



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “BALANCE EXERGÉTICO E INSTRUMENTACIÓN DEL
PROCESO DE GASIFICACIÓN, PARA UN EQUIPO TIPO
DOWNDRAFT DE 30 KW”.**

AUTOR: YANCHAPAXI MENDOZA EDER FERNANDO

DIRECTOR: ING. ROBERTO GUTIERREZ

CODIRECTOR: ING. ÁNGELO VILLAVICENCIO

SANGOLQUÍ 2015

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto "BALANCE EXERGÉTICO E INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN, PARA UN EQUIPO TIPO DOWNDRAFT DE 30 KW" fue realizado en su totalidad por Eder Fernando Yanchapaxi Mendoza, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.



Ing. Eduardo Gutiérrez
DIRECTOR



Ing. Angelo Villavicencio
CODIRECTOR

Sangolquí, Mayo-2015

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Eder Fernando Yanchapaxi Mendoza con cédula de ciudadanía N° 171814028-6, certifico que el tema de tesis "**BALANCE EXERGÉTICO E INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN, PARA UN EQUIPO TIPO DOWNDRAFT DE 30 KW**", es de mi autoría.



Sr. Eder Fernando Yanchapaxi Mendoza

Sangolqui, Mayo-2015

AUTORIZACIÓN

Yo, Eder Fernando Yanchapaxi Mendoza con cédula de ciudadanía N° 171814028-6, autorizo a la biblioteca virtual de la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS para que publique mi tema de tesis **“BALANCE EXERGÉTICO E INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN, PARA UN EQUIPO TIPO DOWNDRAFT DE 30 KW”**.



Sr. Eder Fernando Yanchapaxi Mendoza

Sangolquí, Mayo-2015

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza e inteligencia para culminar esta meta, a mi padre Fernando Yanchapaxi y mi madre Elba Mendoza quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanos y familia en general. Los amo con mi vida.

A mis hermanos Vladimir, Joshimar y Jennifer porque son parte importante en mi vida y quiero ser su ejemplo para que culminen también sus carreras profesionales que es la mejor herencia que nos pueden dejar nuestros queridos padres.

A mi novia María José García, por estar siempre pendiente del desarrollo de este proyecto de grado dándome su apoyo y ánimos para sacarlo adelante.

Para culminar quiero dedicar ésta tesis a mi Director, Ing. Eduardo Gutiérrez por sus cualidades íntegras como persona y profesional, así mismo a mi Codirector Ing. Ángelo Villavicencio por su conocimiento y gran apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Eder Fernando

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado salud y vida a lo largo de mi carrera universitaria, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres Fernando y Elba, por los valores inculcados, por darme la oportunidad de ser un profesional y sobre todo les agradezco por todo su amor y buenos modales inculcados para ser quien soy ahora.

De igual manera quiero agradecer a mi Director de Tesis, Ing. Eduardo Gutiérrez, por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida en el campo laboral, de igual manera a mi Codirector, Ing. Ángelo Villavicencio por la rectitud en su profesión como docente, por los consejos y conocimientos compartidos en el desarrollo de este proyecto.

Muchísimas gracias de todo corazón a estas personas, ustedes son la base de este proyecto.

Eder Fernando

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CAPITULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	3
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5. ALCANCE.....	4
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. RECURSO ENERGÉTICO BIOMÁSICO EN EL ECUADOR.....	6
2.2. TIPOS DE BIOMASA.....	11
2.2.1. Características de la biomasa	15
2.2.2. Usos de la biomasa en la industria.....	17
2.3. BIOMASA AGRÍCOLA A SER GASIFICADA.....	19

2.3.1. Bagazo de Cacao.....	19
2.3.2. Bambú.....	20
2.3.3. Cascarilla de café.....	21
2.4. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA.....	22
2.4.1. Procesos Termoquímicos.....	23
2.4.2. Procesos Bioquímicos.....	25
2.5. EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	26
2.5.1. El Agente Gasificante.....	29
2.5.2. Factores que intervienen en la Gasificación.....	30
2.6. TIPOS DE GASIFICADORES.....	32
2.6.1. Gasificador Updraft.....	32
2.6.2. Gasificador Downdraft.....	33
2.6.3. Gasificador de lecho fluidizado.....	35
2.7. CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA.....	36
2.7.1. Análisis elemental.....	37
2.7.2. Análisis inmediato.....	38
CAPITULO III.....	40
INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO.....	40
3.1. LEVANTAMIENTO TÉCNICO DE LA PLANTA PILOTO DE GASIFICACIÓN.....	40
3.1.1. Layout de la planta de gasificación.....	42
3.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	42
3.2.1. Temperatura.....	42
3.2.2. Flujo de aire total.....	43
3.2.3. Presión.....	43

3.3. INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.	44
3.3.1. Medidores de temperatura	44
3.3.2. Medidores de caudal	46
3.3.3. Medidor de presión.....	47
3.3.4. Medidor de humedad	48
3.3.5. Sensor de nivel de combustible	48
3.4. IMPLEMENTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.	49
3.5. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS.....	50
3.5.1. Matriz de funcionamiento del equipo.....	50
3.5.2. Manual de operación.....	51
3.5.3. Programa de mantenimiento del Gasificador	51
CAPÍTULO IV.....	52
ANÁLISIS DE EXERGÍA DEL SISTEMA.	52
4.1. VARIABLES DEL PROCESO.....	53
4.1.1. Variables de entrada	53
4.1.2. Variables de salida.....	54
4.2. BALANCE EXERGÉTICO.....	56
4.2.1. Balance de masa.....	56
4.2.2. Cálculo de flujo másico	59
4.2.3. Calor perdido a los alrededores.	62
4.2.4. Potencia térmica real de salida	66
4.2.5. Salida de potencia térmica máxima.....	70
4.2.6. Eficiencia del Gasificador	71
4.3. PERDIDAS DE EXERGIA DEL SISTEMA.....	72
4.3.1. Irreversibilidades o exergía destruida.....	72

4.3.2. Exergía del flujo de salida	73
4.4. DIAGRAMA DE FLUJO EXERGÉTICO DEL SISTEMA.	73
CAPITULO V.....	75
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	75
5.1. APLICACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	75
5.1.1. Temperatura de Gasificación	75
5.1.2. Flujo de aire total del proceso	77
5.1.3. Presión en el filtro granular.	80
5.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	82
5.2.1. Resultados del balance exergético.....	82
5.2.2. Resultados del análisis de cromatografía de gases	85
VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	86
6.1. Análisis económico.	86
6.1.1. Costos directos.....	86
6.1.2. Costos indirectos.....	87
6.1.3. Misceláneos	87
6.1.4. Costo total del proyecto.....	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
7.1. CONCLUSIONES.....	89
7.2. RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXOS.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Materias primas y productos finales de la gasificación	2
Figura 2. Producción agrícola de la región costa del Ecuador	10
Figura 3. Producción agrícola de la región sierra del Ecuador	10
Figura 4. Producción agrícola de la región amazónica del Ecuador	11
Figura 5. Jacinto de agua	12
Figura 6. Desechos de madera.....	13
Figura 7. Desechos agrícolas	14
Figura 8. Bagazo de cacao	19
Figura 9. Bambú “Dendrocalamus Asper”	21
Figura 10. Cascarilla de café	22
Figura 11. Reacciones estequiométricas en el proceso de gasificación	29
Figura 12. Zonas de reacción para un Gasificador tipo Updraft.....	33
Figura 13. Zona de reacción para un Gasificador tipo Downdraft.....	34
Figura 14. Gasificador de lecho fluidizado	35
Figura 15. Diagrama esquemático de la planta de gasificación	41
Figura 16. Termocupla tipo K.....	45
Figura 17. Manómetro de agua para medir flujo de caudal.....	46
Figura 18. Manómetro de agua para medir presión del Gasificador y filtro.....	47
Figura 19. Medidor de humedad	48
Figura 20. Sensor de nivel	48

Figura 22. Medición cantidad de cenizas	55
Figura 23. Medición de alquitrán producido en la gasificación.....	55
Figura 24. Esquema balance de masa en el Gasificador.....	56
Figura 25. Diagrama de flujo exergético del sistema	74
Figura 26. Temperatura vs. Tiempo de gasificación. (Café)	76
Figura 27. Temperatura vs. Tiempo de gasificación. (Cacao)	76
Figura 28. Temperatura vs. Tiempo de gasificación. (Bambú)	76
Figura 29. Temperatura final del proceso vs. Flujo de aire total. (Café)	78
Figura 30. Temperatura final del proceso vs. Flujo de aire total. (Cacao).....	79
Figura 31. Temperatura final del proceso vs. Flujo de aire total. (Bambú).....	79
Figura 32. Temperatura vs. Presión en el reactor. (Café).....	81
Figura 33. Temperatura vs. Presión en el reactor. (Cacao)	81
Figura 34. Temperatura vs. Presión en el reactor. (Bambú)	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. “Uso del suelo, superficie y número de UPAs”	8
Tabla 2. Cantidad de unidades productivas y hectáreas ocupadas	9
Tabla 3. Composición del gas de síntesis según la naturaleza del agente gasificante.....	30
Tabla 4. Ventajas y desventajas de cada tipo de Gasificador.....	36
Tabla 5. Especificaciones técnicas de los equipos.	41
Tabla 6. Rango manómetros de agua colocados en el Gasificador.....	46
Tabla 7. Rango manómetros de agua para medir la presión	47
Tabla 8. Sensores instalados en el Gasificador	49
Tabla 9. Matriz operacional del sistema.....	50
Tabla 10. Composición elemental en base seca de las biomásas utilizadas	53
Tabla 11. Poder calórico inferior d las biomásas utilizadas	54
Tabla 12. Guía para pruebas del Gasificador	57
Tabla 13. Datos de la entrada de aire al Gasificador	58
Tabla 14. Poder calorífico del gas de Síntesis	63
Tabla 15. Presión y temperatura del gas a la salida del intercambiador.....	66
Tabla 16. Temperaturas y tiempos en las distintas zonas de gasificación.....	75
Tabla 17. Temperatura final en las distintas zonas del Gasificador respecto al flujo de aire total	78

Tabla 18. Variación de temperatura a la entrada y salida del intercambiador de calor respecto a la presión en el reactor	80
Tabla 19. Resultado de balance de masa en el Gasificador	82
Tabla 20. Resultados del Balance exergético en el Gasificador	82
Tabla 21. Resultados de irreversibilidades y exergía del flujo de salida	83
Tabla 22. Resultados de eficiencia del Gasificador según la relación de aire ..	83
Tabla 23. Resultados de eficiencia en el Gasificador según porcentaje de humedad y poder calórico de la bioma utilizada	83
Tabla 24. Resultado del tiempo de arranque del proceso de gasificación según el porcentaje de humedad y el tamaño de partícula de la biomasa	84
Tabla 25. Materiales, equipos y mano de obra	86
Tabla 26. Materiales, equipos y herramientas	87
Tabla 27. Otros costos indirectos.....	87
Tabla 28. Total del proyecto	88

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1 Reacción exotérmica.....	28
Ec. 2 Reacción exotérmica.....	28
Ec. 3 Reacción endotérmica.....	28
Ec. 4 Reacción endotérmica.....	28
Ec. 5 Reacción endotérmica.....	28
Ec. 6 Reacción endotérmica	28
Ec. 7 Reacción endotérmica.....	28
Ec. 8 Balance de masa.....	56
Ec. 9 Relación de flujo de aire	57
Ec. 10 Flujo másico de biomasa.....	59
Ec. 11 Flujo másico de cenizas.....	59
Ec. 12 Flujo másico de alquitrán.....	59
Ec. 13 Flujo másico de gas.....	60
Ec. 14 Calor perdido a los alrededores.....	62
Ec. 15 Poder calorífico inferior del gas	63
Ec. 16 Calor de cenizas.....	64
Ec. 17 Tasa del balance de energía del sistema	67
Ec. 18 Potencia térmica real de salida.....	67

Ec. 19 Tasa del balance de exergía del sistema.....	70
Ec. 20 Salida de potencia térmica máxima	70
Ec. 21 Salida de potencia térmica máxima	70
Ec. 22 Eficiencia del gasificador	71
Ec. 23 Exergía destruida.....	72
Ec. 24 Exergía del flujo de salida	73

NOMENCLATURA

m_{cc}	Flujo másico de biomasa
m_a	Flujo másico de aire
m_g	Flujo másico de gas
m_c	Flujo másico de cenizas
$m_{\bar{a}}$	Flujo másico de alquitrán
m_D	Masa de biomasa
P_D	Poder calorífico inferior biomasa
h_a	Entalpía del aire a 27 °C
P_g	Poder calorífico inferior del gas de síntesis
h_g	Entalpía del gas
Q_c	Calor perdido de cenizas
Q_p	Calor perdido a los alrededores
C_c	Calor específico de la ceniza
T_c	Temperatura de la ceniza en el Gasificador

P_1	Presión de entrada al intercambiador de calor
P_2	Presión de salida del intercambiador de calor
T_7	Temperatura de entrada al intercambiador de calor
T_8	Temperatura de salida del intercambiador de calor
h_1	Entalpía de entrada del gas
h_2	Entalpía de salida del gas
s_1	Entropía de entrada del gas
s_2	Entropía de salida del gas
P_0	Presión ambiente
h_0	Entalpía ambiente
s_0	Entropía ambiente
T_0	Temperatura ambiente
\dot{E}_e	Energía de entrada al sistema
\dot{E}_s	Energía de salida del sistema

d_s	Cambio de energía total del sistema
d	Intervalo de tiempo
m	Cantidad de masa
Q_s	Calor perdido a los alrededores
\dot{W}_s	Potencia térmica real de salida
\dot{X}_e	Tasa de Exergía total que entra
\dot{X}_s	Tasa de Exergía total que sale
\dot{X}_d	Tasa de destrucción de Exergía
d_s	Tasa de cambio de Exergía
ψ_1	Exergía de flujo de entrada
ψ_2	Exergía de flujo de salida
$\dot{W}_{r,s}$	Salida de potencia térmica máxima
η	Eficiencia del Gasificador

RESUMEN

La gasificación de biomasa es una forma de conversión de energía que todavía se mantiene en etapa de investigación y desarrollo con algunas aplicaciones en la generación de electricidad. En el presente proyecto se realiza un análisis de exergía de un gasificador "Ankur" de fabricación India modelo Combo-40 de capacidad 30 Kw, trabajando con tres diferentes tipos de biomásas como son la cascarilla de café, el bagazo de cacao y el bambú provenientes de residuos agrícolas y empresas agroindustriales. A partir de pruebas experimentales y la aplicación de las ecuaciones de balance de masa y energía, se determina los parámetros operacionales del gasificador, la potencia térmica real y máxima de salida, la calidad del gas que él produce y su eficiencia, pudiéndose evaluar así su funcionamiento. La calidad del gas se evalúa realizando un análisis de cromatografía de gases atendiendo a su contenido de alquitrán y particulados. Los resultados demuestran que el gasificador es capaz de trabajar eficientemente con diferentes biomásas, influyendo notablemente en su eficiencia las condiciones en que la misma se suministra al equipo. El proyecto se llevó a cabo en el Cantón La Concordia, Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP-EXT. LA CONCORDIA. Dentro del desarrollo está la implementación de equipos e instrumentos de medición que ayudaron a determinar de forma más precisa los parámetros de operación del sistema.

