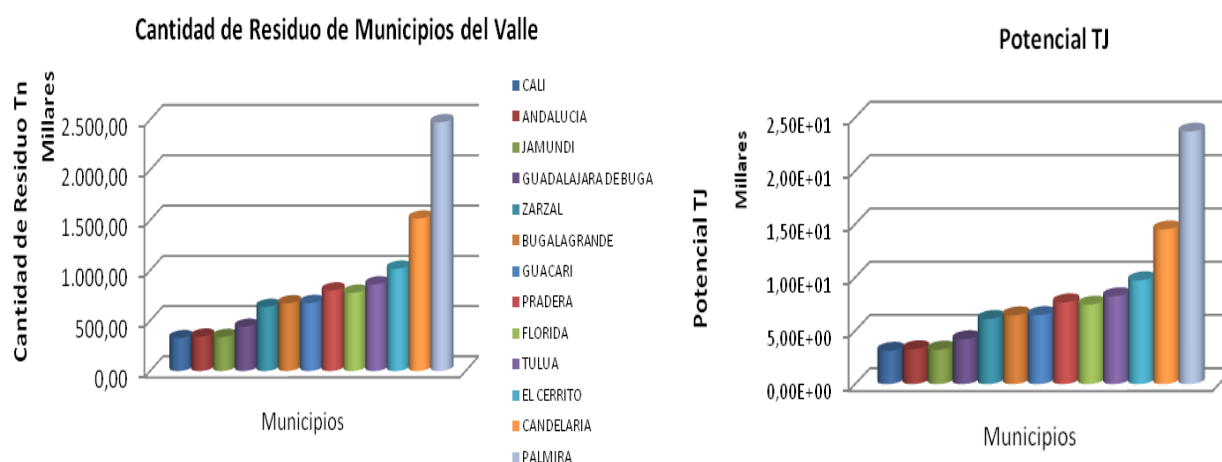
Los departamentos con mayor producción de biomasa residual de caña de azúcar presentados en la siguiente tabla son: Caldas, Cesar, Cauca, Valle del Cauca, Norte de Santander; siendo el Valle del Cauca el departamento con mayor generación de residuo de caña y por ende un alto potencial energético vegetal [23], aprovechable.

Tabla 5. Departamentos de Colombia con mayor producción de Caña de Azúcar

Nombre Departamento	Área Cosechada Ha	Producción Producto Principal Ton	Cantidad de Residuo Ton/ año			Potencial TJ/año		
			RAC	RAI	TOTAL	RAC	RAI	TOTAL
Caldas	2.625	32.812	106.967	87.936	194.903	920	946	1.866
Cauca	34.486	390.142	1.271.863	1.045.581	2.317.443	10.936	11.254	22.190
Cesar	1.734	10.924	35.612	29.276	64.889	306	315	621
V. del Cauca	159.258	1.819.889	5.932.838	4.877.303	10.810.141	51.013	52.495	103.508
Risaralda	2.719	38.357	125.044	102.797	227.841	1.075	1.106	2.182

Análisis estadístico municipal

Un análisis de cantidad y Potencial Energético (PE) de biomasa residual de caña muestra que los municipios donde se genera mayor aprovechamiento de esta biomasa son Candelaria y Palmira (datos contenidos tabla 11, anexos), siendo este último, el municipio que presenta mayor características para el aprovechamiento del PE por medio de la cogeneración con ciclo combinado BIG/GT.



Selección de los equipos y diseño conceptual de la tecnología BIG/GT

Selección del equipo fundamental de la tecnología BIG/GT

Selección del Gasificador. En la siguiente tabla presenta una propuesta por V. Belgiorno et al, 2003, donde se da un valor entre 1 y 5 para algunas de las principales características de los diferentes tipos de gasificadores.

En la columna del lado derecho se presenta un puntaje ponderado para calificar cada una de las características presentadas y en las últimas dos filas se presenta el resultado del puntaje para cada tipo de Gasificador por el valor ponderado y por promedio de todas las características. Se observa que el tipo de Gasificador que sale más favorecido es el de lecho fluidizado circulante [9, 13].

Selección del Gasificador

Tabla 6. Selección del Gasificador

Características	De lecho Fijo		De lecho Fluidizado		Indirectos		Valor Ponderado
	Contra Corriente (Updraft)	Flujo Paralelo (Downdraft)	Burbujeante	Circulante	Por Carbón	Por Gas	
Conversión de Carbón	4	4	2	4	5	2	5,0%
Eficiencia Térmica	5	4	3	4	3	3	10,0%
CGE	5	3	3	4	3	3	1,0%
Factor de Aire	3	2	4	4	4	4	2,0%
Facilidad de Arranque	1	1	3	3	5	5	2,0%
Facilidad de Operación	4	4	2	2	1	1	8,0%
Facilidad del Control	2	2	4	4	5	5	8,0%
Potencia de Escalamiento	3	1	3	5	3	3	4,0%
Flexibilidad en el tamaño de alimentación	4	1	2	2	2	2	4,0%
Flexibilidad en la humedad de la alimentación	4	2	3	3	1	1	5,0%
Flexibilidad en las cenizas de la alimentación	1	1	4	4	3	4	7,0%
F. en las pelusas de la alimentación	4	2	1	3	3	1	3,0%
Seguridad de gasificación	1	1	3	5	5	3	9,0%
Mezclado	1	1	4	5	5	4	2,0%
Costo de	5	4	2	2	1	1	5,0%

seguridad							
Contenido de alquitranes	1	5	2	3	2	2	9,0%
Contenido de Partículas	5	3	2	2	2	4	7,0%
Poder calorífico	1	1	1	2	5	5	9,0%
Calificación por ponderado	2,86	2,52	2,56	3,28	3,15	2,95	
Calificación por promedio	3,00	2,33	2,67	3,39	3,22	2,94	
1: malo, 2: regular, 3: bueno, 4: muy bueno, 5: excelente							

Fuente: V. Belgiorno et al, 2003

Este tipo de gasificador es adecuado para la gasificación de biomasa residual de caña de azúcar, debido a la alta eficiencia y alta conversión de carbono [9].