PALABRAS CLAVES:

GASIFICACIÓN

BIOMASA

GASIFICADOR

EXERGÍA

ALQUITRÁN

ABSTRACT

The gasification of biomass is a form of energy conversion still remains under investigation and development with some applications in power generation. In this project Exergy analysis of a gasifier "Ankur" making India Combo-40 model 30 Kw capacity is realized, working with three different types of biomass such as coffee husk, bagasse cocoa and bamboo from agricultural residues and agro-industrial companies. From experimental testing and implementation of the balance equations of mass and energy, operational parameters of the gasifier is determined, the actual and maximum output thermal power, gas quality it produces and efficiency, being able to evaluate their performance. The quality of the gas is evaluated by performing a gas chromatographic analysis according to their tar and particulates. The results demonstrate that the gasifier is able to work efficiently with different biomass, notably influencing its Efficiency conditions in which it is supplied to the equipment. The project was carried out in La Concordia Canton, Province of Santo Domingo de los Tsáchilas on the premises of the National Agricultural Research Institute INIAP-EXT. LA CONCORDIA. Within the development is the implementation of equipment and measuring instruments that helped to more accurately determine the operating parameters of the system.

KEYWORDS:

GASIFICATION

BIOMASS

GASIFIER

EXERGY

TAR

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES.

La situación actual del país en concepto de energía es crítica debido en gran medida a la dependencia de la generación termo-eléctrica que utiliza los combustibles derivados de petróleo y su demanda en ocasiones insatisfecha que obliga inclusive a importar energía de países vecinos, sumado a esto los períodos de racionamiento producto del estiaje.

Ya que los combustibles fósiles convencionales están siendo agotados a una velocidad vertiginosa, y que la contaminación asociada aumenta en tales proporciones, un nuevo énfasis en la biomasa y en otros recursos renovables es imprescindible en el futuro inmediato.

La biomasa, por su capacidad de transformación en energía no contaminante, puede contribuir eficientemente al reemplazo de aquellas energías derivadas del petróleo, por lo que se convierte en un valioso recurso para el desarrollo de nuevas fuentes de energía renovable, en las áreas remotas de las regiones Sierra y Costa del Ecuador la fuente predominante de energía renovable está constituida por los recursos solares y de biomasa. Según investigaciones, la proporción de uso de biomasa (leña y residuos vegetales) en estas zonas del Ecuador fluctúa entre el 5 y el 6 % del total de las fuentes primarias de energía.

La utilización eficaz de estas fuentes está vinculada al uso de tecnologías eficientes de generación de energía, que permitan que esta producción sea competitiva frente al uso de los combustibles derivados de fuentes no

renovables que generan cada vez más dudas acerca de su viabilidad y su impacto medio ambiental.

Una de las tecnologías que contribuye a reducir el impacto ambiental mencionado, por el uso del recurso biomásico, es la de gasificación termoquímica. En este proceso existen etapas de oxidación (con déficit de oxígeno) y reducción química, los cuales se dan en pasos subsecuentes dentro de un reactor que opera a temperaturas entre 800 a 1000°C, aquí se genera un producto gaseoso que contiene subproductos combustibles como CO, H₂, CH₄ y cantidades menores de otros hidrocarburos. Una vez depurado (remoción de partículas), desecado y enfriado, dicho gas puede ser utilizado como combustible para cocinas, motores de combustión interna (gasificadores underdraff, downdraff), e inclusive con equipos modernos (lecho fluidizado) hasta turbinas a gas.

En la Figura. 1 se muestra las materias primas que pueden ser utilizadas en la gasificación y los productos que se obtienen a partir de dicho proceso.

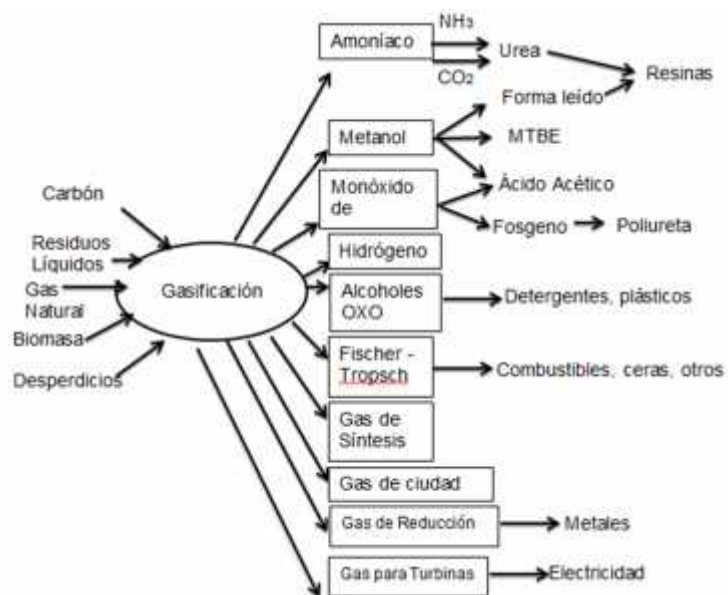


Figura 1. Materias primas y productos finales de la gasificación

Fuente: (Martín, 2008)

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

En el Cantón La Concordia, Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP-EXT. LA CONCORDIA, se tiene un Gasificador tipo Downdraft de 30 Kw de capacidad el mismo que en la actualidad no se encuentra en funcionamiento.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. General

BALANCE EXERGÉTICO E INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN, PARA UN EQUIPO TIPO DOWNDRAFT DE 30 KW.

1.3.2. Específicos

- Determinar los parámetros óptimos de funcionamiento del Gasificador.
- Implementar instrumentos de medida que nos ayuden a censar de forma precisa las variables de proceso.
- Realizar el balance exergético para la operación óptima del Gasificador.
- Desarrollar el proceso de gasificación utilizando como combustible residual tres tipos de biomasa diferente como son la cascarilla de café, el bagazo de cacao y el bambú.

1.4. JUSTIFICACIÓN.

El proyecto promueve el desarrollo energético a todo nivel, más en esta ocasión se trata de la utilización de biomasa residual proveniente de la cosecha y agroindustrias de la zona, con el objetivo de que sirva como combustible en el proceso de gasificación y obtener como producto final el gas de síntesis que es utilizado en motores de combustión interna y turbinas de gas para la generación de energía eléctrica.

Al término de la fase experimental, que tiene carácter demostrativo o piloto, se deberá realizar el balance exergético del equipo con el fin de obtener los parámetros óptimos de funcionamiento de acuerdo a los tres tipos diferentes de biomasa residual puestos a consideración.

1.5. ALCANCE.

En el presente proyecto se realizará un levantamiento técnico del Gasificador tipo Downdraft de 30 Kw de capacidad ubicado en el Cantón La Concordia, de propiedad del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP – EXT. LA CONCORDIA.

Una vez obtenidos los parámetros de funcionamiento se procederá a ejecutar la gasificación de cascarilla de café, bagazo de cacao y bambú para generar el balance exergético del sistema. Con esta información se realizará la optimización del proceso de gasificación.

Los entregables del proyecto serán:

1. Levantamiento técnico.
2. Parámetros de funcionamiento.
3. Balance exergético.
4. Caracterización del gas de síntesis de las biomásas evaluadas.

5. Descripción del proceso de gasificación.
6. Análisis de resultados.
7. Planos, tablas, esquemas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1. RECURSO ENERGÉTICO BIOMÁSICO EN EL ECUADOR.

El Ecuador es un país de naturaleza agrícola, donde se puede encontrar grandes plantaciones de plátano (en todas sus variedades), palma africana (Palma Aceitera), caña de azúcar, cacao, café, arroz, maíz, entre otros.

Cuando estos productos entran en su fase de cosecha, se separa gran parte de la planta de los frutos y posteriormente las agroindustrias se encargan de hacer una separación definitiva antes de entrar a la producción final. Esta separación genera importantes cantidades de desechos orgánicos que constituyen biomasa residual que puede ser aprovechable con fines energéticos.

El Ecuador está situado al noroeste de América del Sur, abarca una extensión de 283.560 km², las características físicas, ecológicas y climáticas del país están determinadas por su privilegiada ubicación en el globo terráqueo, atravesado latitudinalmente por la línea ecuatorial y longitudinalmente por la Cordillera de los Andes y por sistemas montañosos transversales en el sentido oriente-occidente, dando lugar a la conformación de valles interandinos. Las regiones bajas y planas se encuentran al occidente junto al Océano Pacífico y, hacia el oriente, en la Amazonía.

Está representado por tres regiones definidas que de acuerdo a su extensión sería Oriente, Costa y Sierra, con 50%, 25,5% y 24,5% respectivamente. Las condiciones climáticas del Ecuador están influenciadas por varios factores, tales como su localización en la zona ecuatorial, la presencia de la Cordillera de los Andes, la Amazonía y el Océano Pacífico, este último caracterizado por la incidencia de las corrientes Cálida del Golfo y la fría de Humboldt. (CIE)

ZONAS NO PRODUCTIVAS.

El Ecuador posee alrededor de 18 millones de hectáreas que se encuentran sin uso agropecuario, de acuerdo al Censo Nacional del año 2002, en estas zonas están consideradas las áreas erosionadas, en proceso de erosión notable, bosques naturales y/o plantados, parques nacionales, reservas ecológicas, áreas protegidas, páramos, cuerpos de agua y centros urbanos.

ZONAS PRODUCTIVAS.

Mientras que con uso agropecuario oscila alrededor de 12'355.881 ha, de las cuales 3'357.167 ha corresponden a pastos cultivados en 2'098.962 UPAs y 1'129.701 ha corresponden a pastos naturales en 205833 unidades productivas lo que significa que el 36% del suelo de uso agropecuario están ocupadas por pastos, donde satisfacen sus necesidades vitales aproximadamente 4'486.020 unidades de ganado vacuno y 3'517.214 de otros animales (ovejas, caballos, mulas, asnos, etc.) y el 32% restante por cultivos, 5% de páramo, 21% de montes y bosques, 3% en descanso y 3% otros usos.

Tabla 1.

“Uso del suelo, superficie y número de UPAs”

CATEGORÍAS	HECTÁREA	UPAs
Cultivos permanentes	1.363.400	304.206
Cultivos transitorios	1.231.675	629.055
Pastos cultivados	3.357.167	298.962
Pastos naturales	1.129.701	205.833
Páramos	600.264	23.672
Montes y bosques	3.881.140	242.912
Descanso	381.140	136.815
Otros usos	411.180	117.328

Fuente: (INEC-MAC-SICA, 2002)

CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES PRODUCTIVAS (UPAs)

De acuerdo al censo Nacional Agropecuario de Junio de 2002 realizado por el INEC, se puede obtener la siguiente información:

Tabla 2.

Cantidad de unidades productivas y hectáreas ocupadas

TAMAÑO (ha)	Número de UPAS	Ha. Ocupadas
menos de 1	248.398	95.834
de 1 a 2	117.660	156.016
de 2 a 3	78.850	183.354
de 3 a 5	90.401	339.021
de 5 a 10	101.066	688.897
de 10 a 20	75.660	1 017.807
de 20 a 50	76.792	2 372. 027
de 50 a 100	34.498	2 249. 409
de 100 a 200	12.941	1 666. 879
de 200 y más	6.616	3 593.496

Fuente: (INEC-MAC-SICA, 2002)

POTENCIAL AGRÍCOLA

Para analizar el potencial agrícola con el que cuenta el Ecuador, se debe hacer un estudio de cultivos por zonas.

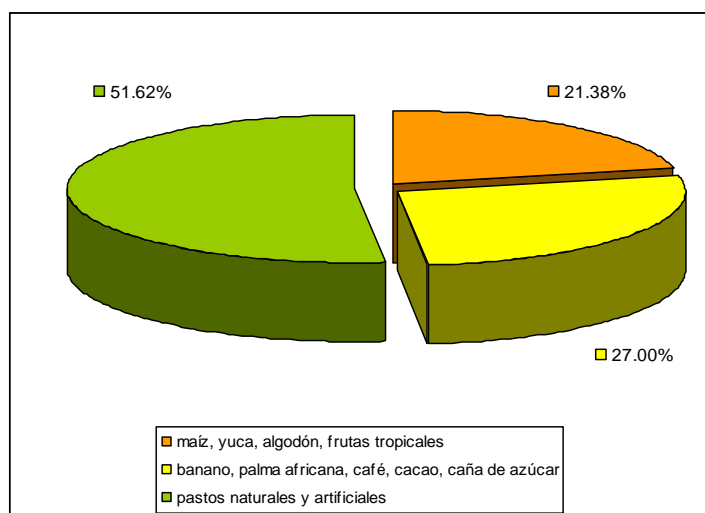


Figura 2. Producción agrícola de la región costa del Ecuador

Fuente: INEC

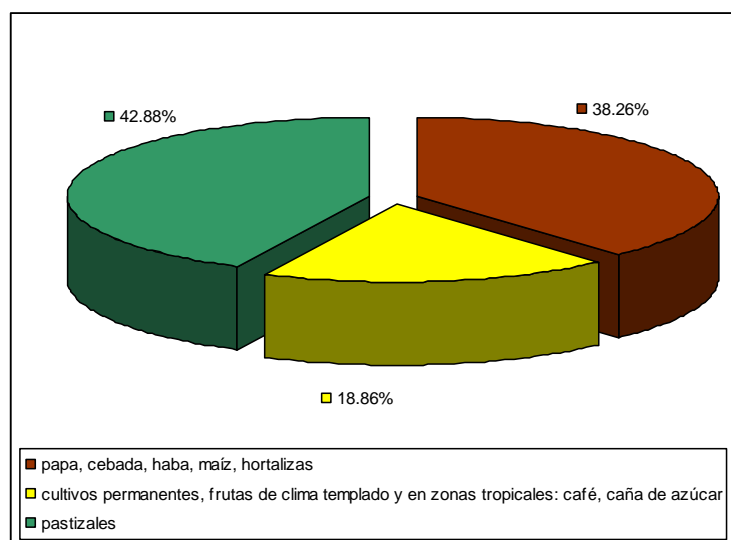


Figura 3. Producción agrícola de la región sierra del Ecuador

Fuente: (INEC, 2002)