Para el ciclo BIG/GT se utilizan varios tratamientos dentro de los cuales están: craqueo térmico, craqueo catalítico y el sistema de limpieza scrubber. Para este trabajo de investigación se utilizó el sistema de limpieza del gas scrubber debido a la facilidad de control del equipo y al de contaminantes en el aire [15], sin embargo este tratamiento tiene como desventaja que el gas es enfriado y pierde LHV (Poder Calorífico Inferior) por ello para este ciclo es necesario el acoplamiento de un de un compresor para lograr un incremento de flujo de gas en la cámara de combustión [9, 16].

Scrubber. Este sistema de limpieza de gas es implementado para la gasificación atmosférica para garantizar la calidad el gas (Kurkela,1993), además cumple la función de lograr altos niveles de enfriamiento lo que significa una remoción de los álcalis de la corriente de gas [18].

La turbina utilizada para el ciclo planteado fue una turbina aeroderivativa GE LM2500 [5], esta fue escogida por que ha sido adaptada para los ciclos BIG/GT, además de ello porque las turbinas aeroderivativas tiene altas eficiencias. Este tipo de turbina ha sido modificada para ser usada con biomasa, esta modificación consiste en colocar un expansor de baja presión para poder transformar la energía

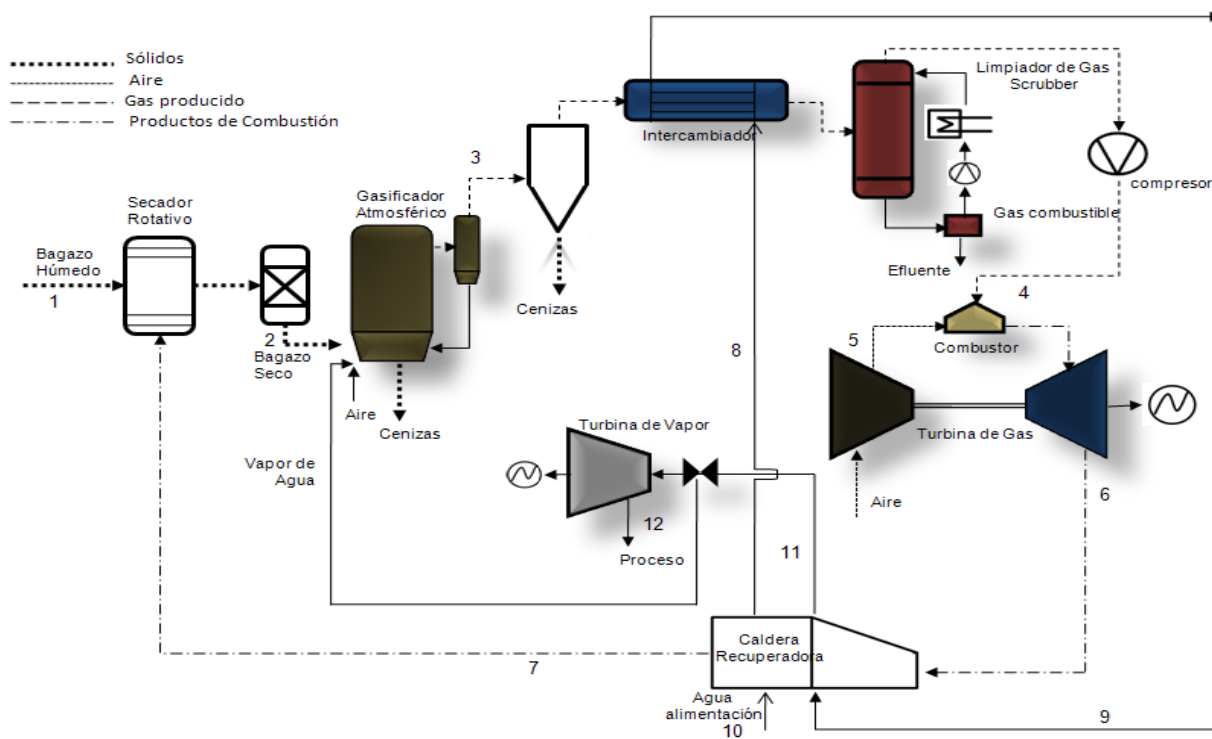
del gas caliente que sale de la cámara de combustión en energía mecánica y luego en energía eléctrica [12,15,17].

Caldera Recuperadora HRSG (Heat Recovery Steam Generator). La caldera recuperadora HRSG, es el tipo de caldera sin post-combustión más utilizada en los ciclos combinados, esencialmente este tipo de caldera es un intercambiador de calor en el que se transfiere calor de los gases al circuito agua-vapor por convección [19].

De acuerdo la revisión bibliográfica de los equipos utilizados en la tecnología del ciclo BIG/GT, se desarrolla un diseño de esta tecnología presentado en la siguiente figura.

Figura 5. Ciclo BIG/GT

Ciclo BIG/GT (Gasificación atmosférico de lecho fluidizado Circulante)



Cálculos termodinámicos en Hysys 3.2

La generación de energía eléctrica en la industria azucarera apunta al empleo de tecnologías con un alto índice de conversión energética, entre las que se encuentran el empleo de la gasificación integrada de biomasa con turbina de gas en ciclo combinado (BIG/GTCC), integrado a un proceso de fabricación de azúcar altamente eficiente, característico por un bajo índice de consumo de vapor por tonelada de caña.