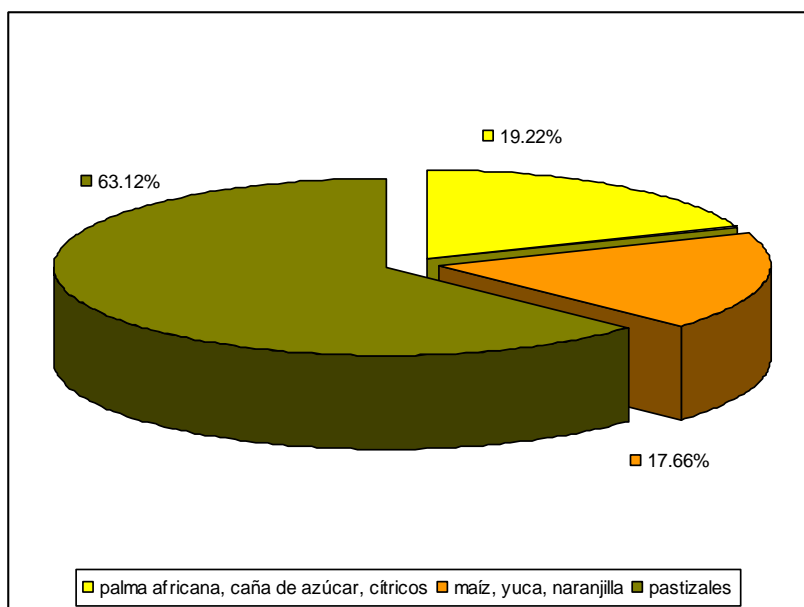


Figura 4. Producción agrícola de la región amazónica del Ecuador

Fuente: (INEC, 2002)

2.2. TIPOS DE BIOMASA.

- **Plantaciones energéticas**

Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación.

Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como jacinto de agua o las algas, para producir

combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel. (FOCER, Manuales sobre energías renovables/BIOMASA, 2002)



Figura 5. Jacinto de agua

Fuente: (ECOELÉCTRIC, 2010)

- **Residuos forestales**

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en el área centroamericana. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa; en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. (FOCER, Manuales sobre energías renovables/BIOMASA, 2002)



Figura 6. Desechos de madera

Fuente: (ECOLECTRIC, 2010)

En la figura 6, se puede apreciar:

1. Desperdicios de producción de madera
2. Aserrín.
3. Eucalipto.
4. Aserradero.

- **Desechos agrícolas**

La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40%. Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo.

Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café, la caña de azúcar, la palma africana, entre otros. (FOCER, Manuales sobre energías renovables/BIOMASA, 2002)



Figura 7. Desechos agrícolas

Fuente: (ECOLECTRIC, 2010)

- **Desechos industriales**

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto

contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.

- **Desechos urbanos**

Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países centroamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía “limpia”.

En el corto y mediano plazo, la planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de desechos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80% de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía. (FOCER, Manuales sobre energías renovables/BIOMASA, 2002)

2.2.1. Características de la biomasa

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan los cuales determinan el proceso de cambio

más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

Composición química y física: Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.

Contenido de humedad relativa (H.R.): El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

Porcentaje de cenizas: El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.

Poder calórico: Es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

Densidad aparente: Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

2.2.2. Usos de la biomasa en la industria

La biomasa es una fuente de energía importante para muchas industrias rurales en América Central; por ejemplo, para la fabricación de ladrillos y cal, y para el procesamiento de productos agrícolas. En comparación con el sector doméstico, su uso en el sector industrial es menor, pero todavía considerable. Seguidamente se mencionan las aplicaciones industriales más importantes:

- **Generación de calor:** Particularmente en zonas rurales, varias industrias utilizan fuentes de biomasa para generar el calor requerido para procesos como el secado de productos agrícolas (café) y la producción de cal y ladrillos. En las pequeñas industrias, los procesos energéticos muchas veces son ineficientes debido a la baja calidad de los equipos y a procedimientos inadecuados de operación y mantenimiento.

- **Co-generación:** Esta aplicación se refiere a la generación simultánea de calor y electricidad, lo cual resulta considerablemente más eficiente que los dos sistemas separados. Se utiliza con frecuencia en industrias que requieren de las dos formas de energía, como el procesamiento de café y azúcar. Su configuración depende de cuál es la forma de energía más importante; a veces se utilizan el calor y la electricidad en el proceso de la planta industrial y se vende el excedente a otros usuarios o a la red eléctrica.
- **Generación eléctrica:** En varios países industrializados se utiliza la biomasa, a gran escala, para la red eléctrica interconectada. También se usa en combinación con otras fuentes convencionales como el carbón mineral.
- **Hornos industriales:** Los hornos de combustión directa están ampliamente difundidos en todas las operaciones agroindustriales de América del Sur. Básicamente consisten en una cámara de combustión en la que se quema la biomasa (leña, cascarilla de arroz o café, bagazo, cáscara de macadamia o coco, etc.), para luego usar el calor liberado en forma directa o indirecta (intercambiador de calor) en el secado de granos, madera o productos agrícolas.
- **Calderas:** Las calderas que operan con base en la combustión de biomasa (leña, aserrín, cascarilla de café, arroz, etc.) se usan en el secado de granos, madera y otros. Estos equipos están dotados de una cámara de combustión en su parte inferior (en el caso de las calderas a leña) en la que se quema el combustible; los gases de la combustión pasan a través del intercambiador de calor, transfiriéndolo al agua. En algunas calderas se usan inyectores especiales para alimentar biomasa en forma de polvo (aserrín, cáscara de grano, etc.), a veces, junto a algún otro tipo de combustible líquido por ejemplo búnker. (López, 2009)

2.3. BIOMASA AGRÍCOLA A SER GASIFICADA.

2.3.1. Bagazo de Cacao

Corresponde al 90% del fruto, siendo este el principal desecho en la producción de cacao. Las cáscaras de cacao representan un grave problema para los cultivadores, ya que al ser usadas como abono sin procesar (Figura. 8), se convierten en una fuente significativa de enfermedades causada por varias especies del género *Phytophthora* como la mazorca negra. Aunque las cáscaras de cacao se han tratado de utilizar para la alimentación de animales, su uso ha sido limitado ya que los altos contenidos de alcaloides presentes en las cáscaras restringen el consumo en animales, debido a que sus sistemas digestivos se ven impedidos para metabolizar dichos alcaloides. (NESTLÉ-ECUADOR, 2008)



Figura 8. Bagazo de cacao

Fuente: (NESTLÉ-ECUADOR, 2008)

El aporte del presente estudio es evaluar energéticamente las cáscaras de la vaina de cacao, ya que la diversidad genética de la planta ha sido modificada con el objeto de originar una variedad productiva enfocándose solo al grano de cacao.

Al evaluar energéticamente la cáscara de cacao se determina si esta cumple con las características de biomasa y si la cantidad de desechos proveniente de la actividad cacaotera es suficiente como para promover eficiencia energética en el sector agrícola. De esta manera se puede involucrar a las familias que se dedican a esta actividad promoviendo un desarrollo sostenible. Así se puede disponer de un antecedente que pueda ser utilizada en diferentes entornos del conocimiento académicos, centros de investigación, público y privado, permitiendo a los decisores formular políticas que contribuyan al cambio de la matriz energética del Ecuador.

2.3.2. Bambú

La biomasa vegetal es una fuente natural renovable que puede convertirse en materiales útiles y energía. La idea de utilizar bambú para producir energía eléctrica está dentro de este contexto. El bambú aparece naturalmente en todos los continentes excepto en Europa con más de 1200 especies, distribuidas en 70 géneros; estas están entre las plantas de más rápido crecimiento en el planeta. Para la mayoría de los propósitos el bambú puede ser cosechado en dos o tres años, haciendo de él un verdadero recurso renovable.



Figura 9. Bambú “Dendrocalamus Asper”

Fuente: (Plan Nacional de Promoción del Bambú, 2010)

En los lugares donde se produce el bambú la energía es un recurso extremadamente caro, pues la población está aislada y se requieren grandes líneas de distribución para llevar la energía. En estos casos la biomasa del bambú (incluso los residuos de su aprovechamiento industrial), se convierten en un valioso recurso tanto para producir energía térmica como eléctrica.

Desde el punto de vista medioambiental y eficiencia energética el bambú es un material extremadamente beneficioso. En efecto, sus competidores naturales (ladrillo y cemento) son materiales caros de producir que requieren importantes recursos energéticos. (Plan Nacional de Promoción del Bambú, 2010)

2.3.3. Cascarilla de café

Ecuador posee una gran capacidad como productor de café, y es uno de los pocos países en el mundo que exporta todas las variedades de café: arábigo lavado, arábigo natural y robusto.

Debido a su ubicación geográfica, Ecuador produce un de los mejores cafés de América del Sur y los más demandados en Europa. Los diferentes ecosistemas que posee el Ecuador permiten que los cultivos de café se den a lo largo y ancho del país llegando a cultivarse inclusive en las Islas Galápagos. La producción del café arábigo se da desde marzo hasta octubre, mientras la de robusta se da desde febrero hasta noviembre. (anecafé)

Anexo A. Producción Nacional de café por regiones.



Figura 10. Cascarilla de café

Fuente: (anecafé)

La disponibilidad de la cascarilla de café como fuente bioenergética, por sus características físico-químicas como bajo contenido de humedad, granulometría y poder calórico lo hacen un excelente producto para su utilización como fuente energética por medio de la gasificación.

2.4. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_xH_y , y presencia de CO_2 , CO e H_2) son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico

de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad.

Así normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda. En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 3000 – 3500 kcal/kg para los residuos ligno - celulósicos, los 2000 – 2500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente los 10000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos.

Estas características y el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente. Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance de emisiones de CO₂ a la atmósfera es neutro.

En efecto, el CO₂ generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por lo tanto, no aumenta la cantidad de CO₂ presente en la atmósfera. (López, 2009)

2.4.1. Procesos Termoquímicos

Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte. Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Comprenden básicamente, la combustión, gasificación y pirólisis.

- **Combustión**

Esta es la forma más antigua y común para extraer la energía de la biomasa. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado.

Los procesos tradicionales de este tipo son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas. Estos resultados se podrían disminuir considerablemente con prácticas mejoradas de operación y un diseño adecuado del equipo.

- **Gasificación**

Consiste en la quema de biomasa (fundamentalmente leña y residuos agrícolas) en presencia de oxígeno, en forma controlada, de esto se produce un gas combustible denominado “gas pobre” por su bajo contenido calórico en relación, por ejemplo, al gas natural (del orden de la cuarta parte).

La gasificación se realiza en un recipiente cerrado, conocido por gasógeno, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa.

El gas pobre obtenido se lo utiliza en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor, o bien puede ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna que produzca, a su vez energía eléctrica.

- **Pirólisis**

Proceso similar a la gasificación, por el cual se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa, para obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (efluentes piroleñosos) y gaseosos (gas pobre). Generalmente, el producto principal de la pirólisis es el carbón vegetal, considerándose a los líquidos y gases como subproductos del proceso.

El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja frente a la biomasa que le dio origen, de tener un poder calórico mayor y un peso menor para igual cantidad de energía, lo que permite un transporte más fácil. No obstante, debe hacerse notar que la carbonización representa una pérdida muy importante de la energía presente en la materia prima, ya que en el proceso consume gran cantidad de ella. (López, 2009)

2.4.2. Procesos Bioquímicos

Los procesos bioquímicos se basan en la degradación de la biomasa por la acción de microorganismos, y pueden dividirse en dos grandes grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos).

- **Anaeróbicos**

En la fermentación anaeróbica se utiliza generalmente residuos animales o vegetales de baja relación carbono / nitrógeno, se realiza en un recipiente cerrado llamado “digestor” y da origen a la producción de un gas combustible denominado biogás. Adicionalmente, la biomasa degradada que queda como residuo del proceso de producción del biogás, constituye un excelente fertilizante para cultivos agrícolas. Las tecnologías disponibles para su

producción son muy variadas pero todas ellas tienen como común denominador la simplicidad del diseño y el bajo costo de los materiales necesarios para su construcción. El biogás, constituido básicamente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), es un combustible que puede ser empleado de la misma forma que el gas natural. También puede comprimirse para su uso en vehículos de transporte, debiéndose eliminar primero su contenido de CO.

- **Aeróbicos**

La fermentación aeróbica de biomasa de alto contenido de azúcares o almidones, da origen a la formación de alcohol (etanol), que además de los usos ampliamente conocidos en medicina y licorería, es un combustible líquido de características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo. Las materias primas más comunes utilizadas para la producción de alcohol son la caña de azúcar, sorgo dulce y maíz. El proceso incluye una etapa de trituración y molienda para obtener una pasta homogénea, una etapa de fermentación y una etapa de destilación y rectificación. (FOCER, Manuales sobre energía renovables/BIOMASA)

2.5. EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.

La gasificación es el proceso en el cual la biomasa se convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, en un gas pobre con un moderado calor específico, normalmente se trabaja con el 25 a 30% del aire necesario para la oxidación completa.

En el proceso de gasificación de biomasa hay tres tipos de procesos térmicos importantes los cuales depende de las condiciones de operación, del combustible (residuos agrícolas, madera, carbón, etc.) y del agente gasificante (oxígeno puro, o vapor de agua o aire) que se usará.

Estos tres procesos importantes en la gasificación son la pirólisis, oxidación o combustión y reducción o gasificación, también es importante el proceso de secado de la biomasa, a continuación se detallará cada uno de estos procesos:

- **Secado**

El secado se lo realiza para liberar el porcentaje de humedad contenido en la biomasa. Este proceso se lo realiza antes de que la biomasa ingrese a cualquier proceso, debe tener un porcentaje de humedad máximo del 30% ya que esto influye en la calidad del gas sinterizado, el porcentaje de alquitrán y cenizas.

- **Pirólisis**

Es la etapa en el cual hay un rompimiento del material por medio de un calor intenso en ausencia de aire (aproximadamente a 450°C). El combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. Las proporciones relativas de las fracciones obtenidas durante el proceso dependen de las condiciones en las cual se realice, como velocidad de calentamiento, temperatura máxima alcanzada, composición química y granulometría del material. Los productos formados mediante la pirólisis son:

Gases: Compuestos principalmente de CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, H₂ y pequeñas cantidades de hidrocarburos pesados.

Líquidos (alquitranes o bioaceites y agua condensada): Alquitranes compuestos por una mezcla de distintos productos como pueden ser cetonas, ácido acético, y compuestos aromáticos, y otras fracciones más pesadas y agua proveniente del secado y reacciones químicas.

Sólidos (carbonizado): Residuo carbonoso puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo, y ceniza. (García, 2011)

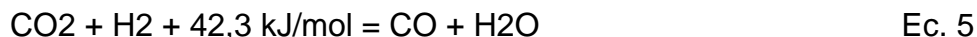
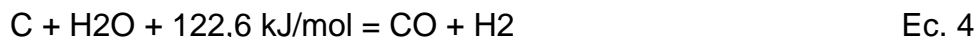
- **Oxidación o combustión**

Tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante lo cual implica reacción de oxidación, las cuales son exotérmicas, Aquí se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga y las reacciones que se generan son:



- **Reducción o craquiamiento**

Es la conversión de los productos de la combustión a un combustible gaseoso, en el craqueo térmico el gas producido en la gasificación se calienta y las moléculas del alquitrán son descompuestas a moléculas más simples, como resultado gas más ligero, alquitrán, cenizas y vapor de agua. Aquí se generan reacciones endotérmicas. Las reacciones más importantes en la zona de reducción son:



(Huaráz, 2013)

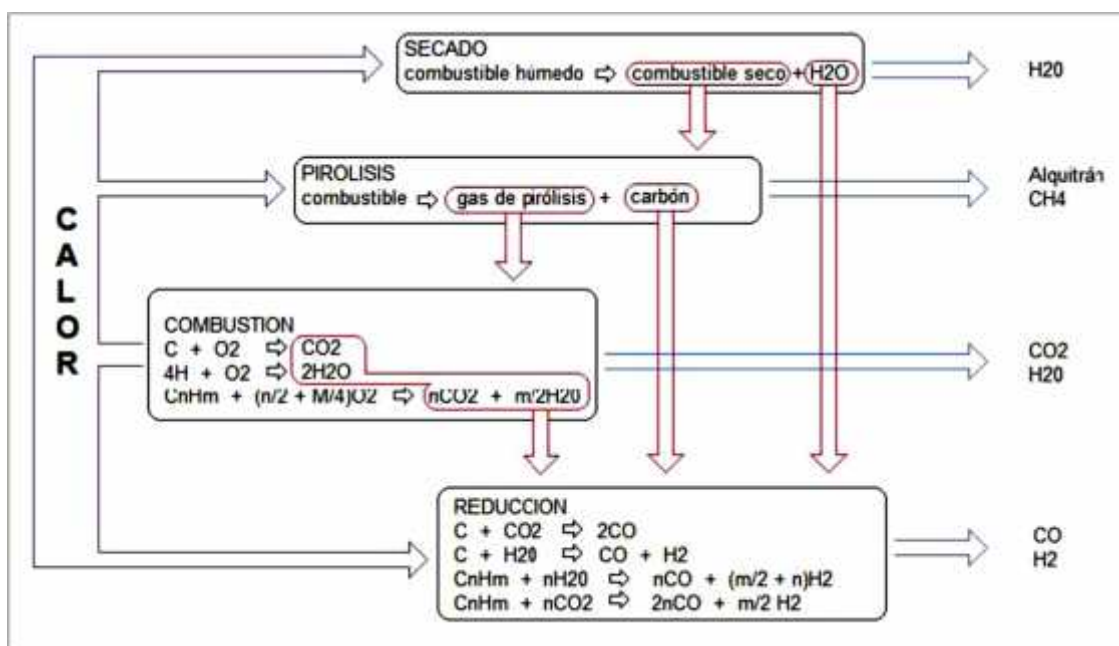


Figura 11. Reacciones estequiométricas en el proceso de gasificación

Fuente: (Huaráz, 2013)

2.5.1. El Agente Gasificante

Según el agente gasificante que se emplee se producen efectos distintos en la gasificación, y el syngas varía en su composición y poder calórico.

Si se gasifica con aire, parte de la biomasa procesada se quema con las bajas proporciones de oxígeno presentes y el resto de la biomasa sufre la reducción. No obstante, el 50% del gas pobre es hidrógeno, y en términos de poder calorífico ronda los 5.5 MJ/m³. Este syngas es apropiado para motores de combustión interna convencionales, ya que como materia prima para la síntesis del metanol es un gas pobre.

La gasificación con vapor de agua u oxígeno, mejoran el rendimiento global y aumentan la proporción de hidrógeno en el syngas. Es el sistema más

adecuado de producir syngas si se desea emplearlo como materia prima para producir metanol o gasolina sintética.

La utilización de hidrógeno como agente gasificante permite obtener un gas de síntesis que puede sustituir al gas natural, pues puede alcanzar un poder calorífico de 30 MJ/m³.

La tecnología más empleada es, sin embargo, la que utiliza aire como agente oxidante, por razones económicas y tecnológicas. Además, la relación agente gasificante/alimentación combustible debe ajustarse porque valores bajos de este parámetro pueden indicar que no se genera la cantidad suficiente de energía para mantener el proceso en las condiciones adecuadas. (Fonseca, 2003)

Tabla 3.

Composición del gas de síntesis según la naturaleza del agente gasificante

Agente gasificante	PCI (MJ/m ³)	Composición						Uso
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	O ₂	
Aire	< 6	16	20	12	2	50	—	Combustible
Oxígeno	10 -- 20	32	48	15	2	3	—	Combustible gas de síntesis
Vapor de Agua	10 -- 20	50	20	22	6	—	—	Combustible gas de síntesis

Fuente: (Fonseca, 2003)

2.5.2. Factores que intervienen en la Gasificación.

- **Temperatura.** Tanto la temperatura de la reacción como la velocidad de calentamiento. El aumento de las temperaturas favorece la producción de H₂ y CO, en detrimento de CH₄ y del H₂O.

- **Presión.** En general, el aumento de la presión va en contra de las reacciones de gasificación, aumentando los alquitranes e hidrocarburos. Los gasificadores de lecho móvil trabajan a presión atmosférica, mientras que los de lecho fluidizado lo hacen a presión, pudiendo llegar hasta los 30 bares.
- **Relación agente gasificante/biomasa.** Para gasificadores en lecho móvil, la relación óptima aire/biomasa se sitúa alrededor de 1.5, y para lecho fluidizado, oscila entre 0.5 y 1.6.
- **Composición química.** Está directamente relacionada con los gases producidos.
- **Poder calorífico.** Depende también de la composición química de la biomasa de partida.
- **Tamaño de partícula.** Es un factor clave, ya que va a influir en el tiempo de calentamiento y en la difusión de los reactivos hacia y desde la partícula. Se consideran tamaños adecuados de unos mm hasta 15 cm para el gasificador de lecho móvil en contracorriente, entre 3 y 10 cm para el de lecho móvil en corrientes paralelas y de pocos mm hasta 4cm para el de lecho fluidizado.
- **Densidad, forma y dureza de las partículas.** Influye sobre el movimiento de las partículas en el lecho y sobre la formación de bóvedas o canales preferenciales.
- **Humedad.** Es muy importante, para gasificadores de lecho móvil son convenientes humedades del 10 – 20%, y para los de lecho fluidizado, hasta el 40%. (Fonseca, 2003)

2.6. TIPOS DE GASIFICADORES.

En principio, cabe distinguir dos grandes grupos: los de lecho móvil y los de lecho fluidizado. A su vez, los rimeros pueden ser de contracorriente (updraft) o de corrientes paralelas (downdraft).

2.6.1. Gasificador Updraft

De tipo lecho fijo o móvil donde las corrientes de combustible y agente gasificante circulan en sentido opuesto, en contracorriente.

Las partículas que entran por la parte superior se encuentran con los gases calientes que salen y producen su calentamiento rápido e inicio de su pirólisis. En su progresión hacia abajo se encuentran con gases reactivos y con oxígeno que producen las correspondientes reacciones de oxidación y reducción que finalmente generan el gas de síntesis.

En él, se logran altas eficiencias, aunque por otro lado este sistema de gasificación posee algunas desventajas como son el alto contenido de alquitrán del gas producido y la capacidad marginal que tiene en su carga, y por ende la imposibilidad de generación de gas continuo, que redundaría en dificultades para la utilización en motores de combustión interna. (García, 2011)

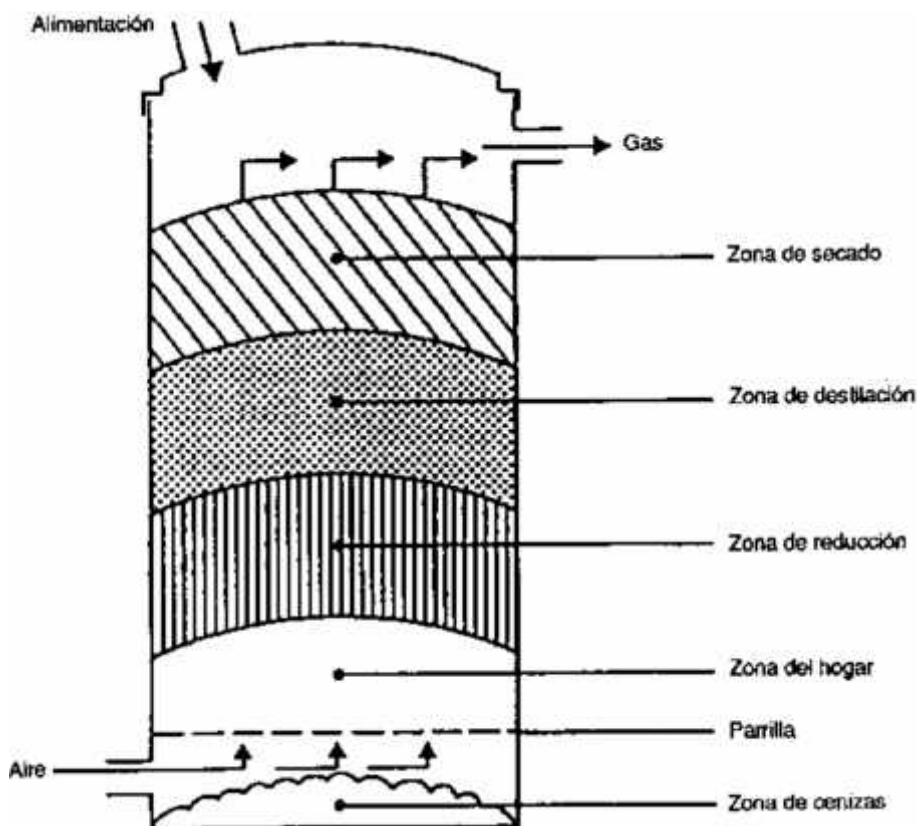


Figura 12. Zonas de reacción para un Gasificador tipo Updraft

Fuente: (García, 2011)

2.6.2. Gasificador Downdraft

De tipo lecho fijo o móvil donde las corrientes de combustible y agente gasificante circulan el mismo sentido. Las partículas sufren el secado y la pirólisis de forma gradual en la parte inicial, para pasar posteriormente a una zona de oxidación que recibe directamente el agente gasificante (aire) y, por último, a la zona de reducción donde se produce el gas de síntesis.

Las dificultades que da esta configuración es el contenido de cenizas y humedad en el gas producido y por otra parte que requiere de un tiempo prolongado de encendido (20-30 min). La principal desventaja de este reactor

frente al updraft es la alta temperatura del gas de salida, lo que origina una eficiencia más baja.

Por otro lado cabe destacar que a pesar de que el gas obtenido tiene una baja calidad energética tiene la ventaja de tener un contenido bajo de alquitranes. Además, este tipo de configuración es más aceptable para aplicaciones en motores de combustión interna y turbinas de gas. (García, 2011)

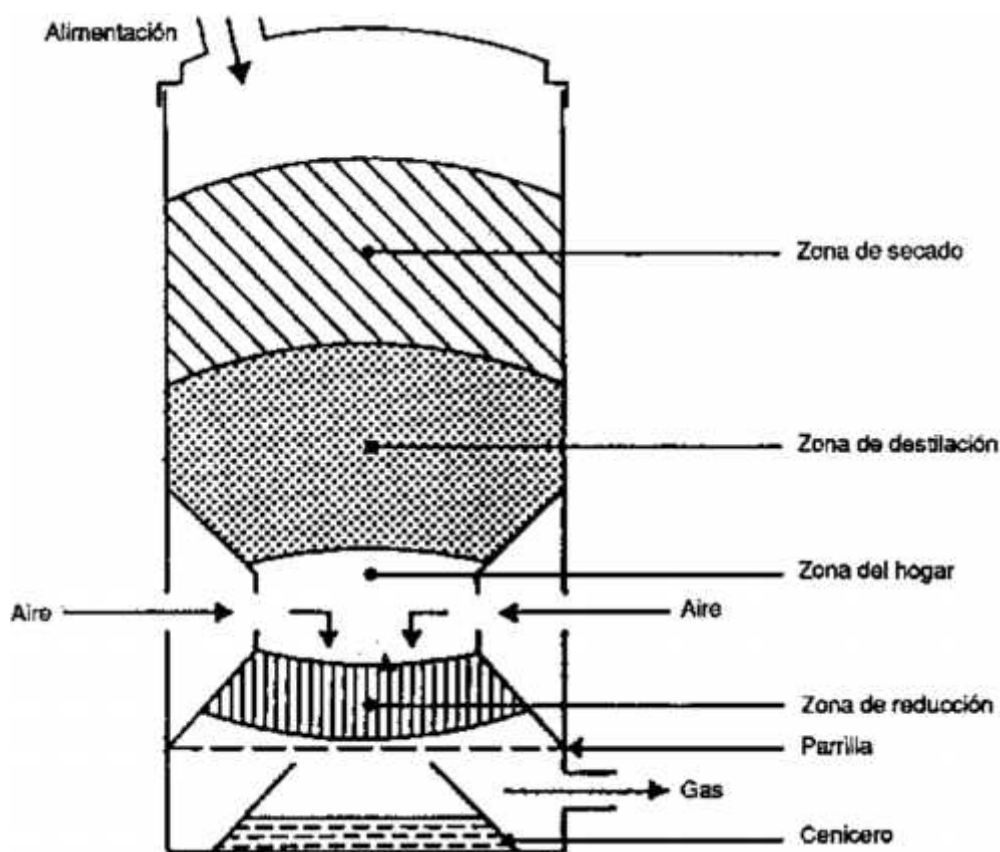


Figura 13. Zona de reacción para un Gasificador tipo Downdraft

Fuente: (García, 2011)

2.6.3. Gasificador de lecho fluidizado

En este reactor el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible hasta que las partículas de éste se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas. El secado, la oxidación, la pirolisis y la reducción tienen lugar en la misma área. Los lechos fluidizados son gasificadores versátiles y no son sensibles a las características del combustible, exceptuando el tamaño.