En la Tabla 7 se muestra los valores de referencias que son constatados por la simulación del proceso mediante el programa Hysys 3.2, los valores que son semejantes entre los de referencia y los estimados fueron tomados como supuestos para la simulación del proceso. El cálculo termodinámico del ciclo BIG/GT fue desarrollado con base a un proceso tecnológico de fabricación a partir de 205 tc/h (tc: Tonelada de caña) con un bajo índice de consumo de vapor por tonelada de caña molida [3].

Tabla 7. Cálculos termodinámicos del Ciclo BIG/GT.

Parámetro	Unidad	Valor Estimado	Valor de Referencia
Relación de aire combustible en el Gasificador ^a	Kg _{aire} /Kg _{bagazo}	0,933	0,933
Temperatura de salida del gas en el Gasificador ^a	°C	900	900
Humedad del bagazo en la entrada del Gasificador ^a	%	20	20
Presión de operación del Gasificador	MPa	1,48	1,5
Composición Volumétrica del gas a la salida del Gasificador ^d			
Monóxido de Carbono (CO)	% (mol)	11,1	17,95
Dióxido de Carbono (CO ₂)	% (mol)	7,93	9,42
Metano (CH ₄)	% (mol)	2,53	2,36
Hidrogeno (H ₂)	% (mol)	23,12	14,99
Oxígeno (O ₂)	% (mol)	25,8	-
Nitrógeno (N ₂)	% (mol)	28,65	41,9
Agua (H ₂ O)	% (mol)	0,86	11,75
Poder Cal (MJ/Nm ³). [12].		12	10-12
Datos técnicos de la turbina GE LM 2500 ^b . [5, 16].			
Temperatura del combustible en la cámara de combustión	°C	400	400

Temperatura a la salida de la cámara de combustión (TIT) ^c	°C	1200	963
Relación de presiones ^c	-	-	10,5
Eficiencia de la compresión	%	75	87
Datos técnicos de la turbina de vapor			
Tipo contrapresión	-	-	-
Eficiencia Total ^e	%	75	84
Presión del vapor a la salida de la caldera	MPa	8	8
Temperatura del vapor a la salida de la caldera	°C	500	500
Temperatura ambiente	°C	25	25
Presión ambiente	MPa	0,1	0,1

Notas.

^a Referido por (Souza Santos, 1997)

^b El cálculo térmico de la turbina de gas fue realizado con programas TURGAS desarrollado por la EFEI en 1998. Para ver sus principios fundamentales puede consultar (Barros, 1998).

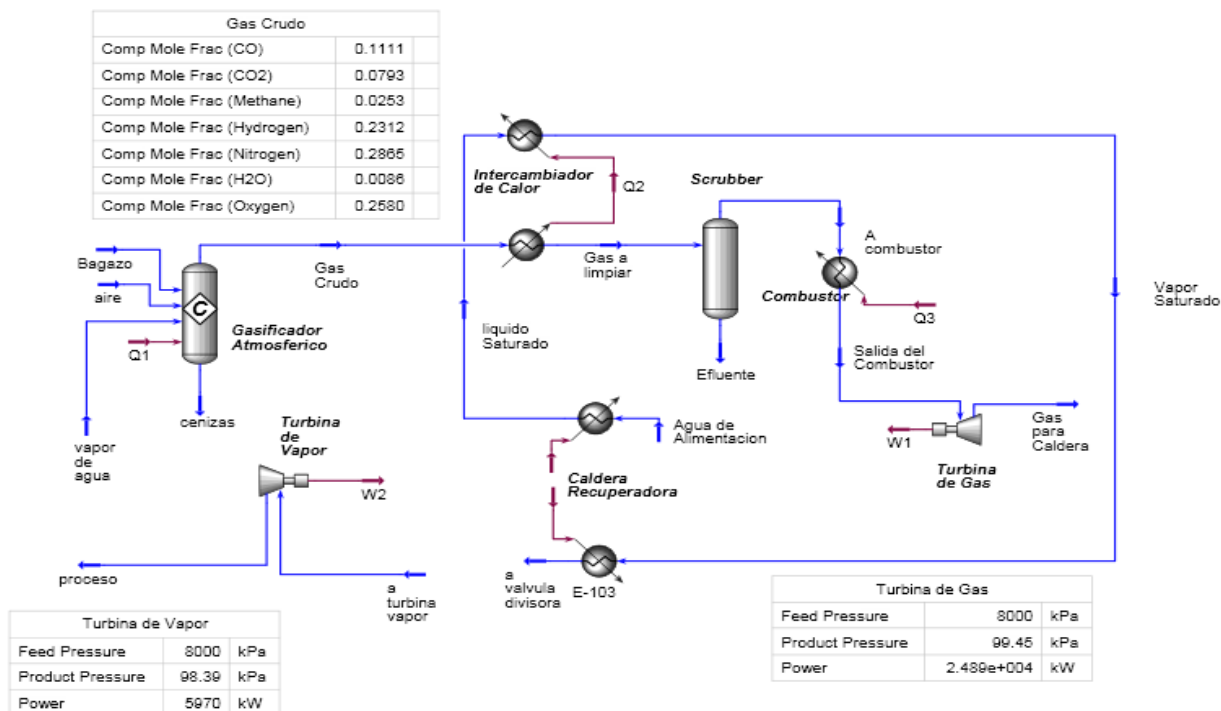
^c Referido por (TurboMachinery Handbook, 1995).

^d Consonni and Larson, (1996).

^e David Brown, Martin Gassner, (2007).