Los lechos fluidizados tienen altos niveles de transferencia de masa y energía y proporciona una buena mezcla de la fase sólida, lo que significa que los niveles de reacción son altos, el tiempo de residencia de las partículas es pequeño y la temperatura es más o menos constante en el lecho.

Los gasificadores de lecho fluidizado se pueden clasificar, además, atendiendo a la variable de operación “velocidad de fluidización”, en lecho fluidizado burbujeante (velocidad de fluidización de 1 - 2 m/s) y en lecho fluidizado circulante (velocidad de fluidización mayor de 5 m/s). (García, 2011)

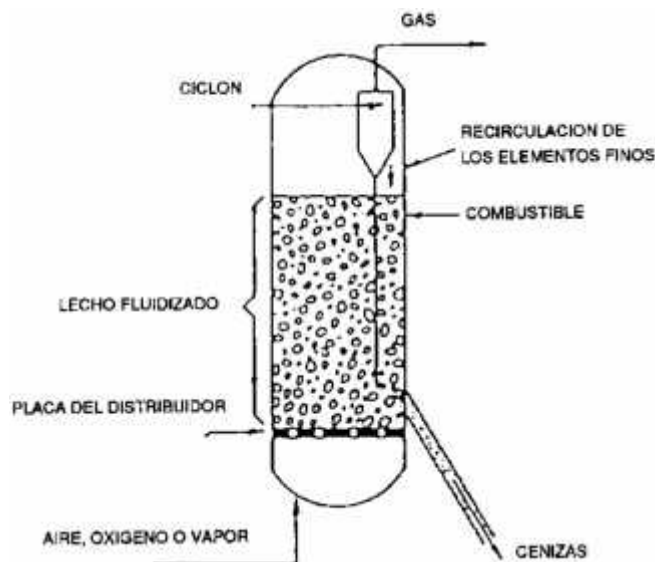


Figura 14. Gasificador de lecho fluidizado

Fuente: (García, 2011)

Tabla 4.

Ventajas y desventajas de cada tipo de Gasificador

TIPO DE GASIFICADOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Contra Correinte (Updraft)	Simplicidad de construcción y uso. Baja temperatura del gas producido. Alta eficiencia en la gasificación. Puede utilizarse combustibles con alto contenido de humedad.	Gran cantidad de cenizas y alquitrán.
Corriente Paralela (Downdraft)	Alto rango de potencias desde 80 Kw hasta 500 Kw o más. La producción del gas de síntesis tiene bajo contenido de alquitrán.	Grandes cantidades de cenizas y partículas de polvos. El combustible debe ser preparado. Altas temperaturas en las salidas de gases. El contenido de humedad debe ser menor al 25% (en base húmeda)
Lecho fluidizado	Rendimientos mayores a los gasificadores de tipo cama fijo. Puede trabajar con combustibles altamente corrosivo	Debe utilizarse un combustible altamente reactivo. La ceniza generada , generalmente es altamente corrosiva

Fuente: (Huaráz, 2013)

2.7. CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA.

La composición fisicoquímica y el potencial energético de la biomasa residual son aspectos importantes a considerar cuando se está evaluando una posible tecnología como es la gasificación.

La caracterización de biomasa proporciona datos para entender, predecir y evaluar su comportamiento como combustible, si bien las condiciones en que se

realice su transformación son tan importantes como las características del propio combustible. La caracterización aporta además conocimientos sobre la mejor manera de transportarlo, almacenarlo e introducirlo en el equipo de conversión energética. Adicionalmente, sirve de base para estimar la cantidad y composición de los productos (sólidos, líquidos o gaseosos) que se generan como consecuencia de su aprovechamiento.

Los parámetros que aportan la composición fisicoquímica del combustible se determinan mediante el análisis elemental y el análisis inmediato.

2.7.1. Análisis elemental

El análisis elemental trata de determinar el contenido de elementos simples de un combustible, pero solamente aquellos que se gasificarán y supondrán un aporte calorífico en las reacciones de combustión. Así, para los combustibles el análisis elemental incluye el porcentaje en peso de Carbono (C), Hidrogeno (H), Nitrógeno (N) y Azufre (S).

El carbono puede proceder tanto de las materias orgánicas como de los carbonados minerales presentes. El carbono fijo es el que no destila cuando calienta un combustible.

El azufre puede proceder de los compuestos sulfurados orgánicos, la pirita o marcasita y de sulfatos inorgánicos. Da lugar a escorias perjudiciales y forma óxidos muy contaminantes.

El nitrógeno no aporta energía alguna. Si la cantidad es importante y la temperatura de procesos elevada, contribuye a la formación de NO_x de origen térmico.

La cantidad de oxígeno presente en los combustibles reduce el poder calorífico, sin embargo contribuye a reducir las necesidades de aire de combustión. (AENE, 2003)

2.7.2. Análisis inmediato

El análisis inmediato determina parámetros que afectan tanto a la combustión como a la pirólisis, tales como:

- La humedad
- El contenido en volátiles
- Las cenizas
- El carbono fijo

Humedad, es la cantidad de agua presente dentro de una muestra de materia. Es usual expresar la humedad como una relación de masa de agua por masa de materia seca. El proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por su contenido de humedad. La biomasa con una humedad inferior al 30% pueden ser aprovechadas térmicamente mediante el proceso de combustión directa, pirólisis o gasificación.

Es recomendable que biomasa residual con porcentajes de humedad superior al 40% sea utilizada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia.

Las materias volátiles, están constituidas por combinaciones de carbonos, hidrógeno y otros elementos. El contenido en volátiles da una idea de la longitud de la llama, en el caso de que el destino del combustible sea la incineración. Desde el punto de vista del poder calorífico es preciso saber que no todos los volátiles aportan energía.

La ceniza, corresponde a la cantidad de materia sólida no combustible presente *en* un material. Es usual expresar la cantidad de ceniza por kilogramo de muestra. Un alto contenido de cenizas en un residuo biológico es perjudicial para su aprovechamiento energético por vías térmicas ya que reduce su poder calorífico. Las cenizas tienden a depositarse en las tuberías de las calderas e intercambiadores, ocasionando dificultad en la transmisión de calor.

El carbono fijo, es la fracción de carbono residual que permanece luego de retirar de la muestra la humedad, las cenizas y el material volátil. Por consiguiente se puede calcular el porcentaje de carbón fijo = $100 - \% \text{ humedad} - \% \text{ cenizas} - \% \text{ material volátil}$. La cantidad de material volátil y carbono fijo presentes en la biomasa, permiten establecer la facilidad con la cual el residuo reacciona, se oxida y se gasifica. La ocurrencia de uno u otro tipo de reacción depende del tipo de proceso utilizado para el aprovechamiento energético de la biomasa. (AENE, 2003)

CAPITULO III

INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO.

3.1. LEVANTAMIENTO TÉCNICO DE LA PLANTA PILOTO DE GASIFICACIÓN.

La biomasa se alimenta a través de la puerta de alimentación y se almacena en la tolva. Una limitada y controlada cantidad de aire para la combustión parcial entra a través de las toberas de aire. La garganta (o chimenea) asegura relativamente la producción de gas limpio y de buena calidad.

El reactor tiene carbón de leña para la reducción parcial de los productos de combustión permitiendo al mismo tiempo a la ceniza escapar a través de la hoja perforada del reactor, que a su vez, es arrastrada con el agua circulante en la cámara de eliminación de ceniza por la caja de drenaje y luego a la torre de enfriamiento.

Luego el gas caliente pasa por un sistema de limpieza que está compuesto por un separador scruber (ciclón), donde el gas se enfría y se elimina parte del particulado presente en el mismo, después del cual el gas pasa por un filtro de aserrín y otros dos de manga. Este gas es succionado por un motor de combustión de 1800 rpm de encendido por chispa de dos cilindros que acciona un generador eléctrico trifásico de 1800 rpm, 220v y 60 Hz.

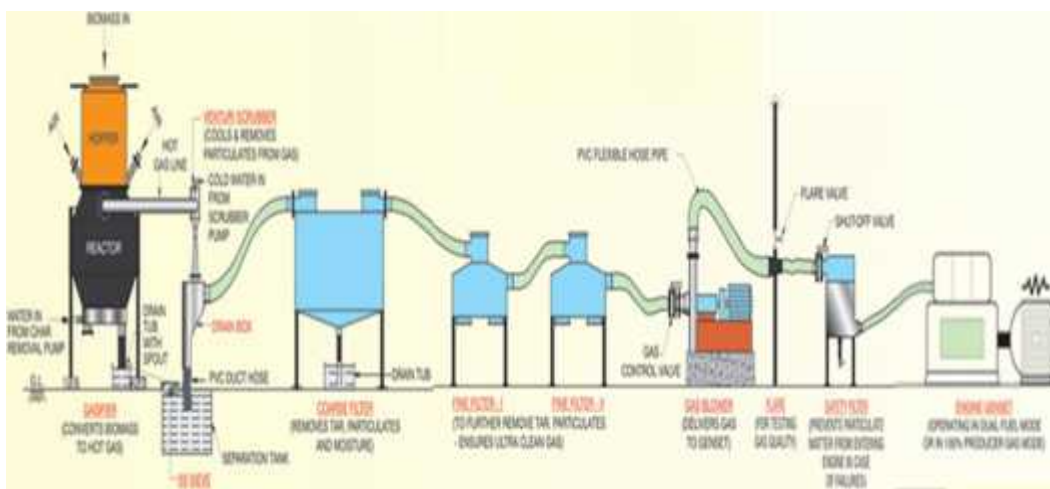


Figura 15. Diagrama esquemático de la planta de gasificación

Fuente: (ANKUR)

Tabla 5.

Especificaciones técnicas de los equipos.

Gasificador	
Modelo	COMBO – 40
Capacidad Nominal (Eléctrica)	Producción bruta 22 kW a 100% en modo de producción de gas.
Salida Térmica	100000 a 1650000 Kcal/hr
Tipo de Gasificador	Downdraft (Aguas abajo)
Temperatura de Gasificación	1050-1100° C
Flujo de gas nominal	100 Nm ³ /h
Valor calórico promedio del gas	1000 kcal/Nm ³
Capacidad almacenamiento de combustible	Aproximadamente 200Kg de biomasa.
Contenido humedad permitido en la biomasa	5 - 20 % de humedad.
Consumo nominal por hora	34 – 36 Kg/h
Granulometría de la biomasa	2 – 4 cm
Factor de aire	0.40

Continua →

Composición típica del gas	CO – 19 ±3% H ₂ - 18±2% CO ₂ – 10 ±3% CH ₄ –arriba del 3% N ₂ – 50%
Sistema del motor (Ashok Leyland)	
Descripción	Cuatro cilindros, 1800 RPM, 30 kVA, enfriamiento por agua, equipado con encendido de bujía y control de arranque eléctrico para gobernador mariposa de gas.
Generador eléctrico	
Descripción	Directamente acoplado al motor, 1800 rpm, 220 V, 3 fases, 60 Hz, 79,5 A, alternador de 30 kVA, incluye cargador de batería DC con salida a 12 V.

Fuente: (ANKUR)

A lo largo del Gasificador fueron instalados 8 termocuplas que registran la temperatura en diferentes puntos del reactor. Otra termocupla mide la temperatura del gas. El reactor brinda la posibilidad de trabajar con dos entradas de suministro de aire, el control del flujo del mismo se realiza a través de dos placas orificios. El aire es dosificado por medio de un soplador de alta presión, pasando primero por un intercambiador de calor gas-aire antes de entrar al reactor.

3.1.1. Layout de la planta de gasificación

Anexo B.

3.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN.

3.2.1. Temperatura

La temperatura es un parámetro importante ya que influye en los equilibrios de reacción afectando el rendimiento del proceso. En la operación va

aumentando progresivamente en las distintas zonas del Gasificador y para cada tipo de biomasa ocurre en un tiempo determinado.

Se puede considerar que la gasificación comienza en torno a los 250 °C, llegando a ser prácticamente completa en torno a los 600°C, aunque esto está en función del tiempo de residencia del residuo en el reactor.

3.2.2. Flujo de aire total

El flujo de aire es un factor importante que afecta en el aumento de la temperatura en el Gasificador, por esta razón debe regularse porque valores bajos de este parámetro pueden indicar que no se genera la cantidad suficiente de energía para mantener el proceso en las condiciones adecuadas.

Para cada tipo de biomasa se empleó un caudal de aire determinado teniendo como valores aproximados entre 4 a 6 Kg/h.

3.2.3. Presión

La presión a la cual se realizan los procesos depende del diseño del Gasificador, la utilización a baja presión da como resultado mayor rendimiento en la producción de alquitrán, y al aumentar la presión se incrementa la producción de carbón vegetal. Este efecto está relacionado a la permanencia de la biomasa en las zonas de reacción.

En los gasificadores se trabaja a presión atmosférica, pero se puede aplicar hasta 30 bar en los de lecho fluidizado.

3.3. INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.

3.3.1. Medidores de temperatura

La temperatura, y el caudal, son las variables de operación que más se miden a lo largo del proceso, aunque también la presión es censada en diferentes puntos del Gasificador.

Los instrumentos que se utilizan para medir la temperatura del proceso son los termopares o termocuplas. Las mediciones industriales de temperatura que oscilan entre -200 y más de 1450°C se logran normalmente con termopares. Los termopares son los únicos detectores que se pueden utilizar a temperaturas muy bajas, sobre todo en aplicaciones en que su precisión es adecuada.

El principio físico de una termocupla es simplemente dos alambres de distinto material unidos en un extremo. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivoltios el cual aumenta proporcionalmente con la temperatura.

Para el sistema de gasificación se utilizaron termocuplas tipo K de aleación Nickel/cromo, que tienen un rango de -270°C hasta 1370°C , con una precisión 0.75% y adecuación a las condiciones del proceso.

El rango de medida para el Gasificador es de **0 a 1100°C** .



Figura 16. Termocupla tipo K

Los termopares están colocados estratégicamente para controlar la evolución de la temperatura en el Gasificador:

T1: temperatura en la zona de reducción.

T2: temperatura en la zona de pirolisis.

T3: temperatura en la zona de combustión.

T4: temperatura en la zona de secado.

T5: temperatura de descarga de cenizas.

T6: temperatura del gas a la entrada del ciclón

T7: temperatura del gas a la entrada del intercambiador de calor.

T8: temperatura del gas a la salida del intercambiador de calor.

T9: temperatura del gas al final del proceso.

3.3.2. Medidores de caudal

En el Gasificador se debe medir el flujo de aire que ingresa a través de las placas orificio, para ello tuvimos que utilizar dos manómetros de agua calibrados en el Laboratorio de Mecánica de fluidos, en los cuales el fluido circula al interior de un conducto cerrado y experimenta una diferencia de presión la cual es utilizada para medir la velocidad del flujo.



Figura 17. Manómetro de agua para medir flujo de caudal

Tabla 6.

Rango manómetros de agua colocados en el Gasificador.

Medidor de Flujo de aire y gas:	Diferencia de alturas
Indicador de variación de presión en la placa orificio 1. (PN).	0 – 250 mm. De H2O
Indicador de variación de presión en la placa orificio 2. (PN).	0 – 250 mm. De H2O

3.3.3. Medidor de presión

Es un manómetro de agua colocado sobre una regleta de medición en pulgadas de agua, está colocado directamente al filtro granular del Gasificador ya que el manejo del Venturi está relacionado con la presión del filtro, también indica cualquier tipo de obstrucción o taponamiento en el mismo.



Figura 18. Manómetro de agua para medir presión del Gasificador y filtro

Tabla 7.

Rango manómetro de agua para medir la presión

Variación de presión del Gasificador:	Diferencia de alturas
Indicador de variación de presión en el filtro a flujo promedio. (PG)	0 – 20 plg. De H ₂ O

3.3.4. Medidor de humedad

Es un instrumento de medición de humedad alimentado por una batería de 9V puede detectar humedades de hasta el 40%, funciona pinchando con las púas del medidor dentro de la biomasa y la lectura es la que indica en la pantalla.



Figura 19. Medidor de humedad

3.3.5. Sensor de nivel de combustible

Es un interruptor de corriente, el cual se controla a través de una paleta colocada internamente en el Gasificador, censa el nivel de biomasa inyectada por el tornillo sin fin a la cámara de secado y cuando está llena, la paleta del sensor de nivel es activada, el swicht corta la corriente del motor conectado al tornillo sin fin dejando de subministrar biomasa al Gasificador.



Figura 20. Sensor de nivel

3.4. IMPLEMENTACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.

Tabla 8.

Sensores instalados en el Gasificador

Cantidad	Nombre del sensor	Descripción
8	Termocuplas tipo K	Rango de medición de 0 a 1100 °C
2	Manómetros de agua (caudal)	0 - 300 mm de H ₂ O
1	Manómetro de agua (presión)	0 - 20 plg de H ₂ O
1	Medidor de humedad	Electrónico
1	Sensor de paleta (nivel)	Sensor para activar motor de tolva.

3.5. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS.

3.5.1. Matriz de funcionamiento del equipo.

Tabla 9.

Matriz operacional del sistema

	Problema	Posible causa	Solución
1	Disminución de temperatura en el reactor.	Cama de carbón de leña en la zona de reducción ahogada.	Operar el combo rotor en modo manual continuamente de 5 a 10 minutos. Si no mejora, detener el Gasificador y comprobar exceso de ceniza o acumulación de basura en la zona de reducción.
2	Regreso de fuego por las boquillas de aire.	Exceso de aire entrante en el Gasificador por algún lado diferente a las toberas de aire.	Comprobar si hay ingreso de aire en el Gasificador por entradas adicionales a las toberas de aire. Comprobar el cierre del cordón de caucho de la puerta de alimentación, pernos de la brida en unión tolva-reactor y pernos en la brida de las toberas de aire.
3	Alta caída de presión a través de los filtros PF.	Cama de material para filtrado ahogada.	Operar el agitador del filtro fino en el modo manual. Si no mejora, sustituir la materia para filtrado y recuperar su nivel.
4	Alta temperatura del Gas a la salida del intercambiador de calor.	El tornillo sin fin no está depositando la biomasa de la tolva al intercambiador de calor	Comprobar que la batería que conecta el motor del tornillo sin fin este en buen estado. Comprobar conexión de sensor de nivel de combustible. Se debe seleccionar la biomasa ya que de esto depende la rapidez en el proceso de gasificación y evita que se traben el tornillo sin fin. Desmontar el intercambiador de calor para limpiar y retirar toda la escoria que se acumula en las paredes.

Continúa 

5	El Gasificador no produce gas durante el arranque.	La caída de presión PF en el filtro puede ser tan elevada que reduce el flujo en el inicio, (por encima de 8 plg de H2O).	Manipular la válvula de entrada de aire hasta encender el Gasificador con una presión de 5 plg de H2O. El tamaño de partícula debe estar entre 0.5 a 3 centímetros, evitando ingresar palos y astillas más grandes obstaculizan el correcto flujo de biomasa. También medir el nivel de humedad de la biomasa que para el encendido no debe superar el 20%.
---	--	---	---

3.5.2. Manual de operación

Anexo C.

3.5.3. Programa de mantenimiento del Gasificador

Anexo D.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE EXERGÍA DEL SISTEMA.

El análisis termodinámico de un Gasificador es imprescindible para la comprensión de los fenómenos que envuelven el proceso, para lo cual se hace necesario un balance de masa y energía, cuantificando los parámetros que determinan su eficiencia, y así poder evaluar su desempeño.

El equipo evaluado es un Gasificador “Ankur” de fabricación india modelo COMBO - 40, en esta instalación el gas generado por la gasificación del material vegetal con aire se limpia y refrigera antes de entrar en el motor de combustión interna de encendido por chispa. Los ensayos experimentales se llevaron a cabo según la siguiente planificación:

Pre calentamiento del reactor a través del cenicero, hasta alcanzar en la zona de reducción la temperatura de 800 °C, luego se ajustan las condiciones de operación en régimen de gasificación a través de la temperatura y la caída de presión en las placas de orificio, las que se mantienen constantes durante las condiciones experimentales seleccionadas.

El proceso experimental fue dividido en dos etapas, la primera correspondió a la evaluación del Gasificador, con el fin de identificar las condiciones de mayor rendimiento y mayor estabilidad, la segunda etapa se llevó a cabo cuando, bajo estas condiciones, se procedió a las mediciones del contenido de alquitrán y cenizas del gas de síntesis producido.

4.1. VARIABLES DEL PROCESO.

4.1.1. Variables de entrada

- **Biomasa y sus características**

Se opera el Gasificador con tres tipos de biomasa y diferente contenido de humedad: cascarilla de café, bagazo de cacao y bambú.

La humedad se mide con un higrómetro la cual va a variar en rangos de baja humedad de 0 a 5%, de mediana humedad de 5 a 13% y alta humedad de 14 a 25%. A continuación se presenta en las tablas 10 y 11 la composición elemental en base seca de las biomásas utilizadas durante la evaluación del Gasificador, los valores calóricos y humedad, los cuales se obtuvieron del programa ECN Phyllis 2 y se encuentran detallado en el Anexo E.

Tabla 10.

Composición elemental en base seca de las biomásas utilizadas

Propiedad	Cascarilla de café	Bagazo de cacao	Bambú
Carbono (%)	42,10	42,85	49,87
Hidrógeno (%)	4,60	5,29	5,91
Nitrógeno (%)	1,53	3,16	0,29
Oxígeno (%)	47,57	33,88	40,28
Total con haluros (%)	100,00	100,00	100,00
Cont. de cenizas (%)	4,10	8,65	3,61
Material volátil (%)	64,60	71,92	83,00
Carbono fijo (%)	31,30	19,82	13,39

Fuente: (Phyllis2)

Tabla 11.**Poder calórico inferior de las biomásas utilizadas**

Biomásas	PCI (MJ/kg)	Humedad (W) %
Cascarilla de café	16,7	9
Bagazo de cacao	15,8	6
Bambú	16,1	13

Fuente: (Phyllis2)

- **Entrada de aire**

Se controla con el Venturi y medimos en las placas orificio la caída de presión que se produce y así controlar el flujo de aire que ingresa al Gasificador. En el Anexo F se presenta los valores del flujo de aire obtenidos en el la placa orificio.

4.1.2. Variables de salida

- **Cantidad de ceniza**

Para recolectar la ceniza agitar bien el cenicero para que caiga al fondo y se pueda recolectar a través del puerto de cenizas. Pesada en una balanza Fisher 3000 con una apreciación de una décima de gramo.



Figura 21. Medición cantidad de cenizas

- **Cantidad de alquitrán**

Es recolectado del filtro granular donde se condensa y retiene el alquitrán, a través de una abertura en la parte inferior del filtro.



Figura 22. Medición de alquitrán producido en la gasificación

- **Salida de Gas**

Se mide mediante la placa orificio se lee las presiones y se calcula la cantidad de gas que se produce.

4.2. BALANCE EXERGÉTICO

4.2.1. Balance de masa

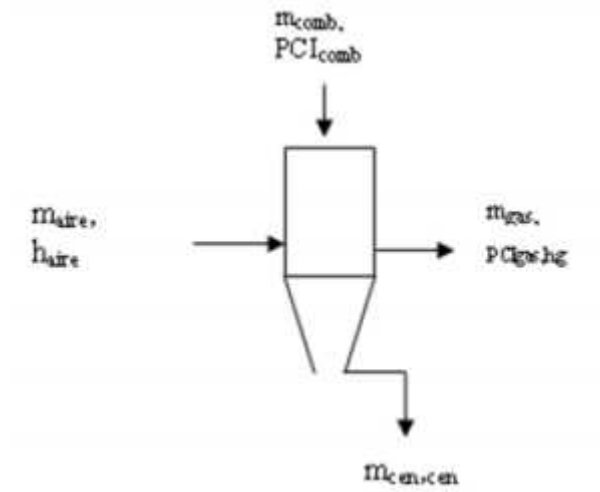


Figura 23. Esquema balance de masa en el Gasificador

Atendiendo lo representado en la figura 24, el balance de masa se puede expresar por la siguiente expresión:

$$m_{cc} + m_a = m_g + m_c + m_a \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

m_{com} : Flujo másico de biomasa, (Kg/s)

m_{aire} : Flujo másico de aire, (Kg/s)

m_{gas} : Flujo másico de gas, (Kg/s)

m_{cen} : Flujo másico de ceniza, (Kg/s)

m_{alq} : Flujo másico de alquitrán, (Kg/s)

El flujo másico de combustible, cenizas y alquitrán fueron evaluados de forma experimental para cada biomasa gasificada. Para determinar la masa horaria de combustible se pesó su masa inicial y se midió el tiempo de trabajo del Gasificador; luego de concluido el trabajo y después de un proceso de enfriamiento, se evacuó la ceniza y alquitrán y se pesó.

Tabla 12.

Guía para pruebas del Gasificador

Descripción	Cascarilla de café	Bagazo de cacao	Bambú
Kg de biomasa utilizados	4Kg	4Kg	4Kg
Tamaño de la partícula	1 – 2 cm	2 – 4 cm	3 – 5 cm
Tiempo de inicio de gasificación (tiempo de llama)	16 min	12 min	20 min
Tiempo final de gasificación	36 min	60 min	1h 10min
Tiempo total del proceso de gasificación (h)	0.866 h.	1.2 h.	1.5 h.
gr. De ceniza en el reactor	4.5oz (127.575gr)	3oz (85.05gr)	2oz (42.525gr)
gr. De alquitrán + agua producidos	3oz (85.05gr)	2oz (56.7gr)	1oz (28.35gr)

Se realizaron un total de 12 pruebas experimentales, cuatro para cada biomasa y con variaciones del flujo de aire total diferentes. La relación de flujo de aire R_a , viene dada por:

$$R = \frac{V}{V} * 1 \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

Va1: flujo de aire suministrado al Gasificador por la primer entrada.

Va2: flujo de aire suministrado al Gasificador por la segunda entrada.

Tabla 13.

Datos de la entrada de aire al Gasificador

Biomasa	Pruebas	Flujo de aire Kg/h			Ra (%)
		Entrada 1	Entrada 2	Total	
Cascarilla de café	A1	1,2	3,1	4,3	38,71
	A2	1,7	4,0	5,7	42,5
	A3	2,1	3,5	5,6	60,0
	A4	2,5	3,7	6,2	67,56
Bagazo de cacao	B1	1,5	3,3	4,8	45,45
	B2	1,5	3,8	5,3	39,47
	B3	2,1	3,4	5,5	61,76
	B4	2,4	3,7	6,1	64,86
Bambú	C1	1,7	3,5	5,2	48,57
	C2	1,8	4,0	5,8	45,00
	C3	2,1	3,4	5,5	61,76
	C4	2,3	3,9	6,2	58,97

Nota: Para el cálculo posterior se tomaron los valores sombreados.

La relación de flujo de aire los mejores resultados se obtienen con un rango típico de factor de aire entre 0,25 y 0,40. Con valores inferiores estaríamos en la etapa de pirolisis.

Con factores de aire más elevados indica que el Gasificador es ineficiente, tiene muchas pérdidas de calor en las paredes, o la humedad de la biomasa es muy alta lo que representa un gasto de energía del combustible para la evaporación de la humedad contenida en la biomasa.

4.2.2. Cálculo de flujo másico

- **Cascarilla de café.**

m_{com} = flujo másico de biomasa (entrada).

$$m_{cc} = \frac{m \quad d \quad b}{t_i} \quad \text{Ec. 10}$$

$$m_{cc} = \frac{4 \text{ K}}{0.8 \text{ h}} = 4.6 \text{ Kg/h}$$

m_{aire} = flujo másico de aire (entrada).

Este dato se toma del flujo de aire total sombreado de la tabla 13, en el caso del café es **4.3 Kg/h**.

m_{cen} = flujo másico de ceniza (salida)

$$m_c = \frac{m \quad d \quad c}{t_i} \quad \text{Ec. 11}$$

$$m_c = \frac{0.1 \text{ K}}{0.8 \text{ h}} = 0.1 \text{ Kg/h}$$

m_{alq} = flujo másico de alquitrán (salida)

$$m_a = \frac{m \quad d \quad a}{t_i} \quad \text{Ec. 12}$$

$$m_a = \frac{0.0 \text{ K}}{0.8 \text{ h}} = 0.0 \text{ Kg/h}$$

m_{gas} = flujo másico de gas (salida)

$$m_g = m_{cc} + m_a - m_c - m_a \quad \text{Ec. 13}$$

$$m_g = 4.62 + 4.3 - 0.148 - 0.098 = \mathbf{8.6 \text{ Kg/h}}$$

- **Bagazo de cacao**

m_{com} = flujo másico de biomasa (entrada).

$$m_{cc} = \frac{\text{masa de biomasa}}{\text{tiempo}}$$

$$m_{cc} = \frac{4 \text{ K}}{1.2 \text{ h}} = \mathbf{3.3 \text{ Kg/h}}$$

m_{aire} = flujo másico de aire (entrada).