En la Figura 6 muestra el esquema de la tecnología (BIG/GT) simulada en el programa de Hysys 3.2, los valores calculados por la simulación se encuentran en la Tabla 7 (Valor estimado); se obtuvieron las fracciones molares del gas de gasificación de la biomasa de caña que al ser comparados con los valores teóricos, encontramos una relación semejante entre la simulación y los datos referenciados en esta tabla. En la Tabla 12 Anexos se encuentran valores de presión, temperatura y flujo que se corresponden con los puntos de la Figura 5, encontrados mediante la simulación.

Figura 6. Simulación de gasificador con ciclo combinado. Hysys 3.2.



Costo de Inversión total de la tecnología BIG/GT

Los costos del equipo fundamental de gasificación con base al flujo de biomasa residual de caña de azúcar de 10.33 kg/s (bagazo 20% humedad) por economías de escala.

Tabla 8. Costos de equipos

Equipos	Costo (Millones US\$)
Transportadores	0.38
Rejilla	0.41
Sistema de alimentación	0.37
Gasificador	3.2
Ciclones	2.54
Gas de refrigeración	3.1
Condensación depurador	1.6

Compresor (2)	3
Intercambiador de calor	3.2
Total Equipos Gasificación	17.8

Teniendo en cuenta que se tienen los costos de los equipos de gasificación mostrados en la Tabla 8 y para obtener el costo del equipo fundamental de la tecnología de gasificación con BIG/GT, se tendrían en cuenta los siguientes equipos: Turbina de gas (GE LM2500-PH ó PG6101 (FA)) [16], turbina de vapor, caldera recuperadora (HSRG); para el costo de inversión total se toma el valor reportado de 1400 US\$/Kw inst para una planta de 50 MW [12].

El equipo fundamental haría parte del 40% de la Inversión Directa de la planta [10] estos equipos tendrían un costo de US\$ 6.000.000.

La tecnología BIG/GT referencia una producción de energía de 275 Kwh/tc [4,5], para la producción de los 50Mw son necesarios 200 tc/h (60 t/h de bagazo, humedad 50% [11]) para el proceso de molienda de caña de azúcar.

Calculando la Inversión fija de la planta.

Inversión fija (I_F)= Inversión Directa (I_D) + Inversión Indirecta ($I_{Indirecta}$)

Porcentajes típicos y ecuaciones para calcular la inversión total de la planta [10].

% If	I. Directa	Precio (USD \$)
40	Valor de compra de equipo fundamental	23.800.000
6	Instalación de Equipo fundamental	3.570.000
2	Instrumentación y Control	1.190.000
6	Tuberías y accesorios	3.570.000
4	Equipos y materiales eléctricos	2.380.000
8	Edificación	4.760.000
3	Adecuación de terrenos	1.785.000
8	Servicios	4.760.000

1	Terreno	595.000
% If	I. Indirecta	Precio (USD \$)
6	Ingeniería y supervisión	4.760.000
10	Gastos de construcción	5.950.000
6	Imprevistos	3.570.000

Siendo:

$$I_{fija} = I_{Directa} + I_{Indirecta}; \quad I_{Trabajo} = (I_{fija} * 15) / 88; \quad I_{Fisica} = I_{Total} * 0,68$$

Calculando la Inversión Total

Inversión Total (I_T) = Inversión Fija (I_F) + Inversión de Trabajo (I_W)

Costo de inversión de una planta de cogeneración mediante la tecnología de Ciclo BIG/GT en la industria azucarera en dólares para el año 2003.

Inversión Fija	10.500.000
Inversión de Trabajo	59.500.000
<i>Inversión Total</i>	<i>70.000.000</i>

De acuerdo al Plant Cost Index

El costo total de una planta BIG/GT para el 2003 será de USD\$ 70.000.000, este valor es llevado al costo en el 2007 por los índices que para el año 2003 es 402 y para el año 2007 es 525.

$$\text{Costo Presente} = \text{Costo original} * \left(\frac{\text{Valor del índice en tiempo presente}}{\text{Valor del índice original del costo}} \right)$$

Fuente: Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus., *Plant desing and economics for chemical engineers*, 4 Ed, p. 164.

La inversión total de una planta de cogeneración con ciclo combinado (BIG/GT) para el año 2007 será de USD\$ 92.803.030.

El ciclo BIG/GT puede tener eficiencias alrededor de 45% para potencias entre 30-50 Mw [16].

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta la concentración de Biomasa Residual de caña de Azúcar y su elevado Potencial Energético se seleccionó el municipio de Palmira, en el Valle del Cauca, como la zona más apta para el montaje de una planta de aprovechamiento energético de este tipo de residuo.

Con base en los criterios de Eficiencia, Madurez Tecnológica y Costos de instalación, para el aprovechamiento energético de los residuos de RAC y RAI de la caña de azúcar se seleccionó como tecnología más prometedora y adecuada un Gasificador para Biomasa Integrado a una Turbina de Gas, (Biomasa Integrated Gasifier/Gas Turbine), conocido como el ciclo BIG/GT.

La evaluación de la producción de gas con el ciclo BIG/GT a partir de la biomasa residual de la caña de azúcar, se llevó a cabo en el software Hysys 3.2. La calidad del gas producido y la eficiencia del ciclo son afectadas por el tipo de agente gasificante que se utilice. Al utilizar aire seco, se obtuvo un gas con una fracción molar de hidrogeno (H_2) mínima y por ello su poder calorífico muy bajo. Por el contrario la mezcla aire-vapor de agua produjo un gas (con fracciones molares de CO 0.11, CO_2 0.793, CH_4 0.253, H_2 0.2312, O_2 0.258, N_2 0.286, H_2O 0.0086) cuyo poder calórico 12 MJ/Nm^3 .