Este dato se toma del flujo de aire total sombreado de la tabla 13, en el caso del cacao es **5.3 Kg/h**.

m_{cen} = flujo másico de ceniza (salida)

$$m_c = \frac{\text{masa de ceniza}}{\text{tiempo}}$$

$$m_c = \frac{0.0 \text{ K}}{1.2 \text{ h}} = \mathbf{0.0 \text{ Kg/h}}$$

m_{alq} = flujo másico de alquitrán (salida)

$$m_a = \frac{\text{masa de alquitran}}{\text{tiempo}}$$

$$m_a = \frac{0.0 \text{ K}}{1.2 \text{ h}} = \mathbf{0.0 \text{ Kg/h}}$$

m_{gas} = flujo másico de gas (salida)

$$m_g = m_{cc} + m_a - m_c - m_a$$

$$m_g = 3.33 + 5.3 - 0.071 - 0.047 = \mathbf{8.51 \text{ Kg/h}}$$

- **Bambú**

m_{com} = flujo másico de biomasa (entrada).

$$m_{cc} = \frac{\text{masa de biomasa}}{\text{tiempo}}$$

$$m_{cc} = \frac{4 \text{ K}}{1.5 \text{ h}} = \mathbf{2.6 \text{ Kg/h}}$$

m_{aire} = flujo másico de aire (entrada).

Este dato se toma del flujo de aire total sombreado de la tabla 13, en el caso de la caña guadua es **5.8 Kg/h**.

m_{cen} = flujo másico de ceniza (salida)

$$m_{cen} = \frac{\text{masa de ceniza}}{\text{tiempo}}$$

$$m_{cen} = \frac{0.0 \text{ Kg}}{1.5 \text{ h}} = \mathbf{0.0 \text{ Kg/h}}$$

m_{alq} = flujo másico de alquitrán (salida)

$$m_{alq} = \frac{\text{masa de alquitran}}{\text{tiempo}}$$

$$m_{alq} = \frac{0.0 \text{ Kg}}{1.5 \text{ h}} = \mathbf{0.0 \text{ Kg/h}}$$

m_g = flujo másico de gas (salida)

$$m_g = m_{cc} + m_a - m_c - m_{alq}$$

$$m_g = 2.67 + 5.8 - 0.038 - 0.019 = \mathbf{8.4 \text{ Kg/h}}$$

4.2.3. Calor perdido a los alrededores.

$$m_b \times P_b + m_a \times h_a = m_g \times P_g + m_g \times h_g + Q_c + Q_p$$

Ec. 14

$$h_a = 300 \frac{\text{K}}{\text{K}} \text{ (Entalpía del aire a temperatura ambiente } 27 \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$PCI_g = 5759,75 \frac{K}{K}$$

Para este dato se tomaron los principales elementos constituyentes del gas de síntesis y sus respectivos por cientos, acorde con lo reportado en la tabla 5.

$$PCI_g = \sum_{i=1}^n C_i PCI_i \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

PCI_i = Poder calorífico inferior de los componentes combustibles del gas

C_i = Fracción volumétrica del componente del gas en %

Tabla 14.

Poder calorífico del gas de Síntesis

Componente	Formula	Contenido en %	Poder calorífico KJ/m ³ N	Contenido x poder calorífico
Monóxido de carbono	CO	20	12655	2531,00
Hidrógeno	H ₂	20	10770	2154,00
Metano	CH ₄	3	35825	1074,75
Etano	C ₂ H ₆	0	64385	0,00
Eteno	C ₂ H ₄	0	59398	0,00
Dióxido de carbono	CO ₂	7	0	0,00
Nitrógeno	N ₂	50	0	0,00
		100		5759,75

Se obtiene un poder calorífico de 5759,75 KJ/Kg donde los gases como el nitrógeno y el dióxido de carbono son gases que no reaccionan, y no aportan al poder calorífico.

$$h_g = 2342,03 \frac{K}{K}$$

(Lesme; Recio; Preston; Rodriguez, Oliva, 2008)

- **Cascarilla de café**

$$PCI_b = 16.7 \frac{M}{K} \quad (\text{Tabla 7})$$

$$Q_c = m_c \times C_c \times (T_c - T_a) \quad \text{Ec. 16}$$

$$Q_c = 0,128 \text{ kg} \times 0,96 \frac{K}{K^\circ} \times (600^\circ - 27^\circ) C$$

$$Q_c = 7,4 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} 4k \times 16700 \frac{K}{K} + 4,3 k \times 300 \frac{K}{K} \\ = 8,67 k \times 5759,75 \frac{K}{K} + 8,67 K \times 2342,03 \frac{K}{K} + 70,41 K \\ + Q_p \end{aligned}$$

$$Q_p = -2222.84 \text{ KJ}$$

$$Q_p = \frac{-2.28}{0.8 \text{ h}} \text{ KJ} = -2566.79 \text{ KJ/h} = \mathbf{-2566.79 \text{ Kwh.}}$$

- **Bagazo de cacao**

$$PCI_b = 15.8 \frac{M}{K} \quad (\text{Tabla 7})$$

$$Q_c = m_c \times C_p \times (T_c - T_a)$$

$$Q_c = 0,085 \text{ kg} \times 0,96 \frac{\text{K}}{\text{K}^\circ\text{v}} \times (600^\circ - 27^\circ)$$

$$Q_c = 4,7 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} 4\text{kg} \times 15800 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 5,3 \text{ kg} \times 300 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\ = 8,51 \text{ kg} \times 5759,75 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 8,51 \text{ Kg} \times 2342,03 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 46,76 \text{ KJ} \\ + Q_p \end{aligned}$$

$$Q_p = -4202.91 \text{ KJ}$$

$$Q_p = \frac{-4.9}{1.2 \text{ h}} \text{ KJ} = -3502.43 \text{ KJ/h} = \mathbf{-3502.43 \text{ Kwh.}}$$

- **Bambú**

$$PCI_b = 16.1 \frac{\text{M}}{\text{K}} \quad (\text{Tabla 7})$$

$$Q_c = m_c \times Cp_c \times (T_c - T_a)$$

$$Q_c = 0,043 \text{ kg} \times 0,96 \frac{\text{K}}{\text{K}^\circ\text{v}} \times (600^\circ - 27^\circ)$$

$$Q_c = 2,6 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} 4\text{kg} \times 16100 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 5.8 \text{ kg} \times 300 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\ = 8,41 \text{ kg} \times 5759,75 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 8,41 \text{ Kg} \times 2342,03 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 23,65 \text{ KJ} \\ + Q_p \end{aligned}$$

$$Q_p = -2019.62 \text{ KJ}$$

$$Q_p = \frac{-2019.6}{1.5 \text{ h}} \text{ KJ} = -1346.41 \text{ KJ/h} = \mathbf{-1346.41 \text{ Kwh.}}$$

4.2.4. Potencia térmica real de salida

Para este cálculo se tomaron los datos de la entrada y salida del gas en el intercambiador de calor.

Tabla 15.

Presión y temperatura del gas a la salida del intercambiador

Biomasa	# Pruebas	Intercambiador de calor			
		T7 (Entrada) ° C	T8 (Salida) C	P1 (Entrada) Pa	P2 (Salida) Pa
Cascarilla de café	A1	155	50	490	392
	A2	165	57	589	392
	A3	177	60	686	490
	A4	180	63	686	589
Bagazo de cacao	B1	177	55	490	392
	B2	195	60	589	490
	B3	220	64	686	392
	B4	240	68	686	490
Bambú	C1	190	57	490	392
	C2	210	61	589	392
	C3	230	65	686	490
	C4	240	69	784	589

Nota:

Para el cálculo posterior se tomaron los valores sombreados.

- **Cascarilla de café.**

Entrada:

P1= 490 Pa h1= 2751.8 KJ/Kg Tabla A-6/Anexo A/Term. Cengel

T7= 155 C s1= 6.7927 KJ/Kg

Salida:

P2= 392 Pa h2= 2591.3 KJ/Kg Tabla A-6/Anexo A/Term. Cengel

T8= 50 C s2= 8.0748 KJ/Kg

Ambiente:

Po= 100 KPa ho= 104.83 KJ/Kg Tabla A-4/Anexo A/Term. Cengel

To= 27 C so= 0.3672 KJ/Kg

La salida real de potencia del Gasificador es determinada de la forma de tasa del balance de energía,

$$\underbrace{\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal}}_{\text{Tasa de transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{\frac{dE_{sistema}}{dt}}_{\text{Tasa de cambio de energías interna, cinética, potencial, etcétera}} \xrightarrow{U(\text{estable})} = 0$$

Ec. 17

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

$$\dot{m}_{sal} h1 = \dot{m}_{sal} h2 + Q_{sal} \quad (\text{dado que } \dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}) \quad \text{Ec. 18}$$

$$\dot{m}_{sal} = (h1 - h2) - Q_{sal}$$

$$\dot{m}_{sal} = 8.67 \text{ Kg/h} \times (2751.8 - 2591.3) \text{ KJ/Kg} - (-2566.79 \text{ KJ/h})$$

$$\dot{m}_{sal} = \mathbf{3958.33 \text{ Kwh}}$$

- **Bagazo de cacao.**

Entrada:

P1= 589 Pa h1= 2788.8 KJ/Kg Tabla A-6/Anexo A/Term. Cengel

T7= 195 C s1= 6.4678 KJ/Kg

Salida:

P2= 490 Pa h2= 2608.8 KJ/Kg Tabla A-6/Anexo A/Term. Cengel

T8= 60 C s2= 7.9082 KJ/Kg

Ambiente:

Po= 100 KPa ho= 104.83 KJ/Kg Tabla A-4/Anexo A/Term. Cengel

To= 27 C so= 0.3672 KJ/Kg

La salida real de potencia del Gasificador es determinada de la forma de tasa del balance de energía,

$$\underbrace{\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal}}_{\text{Tasa de transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{dE_{sistema}/dt}_{\text{Tasa de cambio de energías interna, cinética, potencial, etcétera}} \xrightarrow{0 \text{ (estable)}} = 0$$

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sal}$$

$$h1 = \dot{m}_{sal} + Q_{sal} + h2 \quad (\text{dado que } e_c = e_p = 0)$$

$$\dot{m}_{sal} = (h1 - h2) - Q_{sal}$$

$$\dot{m}_{sal} = 8.51 \text{ Kg/h} \times (2788.8 - 2608.8) \text{ KJ/Kg} - (-3502.43 \text{ KJ/h})$$

$$\dot{m}_{sal} = \mathbf{5034.23 \text{ Kwh}}$$

- **Bambú.**

Entrada:

P1= 686 Pa h1= 2802.9 KJ/Kg Tabla A-6/Anexo A/Term. Cengel

T7= 230 C s1= 6.2128 KJ/Kg

Salida:

P2= 490 Pa h2= 2617.5 KJ/Kg Tabla A-6/Anexo A/Term. Cengel

T8= 65 C s2= 7.8296 KJ/Kg

Ambiente:

Po= 100 KPa ho= 104.83 KJ/Kg Tabla A-4/Anexo A/Term. Cengel

To= 27 C so= 0.3672 KJ/Kg

La salida real de potencia del Gasificador es determinada de la forma de tasa del balance de energía,

$$\underbrace{\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal}}_{\text{Tasa de transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{\frac{dE_{sistema}}{dt}}_{\text{Tasa de cambio de energías interna, cinética, potencial, etcétera}} \xrightarrow{0 \text{ (estable)}} = 0$$

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

$$h1 = \dot{m}_{sal} + Q_{sal} + h2 \quad (\text{dado que } e_c = e_p = 0)$$

$$\dot{m}_{sal} = (h1 - h2) - Q_{sal}$$

$$\dot{m}_{sal} = 8.41 \text{ Kg/h} \times (2802.9 - 2617.5) \text{ KJ/Kg} - (-1346.41 \text{ KJ/h})$$

$$\dot{m}_{sal} = \mathbf{2905.62 \text{ Kwh}}$$

4.2.5. Salida de potencia térmica máxima.

La salida de potencia térmica máxima (potencia reversible) se determina a partir de la forma de la tasa del balance de exergía aplicado al sistema extendido (sistema + alrededores inmediatos), cuya frontera está a la temperatura ambiente T_0 ; entonces al igualar a cero el término de la destrucción de exergía tenemos:

$$\underbrace{\dot{X}_{ent} - \dot{X}_{sal}}_{\text{Tasa de transferencia neta de exergía por calor, trabajo y masa}} - \underbrace{\dot{X}_{destruida}}_{\text{Tasa de destrucción de exergía}} \overset{0 \text{ (reversible)}}{=} \underbrace{dX_{sistema}/dt}_{\text{Tasa de cambio en exergía}} \overset{0 \text{ (estable)}}{=} 0$$