El ciclo BIG/GT propuesto en este trabajo, para la producción de gas a partir de biomasa de caña, es una alternativa a plantear y desarrollar a futuro como alternativa tecnológica para la producción de energía en los ingenios azucareros de Colombia.

RECOMENDACIONES

Es apropiado utilizar vapor de agua y aire como agentes gasificantes en el gasificador de lecho fluidizado circulante, ya que este aumenta el poder calorífico del gas de salida entre 10-12 MJ/Nm³.

Las turbinas de gas son proyectadas para operar con gas natural que posee un poder calorífico 35 a 40 MJ/Nm³ mayor al poder calorífico del gas producto de la gasificación de biomasa residual de caña (10 a 12 MJ/Nm³), esta disminución tan brusca del valor calórico necesitara ciertas modificaciones en la cámara de combustión, que deberá ser adaptada para poder trasegar un mayor flujo de gas, con el objetivo de garantizar un equivalente energético con relación al gas natural.

La humedad de la biomasa de caña esta en el orden del 50% de su composición en masa, lo que necesita ser reducido para obtener un gas de mayor calidad energética en el proceso de gasificación, es recomendable operar el Gasificador con una humedad menor al 20%.

Es necesario un estudio detallado del sistema de limpieza de gases ya que durante los procesos de termoconversión energética (gasificación/combustión), se produce emisiones de partículas, alquitranes y álcalis los cuales provocarían a largo plazo la erosión, corrosión y deposición en los alabes de la turbina, por estas causas se incrementa los costos de operación y mantenimiento disminuyendo la eficiencia de la turbomaquina.

El uso del combustible residual vegetal de caña de azúcar conformado por el RAC y RAI en donde el RAC por sus altos costos de transporte a causa de su baja densidad hacen que el uso del RAI como combustible sea este el adecuado o el más conveniente para su aprovechamiento energético.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ELECTO SILVA L., GLAUCO SANCHEZ L. *La gasificación del bagazo de caña*. Carta Trimestral., Vol. 1, pág. 349 - 373. (1994).
- [2] BRICEÑO BELTRÁN C. *Cogeneración industrial para el sector azucarero colombiano introduciendo y aplicando el enfoque ESCO*. Carta trimestral., Vol 2 y 3, pág. 12-14. (1998).
- [3] EFECTO SILVA L., PONCE F. *Gasificación y ciclos combinados: perspectivas para la cogeneración en la industria azucarera*. Carta Trimestral., Vol 3, pág. 8-52. (2002).
- [4] BETANCOURT MENA J., PÉREZ BERMÚDE R. *Principales aspectos medioambientales y económicos de la cogeneración en la industria azucarera*. Centro Azúcar., Vol. 30, N° 3, pág. 87-95. (2003).
- [5] KONG WIN C., LAU AH W., WONG SAK H. *Baggasse gasification technologies for electricity production in the sugar industry*. Zuckerindustrie., Vol. 125, pág. 783-786. (2000).
- [6] TOOLSEERAM RAMJEAWON A. *Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius*. Journal of Cleaner Production xx., pág. 1-8. (2007).
- [7] DAI XIANWEN, WU CHUANGZHI, LI HAIBIN. *The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB Reactor*. Energy & Fuels., Vol. 14, pág. 552-557. (2000)
- [8] INOCENCIO R., SÁNCHEZ D., ÁLVAREZ M. *Valoración Crítica de un estudio de caso de cogeneración eléctrica en la industria azucarera cubana*. Cubana de Cienc. Agric., Vol. 28, N° 75, pag. 63-68. (1998).
- [9] BELGIORNO V., DE FEO G., DELLA ROCCA C. *Energy from gasification of solid wastes*. Waste Management., Vol. 23, pág. 1–15. (2003).
- [10] MAX PETERS S., KLAUS TIMMERHAUS D. *Plant desing and economics for chemical engineers*. 4 Ed., pág. 150-180.

- [11] HOBSON P., JOYCE J. *Simulation and design of a bagasse gasifier*. International Sugar Journal., Vol.110, N° 1309, pag.13-20. (2008).
- [12] RODRIGUEZ M., ANDRE FAAIJ P. *Techno-economic analysis of co-fired biomass integrated gasification/combined cycle systems with inclusion of economies of scale*. Energy., Vol. 28, pág. 1229-1258. (2003).
- [13] TURN S. *Biomass integrated gasifier combined cycle technology: application in the cane sugar industry*. International Sugar Journal. Worldwide Edition., Vol 101, N° 1205, pág. 267-268, 270-272. (2000).
- [14] ALONSO PIPPO W., GARZONE P. *Agro-industry sugarcane residues disposal: The trends of their conversion into energy carriers in Cuba*. Waste Management., Vol. 27, pág. 869-885. (2007)
- [15] RODRIGUEZ M. *Evaluation of atmospheric biomass integrated gasifier combined cycles systems under different strategies for the use of low calorific*. Energy Conversion and Management., Vol. 48, pág. 1289-1301. (2006).
- [16] RODRIGUEZ M., WALTER A. *Co-firing of natural gas and biomass gas in biomass integrated gasification/combined cycle systems*. Energy., Vol. 28, pág. 1115-1131. (2003).
- [17] POSADA CONTRERAS. *Aproximación a los costos de cogeneración de energía en ingenios azucareros. Análisis comparativos Colombia-Nicaragua*. Carta Trimestral., Vol. 25, N° 1, pág.16-19. (2003).
- [18] IBARRA L., ARRIOLA MEDELLÍN A. *Energy analysis of the sugar production process using modern techniques of process integration*. Zuckerindustrie., Vol.126, N° 9, pág. 707-713. (2001).
- [19] SCOTT TURN Q., RICHARD BAIN L. *Biomass gasification for combined heat and power in the cane sugar industry*. INT. Sugar JNL., Vol.104, N°1242, pag. 83 – 91. (2002).
- [20] DAVID BROWN, GASSNER. *Economic analysis for the optimal conceptual desing of biomass gasification energy conversión systems*. pág. 85- 93. (2007).
- [21] KLIMANTOS P., KOUKOUZAS N. *Air-blown biomass gasification combined cycles: System analysis and economic assessment*. Energy., pág. 20 -38. (2007).

- [22] TOOLSEERAM RAMJEAWON. *Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius*. Journal of cleaner production xx., pág. 1-8. (2007).
- [23] ESCALANTE H., Viña F. *Potencial energético de la biomasa residual vegetal (BRV) del sector arrocero en Colombia*. Ponencia Brasil., CEIAM. (2008).

ANEXOS

Anexo A. Modelo del Potencial Energético (PE)

Para evaluar el PE de los RAC y RAI de la caña de azúcar en Colombia, en el presente análisis se plantea un modelo matemático en función de: la masa de residuo y su contenido energético, así.

$$PE = Masa_{Residuo-seco} \cdot Contenido\ Energético_{Residuo}$$

Para evaluar el PE, como primer paso se debe cuantificar la biomasa residual y para esto se tiene que la masa de residuo seco es función de: el área cosechada (A), el rendimiento del cultivo (Re), la cantidad de residuos generados (f_{p-s}) y del contenido de humedad (f_{hi}).

Por consiguiente la masa de residuo de puede expresar como:

$$Masa_{Residuo-seco} = A \cdot Re \cdot f_{p-s} \cdot f_h$$

En el modelo, el Poder calorífico inferior (PCI), se ha incluido para evaluar el contenido energético del residuo el PCI (KJ/ton de residuo seco), que puede obtenerse experimentalmente o teóricamente. En el laboratorio se Utilizo una bomba calorimétrica para medir el PCI. A nivel teórico por ejemplo se puede utilizar la correlación propuesta por [CHANGDONG et al, 2002], que se basa en el análisis próximo del combustible.

Por lo anterior el modelo propuesto en este estudio, para evaluar el PE se estructura así:

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

En el ejemplo de la caña de azúcar, para la evaluar el PE, se identificaron dos residuos de interés energético: la paja y el bagazo; los cuales corresponden al RAC y RAI respectivamente.

Por lo anterior, en la ecuación 2 el contador k hace referencia a los dos grupos de residuos considerados; mientras que el contador i se refiere a cada de los residuos identificados y que pertenecen a cada unos los grupos.

Tabla 9.

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

Se planteó la ecuación (3) para evaluar el P.E individual de los "n" RAC ó de los "n" RAI identificados para el cultivo de caña y así conocer su participación en el P.E. total departamental ofreciendo una información mas detallada y con mayor

precisión, que puede ser usada en la ejecución los planes de aprovechamiento de residuos de caña de azúcar.

$$P E_{RAC - RAI} = A \cdot R e \cdot \sum_{i=1}^n f_{p-e_i} \cdot fh_i \cdot P C I_i \quad (3)$$

Para el cálculo del P.E. de la B.R.V. del cultivo de Caña de Azúcar de se utilizó información secundaria, referente a áreas cosechadas, volúmenes de producción y rendimiento de los departamentos de Colombia. La información fue suministrada por el Ministerio de Agricultura de Colombia, en una base de datos alfanumérica con la cual se desarrollo el Anuario Estadístico del Sector Agropecuario 2006. El cálculo del PE se hizo a nivel departamental, anual y mensual. Adicionalmente se contó con información referente al comportamiento histórico del cultivo de caña de azúcar, en los últimos 15 años.

Anexo B. Características fisicoquímicas de la biomasa de caña de azúcar.

Los componentes de las cenizas varían en cantidad dentro de estrechos límites, de acuerdo al terreno, tipo de abono y variedad de la caña.

Tabla 10. Análisis último de residuos de cosecha y bagazo de caña de azúcar (% en peso).

Wt% - Seco	Bagazo ^a	RAC ^b
Carbón	49,5	47,4
Hidrogeno	6,4	5,9
Oxigeno	43,28	44,0
Nitrógeno	-	-
Azufre	0,02	0,1
Cenizas	0,8	2,6
LHV (MJ/Kg) ^c	19.385	15.923

^a Walter et al. [14,15].

^b COPERSUGAR. [15].

^c Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual de Colombia, 2006. CEIAM.

Anexo C. Análisis estadístico departamental.

Para la realización de la ubicación de la planta se tomaron los 5 departamentos con mejor PE multianual y cantidad de biomasa multianual presentados en las Figuras 7a y 7b.

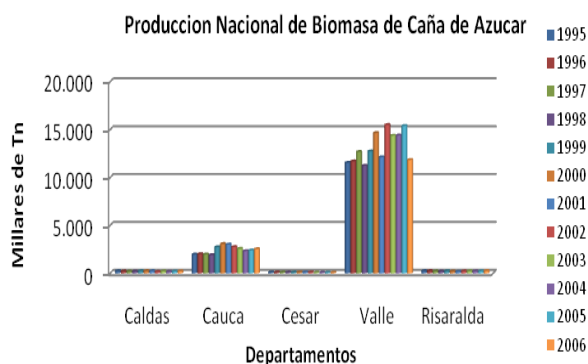


Figura 7a. Producción Nacional

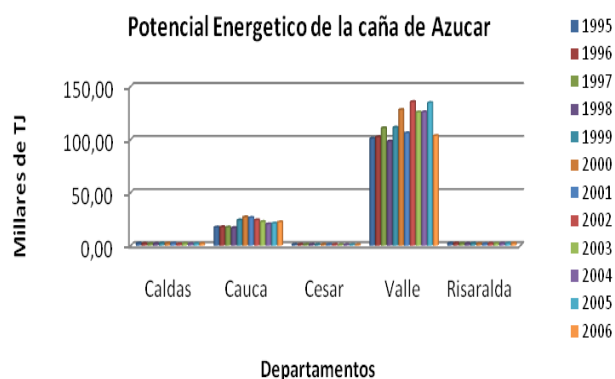


Figura 7b. Potencial Nacional

Análisis estadístico municipal.

En la siguiente tabla se muestra los municipios del valle del cauca con mayor producción de biomasa residual vegetal de caña de azúcar en forma ascendente.

Tabla 11. Municipios con su respectivo potencial Energético de la zona de Valle del Cauca

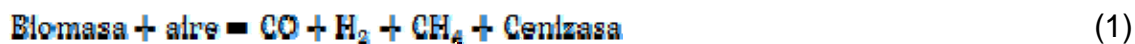
Municipio	Á. Cosec	Producc	Rend	Potencial TJ	Densi TJ/Ha	C. de Residuo Ton	(A*Re)	Pot (TJ/año)
Yumbo	1.256	13.817	11,0	637,26	0,51	82.072,98	13.817	7,86E+02
Roldanillo	1.319	18.463	14,0	851,53	0,65	109.670,2	18.463	1,05E+03
Ansermanue	2.023	25.186	12,4	1161,61	0,57	149.604,8	25.186	1,43E+03
Obando	2.100	23.516	11,2	1084,58	0,52	139.685,0	23.516	1,34E+03

Ginebra	2.314	30.453	13,1	1404,53	0,61	180.890,8	30.453	1,73E+03
Cartago	2.400	26.200	10,9	1208,37	0,50	155.628,0	26.200	1,49E+03
Yotoco	2.581	30.970	12,0	1428,37	0,55	183.961,8	30.970	1,76E+03
Cali	4.990	54.893	11,0	2531,73	0,51	326.064,4	54.893	3,12E+03
Andalucía	5.329	57.556	10,8	2654,55	0,50	341.882,6	57.556	3,27E+03
Jamundi	5.613	56.906	10,1	2624,57	0,47	338.021,6	56.906	3,24E+03
Guadalajara	6.555	74.000	11,2	3412,96	0,52	439.560,0	74.000	4,21E+03
Zarzal	8.264	107.425	13,0	4954,56	0,60	638.104,5	107.425	6,11E+03
Bugalagrande	9.448	113.374	12,0	5228,93	0,55	673.441,5	113.374	6,45E+03
Guacari	9.494	113.922	12,0	5254,21	0,55	676.696,6	113.922	6,48E+03
Pradera	9.988	134.857	13,5	6219,75	0,62	801.050,5	134.857	7,67E+03
Florida	10.656	131.067	12,3	6044,95	0,57	778.537,9	131.067	7,45E+03
Tulua	11.360	144.954	12,7	6685,44	0,59	861.026,7	144.954	8,24E+03
El cerrito	12.143	171.284	14,1	7899,81	0,65	1.017.426	171.284	9,74E+03
Candelaria	18.656	255.214	13,6	11770,7	0,63	1.555.971	255.214	1,45E+04
Palmira	30.405	416.616	13,7	19214,7	0,63	2.474.699	416.616	2,37E+04

Anexo D. Reacciones en un proceso de gasificación con biomasa.

En dependencia de la organización del proceso de gasificación (movimiento relativo de la biomasa y el gas) estas etapas transcurren en diferentes regiones del gasificador, o en todo su volumen de manera simultánea. A continuación se presentan las reacciones químicas más importantes de cada una de estas etapas. [14,16].

I. Pirolisis.

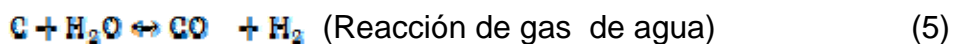


II. Oxidación del carbono

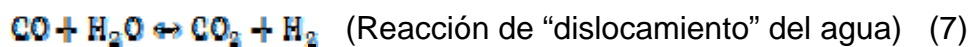


III. Gasificación

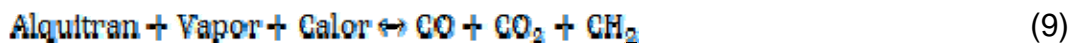
- Reacciones heterogéneas



- Reacciones Homogéneas.



IV. Craqueo del alquitrán.



V. Oxidación parcial de los productos de la pirolisis



Como se planteo, las ecuaciones presentadas están lejos de reflejar la complejidad de los procesos que ocurren durante la gasificación de biomasa. Sin embargo en base a ellas se tiene dos conclusiones.

- La adición de vapor de agua al aire de gasificación, en la práctica hasta de un 30% aumenta el contenido de hidrogeno y de monóxido de carbono en el gas obtenido, como se puede concluir de las ecuaciones 5 y 7.
- El aumento de la presión favorece la formación de metano, según la ecuación 6, por causa de la disminución del número de moles al pasar de los reactivos a los productos.

Anexo E. Determinación de los costos y diseño conceptual.

La siguiente tabla nos muestra los datos de presión, temperatura y flujo que fueron resultado de la simulación en software hysys 3.2 y representas las corrientes de la Figura 8 que contiene el ciclo BIG/GT.

Tabla 12. Caracterización de los parámetros para el ciclo BIG/GT.

Costos del Diseño Conceptual

Relación entre costos y capacidad.

Según (Faaij A, Meuleman B, 1998) dieron los datos de los costos por componente de una planta de sistema BIG / CC de 30 MWe [12].

La relación general entre los costes y la capacidad viene dada por la ecuación

Punto	Tipo	Presión	Temperatura	Flujo
		MPa	°C	Kg/s
1	Bagazo (50%)	1,48	30	16,53
2	Bagazo (20%)	1,48	70	10,33
3	Gas crudo. [12].	1,480	900	23,36
4	Gas limpio	1,48	400	18,38
5	Aire	1,48	25	26,83
6	Gas combustión. [5].	0,995	525	45,21
7	Gas combustión	0,995	225	45,21
8	Líquido saturado. [16].	8	296	8,13
9	Vapor saturado. [16].	8	296	8,13
10	Agua	10	78	14,24
11	Vapor	8	500	14,24
12	Vapor	0,98	110	14,24

siguiente:

$$\text{COST}_{\text{Size2}}/\text{COST}_{\text{Size1}} = [\text{SIZE}_2/\text{SIZE}_1]^R$$

Donde:

El $\text{COST}_{\text{Size1}}$ es el costo base, para este costo se conocen los valores (Tabla 13, Anexos), $\text{COST}_{\text{Size2}}$ es el que va hacer calculado, SIZE_2 es el flujo másico de alimentación de biomasa al sistema, SIZE_1 es el flujo másico base (*es decir, 8,4 kg / s de la madera*). [12].

Tabla 13.

Cost of the biomass equipment (base values for a first generation BIG/CC system) and applicable scale factors per component used for further model calculations

Equipment	Base system costs (Million US\$)	Scale factor (R)
Conveyers	0.32	0.8
Grid	0.36	0.6
Dryer	6.7	0.8
Iron removal	0.28	0.7
Feeding system: (2 screws)	0.32	0.7
Tar cracker	2.8	0.7
Gasifier	2.8	0.7
Cyclones	2.2	0.7
Gas cooling	2.6	0.7
Baghouse filter	2.2	0.65
Condensing scrubber	1.4	0.7
Compressor	2.17	0.85
Gas/gas heat exchanger	2.8	0.7
Equipment of gasification	26.9	

Expected costs for the short term in million dollars.

Anexo F. Ubicación Geográfica de Palmira

Palmira está ubicada en el Valle geográfico del Río Cauca al sur occidente de Colombia, cerca de Buenaventura principal Puerto sobre el Pacífico Colombiano. Es la segunda ciudad del Departamento del Valle del Cauca, limita al Norte con el Municipio del Cerrito, al Este con el Departamento del Tolima, al Sur con los Municipios de Pradera y Candelaria y al Oeste con las ciudades de Cali y Yumbo.

El área municipal es de 1.162 Kilómetros cuadrados de los cuales 28.79 Kilómetros cuadrados corresponden a la zona urbana; su temperatura media es de 23 Grados centígrados y su altura sobre el nivel del mar es de 1,001 metros.

Ventajas Geográficas

Palmira se encuentra a 3 horas de Buenaventura, principal Puerto del Pacífico Colombiano donde se maneja el 70% del comercio internacional del país. Se encuentra contigua al Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón. Está a 26 kilómetros de la ciudad de Cali, Capital del Valle del Cauca a 30 kilómetros de la ciudad de Yumbo Centro Industrial del Occidente Colombiano y cuenta con un corredor férreo que conecta directamente la ciudad con el Pacífico.

Infraestructura

TERRESTRE: Las condiciones óptimas de localización del Municipio le permiten la comunicación vial con el Centro, Norte, Sur y Occidente del país y la potencialidad de comunicación terrestre con el oriente a través de los Departamentos del Tolima y Huila. Palmira con sus vías terrestres de acceso logra fácilmente realizar su intercambio mercantil ágil y oportuno, el cual se fortalece a nivel internacional con la cercanía al Puerto de Buenaventura. AEREA: El Municipio de Palmira cuenta en su jurisdicción con el Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón, ubicado a

cinco minutos de la ciudad. **TRANSPORTE DE PASAJEROS:** Las características especiales de la ciudad son: Topografía plana y su reducida área urbana facilita la movilización de las personas ya sea a través de buses de servicio público, el servicio de taxis, coches (victorias) y el transporte popular de la bicicleta. La cabecera del Municipio está comunicada con el área rural por medio de una red vial que permite la integración de los corregimientos y la movilización de las personas hacia la ciudad, a través de varias empresas de transporte de pasajeros y carga. A nivel Intermunicipal cuenta con varias empresas de buses para el transporte de pasajeros localizadas en la ciudad, además de las empresas que tienen rutas a nivel nacional y se dirigen a otras ciudades del País. Para el transporte de carga se cuenta con numerosas empresas que prestan el servicio a nivel regional y nacional.

Zonas Francas

En la jurisdicción de la ciudad de Palmira están ubicadas las dos Zonas Francas más importantes del Sur Occidente Colombiano: Zona Franca Industrial de Bienes y Servicios Palmaseca S.A. y Zona Franca del Pacífico S.A., creadas como áreas específicas sometidas a un régimen especial para promover el Comercio Exterior ya que facilitan la importación y exportación de mercancías. Estas dos Zonas Francas poseen una adecuada infraestructura y logística que les permiten ofrecer al empresario nacional e internacional un variado grupo de servicios y de ventajas comparativas y competitivas.

La malla vial nacional está conformada por:

- Recta Cali – Palmira
- Vía Panamericana, tramo El Cerrito – Candelaria, que incluye la variante de Palmira.

- Vía El Cerrito – La Acequia – La Torre – Zona Franca del Pacífico que incluye la marginal del Guachal.
- Vía La Torre - Mulaló.
- Vía Cencar – Varela – Obando.
- Vía Aeropuerto – Recta Cali – Palmira – y su continuación a Cavasa.

La red férrea está conformada por:

- Ramal Cali – Palmira – El Cerrito