Ec. 19

- **Cascarilla de café.**

$$\text{ent} = \text{sal} \quad 0$$

$$1 = \text{rev,sal} + \text{calor} + 2 \quad \text{Ec. 20}$$

$$\text{rev,sal} = (1 - 2)$$

$$\text{rev,sal} = ((h1 - h2) - T_0(s1 - s2)) \quad \text{Ec. 21}$$

$$\text{rev,sal} = 8.67 \text{ Kg/h} ((2751.8 - 2591.3) \text{ KJ/Kg} - 300\text{K}(6.7927 - 8.0748) \text{ KJ/KgK})$$

$$\text{rev,sal} = 4726.28 \text{ Kwh}$$

- **Bagazo de cacao.**

$$\text{ent} = \text{sal} \quad 0$$

$$1 = \text{rev,sal} + \text{calor} + 2$$

$$\text{rev,sal} = (1 - 2)$$

$$\text{rev,sal} = ((h1 - h2) - T_0(s1 - s2))$$

$$\text{rev, sal} = 8.51 \text{ Kg/h} ((2788.8 - 2608.8) \text{ KJ/Kg} - 300\text{K}(6.4678 - 7.9082) \text{ KJ/KgK})$$

$$\text{rev, sal} = \mathbf{5209.14 \text{ Kwh}}$$

- **Bambú.**

$$\text{ent} = \text{sal} \quad 0$$

$$1 = \text{rev, sal} + \text{calor} + 2$$

$$\text{rev, sal} = (1 - 2)$$

$$\text{rev, sal} = ((h1 - h2) - T_o(s1 - s2))$$

$$\text{rev, sal} = 8.41 \text{ Kg/h} ((2802.9 - 2617.5) \text{ KJ/Kg} - 300\text{K}(6.2128 - 7.8296) \text{ KJ/KgK})$$

$$\text{rev, sal} = \mathbf{5638.4 \text{ Kwh}}$$

4.2.6. Eficiencia del Gasificador

- **Cascarilla de café.**

$$= (\text{sal} / \text{rev, sal}) * 100 \quad \text{Ec. 22}$$

$$= (3958.33 \text{ Kwh} / 4726.28 \text{ Kwh}) * 100$$

$$= \mathbf{83.75 \%}$$

- **Bagazo de cacao**

$$= (\text{sal} / \text{rev, sal}) * 100$$

$$= (5034.23 \text{ Kwh} / 5209.14 \text{ Kwh}) * 100$$

$$= \mathbf{96.64 \%}$$

- **Bambú.**

$$= (\text{sal} / \text{rev,sal}) * 100$$

$$= (2905.62 \text{ Kwh} / 5638.4 \text{ Kwh}) * 100$$

$$= \mathbf{51.53 \%}$$

4.3. PERDIDAS DE EXERGIA DEL SISTEMA.

4.3.1. Irreversibilidades o exergía destruida

La diferencia entre el trabajo reversible y el trabajo útil real es la exergía destruida, la cual se determina como:

- **Cascarilla de café.**

$$\text{dest.} = \text{rev,sal} - \text{sal} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\text{dest} = (4726.28 - 3614.33) \text{ Kwh} = \mathbf{1111.95 \text{ Kwh}}$$

- **Bagazo de cacao.**

$$\text{dest.} = \text{rev,sal} - \text{sal}$$

$$\text{dest} = (5209.14 - 5034.23) \text{ Kwh} = \mathbf{174.91 \text{ Kwh}}$$

- **Bambú.**

$$\text{dest.} = \text{rev,sal} - \text{sal}$$

$$\text{dest} = (5638.4 - 2905.62) \text{ Kwh} = \mathbf{2732.78 \text{ Kwh}}$$

4.3.2. Exergía del flujo de salida

- **Cascarilla de café.**

$$2 = (h_2 - h_o) - T_o (s_2 - s_o) \quad \text{Ec. 24}$$

$$2 = (2591.3 - 104.83) \text{ KJ/Kg} - 300\text{K} (8.0748 - 0.3672) \text{ KJ/KgK}$$

$$2 = 174.19 \text{ KJ/Kg}$$

- **Bagazo de cacao.**

$$2 = (h_2 - h_o) - T_o (s_2 - s_o)$$

$$2 = (2608.8 - 104.83) \text{ KJ/Kg} - 300\text{K} (7.9082 - 0.3672) \text{ KJ/KgK}$$

$$2 = 241.67 \text{ KJ/Kg}$$

- **Bambú.**

$$2 = (h_2 - h_o) - T_o (s_2 - s_o)$$

$$2 = (2617.5 - 104.83) \text{ KJ/Kg} - 300\text{K} (7.8296 - 0.3672) \text{ KJ/KgK}$$

$$2 = 273.95 \text{ KJ/Kg}$$

4.4. DIAGRAMA DE FLUJO EXERGÉTICO DEL SISTEMA.

Para un sistema, la transferencia de exergía puede estar asociada específicamente a tres formas principales: transferencia de calor (exergía térmica), transferencia de trabajo (exergía de trabajo) y flujos másicos (exergía de materia).

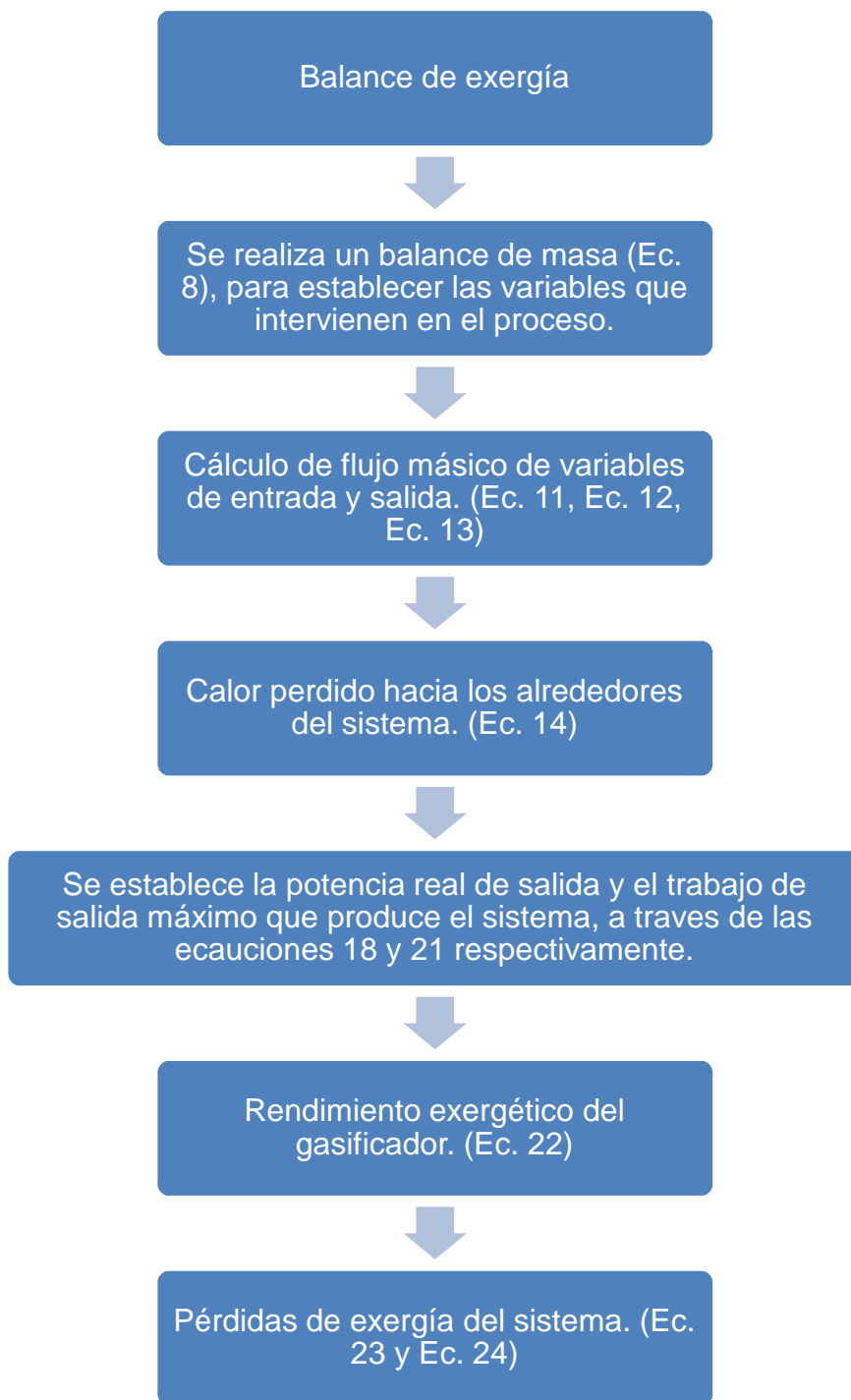


Figura 24. Diagrama de flujo exergético del sistema

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1. APLICACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.

5.1.1. Temperatura de Gasificación

La toma de datos se llevó a cabo para la cantidad de 4Kg de biomasa para cada tipo.

Tabla 16.

Temperaturas y tiempos en las distintas zonas de gasificación

Biomasa	Tiempo min.	Zona del Gasificador				
		Secado	Pirólisis	Combustión	Reducción	Ciclón
		T4 (C)	T2 (C)	T3 (C)	T1 (C)	T6 (C)
Cascarilla de café	5	52	255	382	324	82
	15	78	322	521	498	135
	25	182	486	628	563	178
	40	271	621	797	648	225
Bagazo de cacao	5	58	280	391	335	87
	18	82	375	561	524	163
	35	210	522	684	598	205
	70	305	661	880	678	264
Bambú	5	62	270	354	311	76
	20	85	336	518	475	114
	45	205	475	635	521	167
	80	275	612	812	605	211

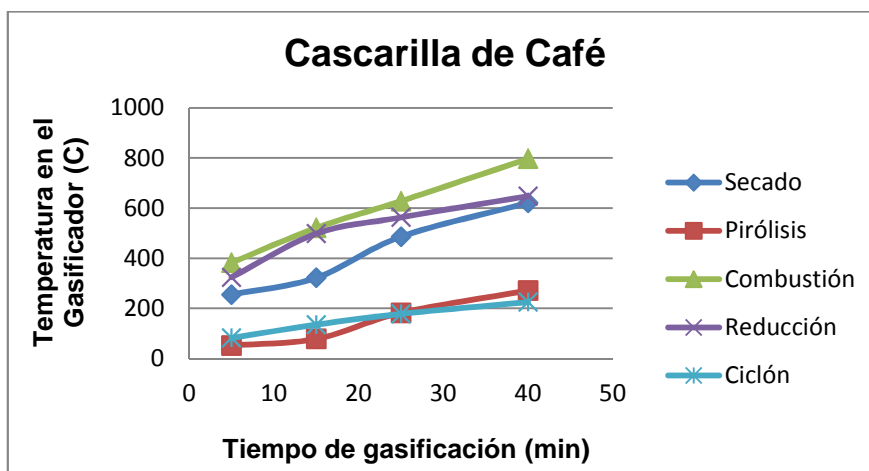


Figura 25. Temperatura vs. Tiempo de gasificación. (Café)

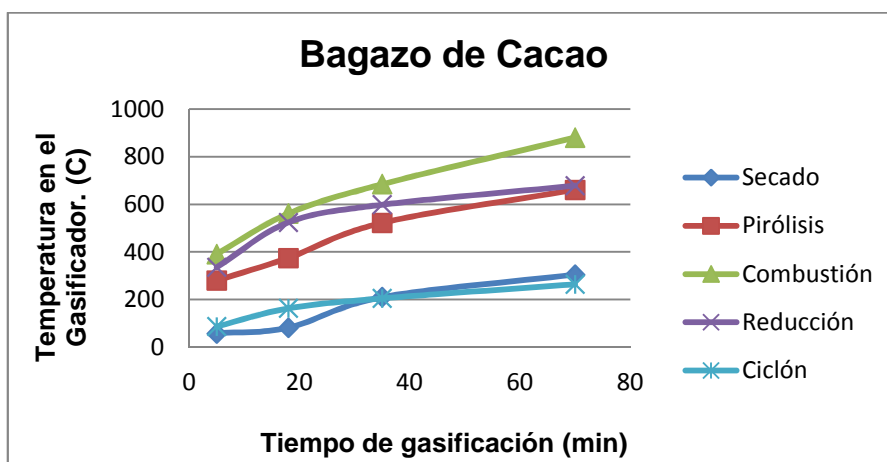


Figura 26. Temperatura vs. Tiempo de gasificación. (Cacao)

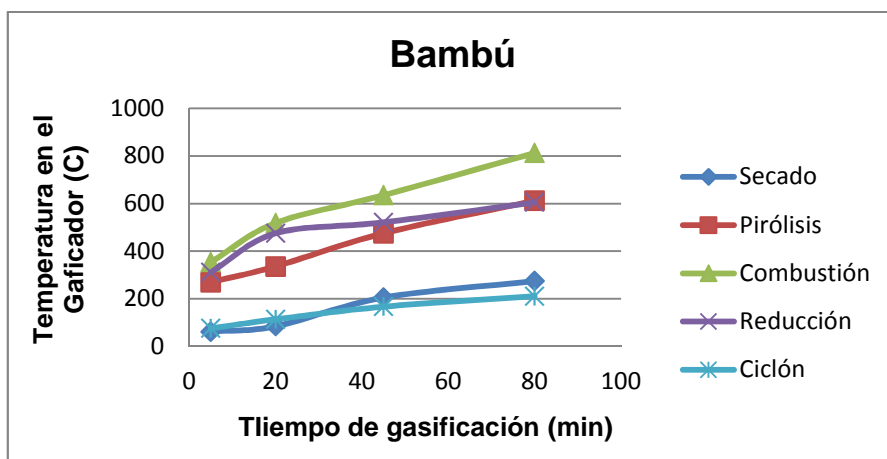


Figura 27. Temperatura vs. Tiempo de gasificación. (Bambú)

La tasa de calentamiento describe la velocidad a la cual es calentada la biomasa; esta depende del tipo de reactor, de los mecanismos de transferencia de calor del reactor a la biomasa, del tamaño de partícula, del tipo de biomasa y su porcentaje de humedad, entre otros.

Podemos observar que a medida que el proceso de gasificación avanza, aumenta la temperatura en las distintas zonas siendo la de combustión y reducción las más elevadas debido a que ahí ocurren todas las reacciones químicas que dan paso a la formación de carbonizados los cuales favorecen a la formación de productos gaseosos y alquitranes.

Cuando la gasificación se realiza a temperaturas muy altas, se pueden presentar problemas de aglomeración y sinterización y con ello, la disminución drástica en la cantidad de gas producido.

5.1.2. Flujo de aire total del proceso

La temperatura va aumentando progresivamente en las diferentes zonas del proceso de gasificación y para cada tipo de biomasa se empleó un rango de flujo de aire determinado.

La toma de datos se llevó a cabo para la cantidad de 4Kg de biomasa para cada tipo.

Tabla 17.

Temperatura final en las distintas zonas del Gasificador respecto al flujo de aire total

Biomasa	Flujo de aire total Kg/h	Zona del Gasificador				
		Secado T4 (C)	Pirólisis T2 (C)	Combustión T3 (C)	Reducción T1 (C)	Ciclón T6 (C)
Cascarilla de café	4,3	225	589	720	610	194
	5,6	231	598	729	621	205
	5,7	245	621	742	651	210
	6,2	271	643	767	674	225
Bagazo de cacao	4,8	232	611	731	631	202
	5,3	247	623	742	645	214
	5,5	259	647	758	671	223
	6,1	289	669	792	702	231
Bambú	5,2	245	621	738	631	209
	5,5	254	654	763	671	221
	5,8	276	674	778	697	234
	6,2	301	701	812	719	243

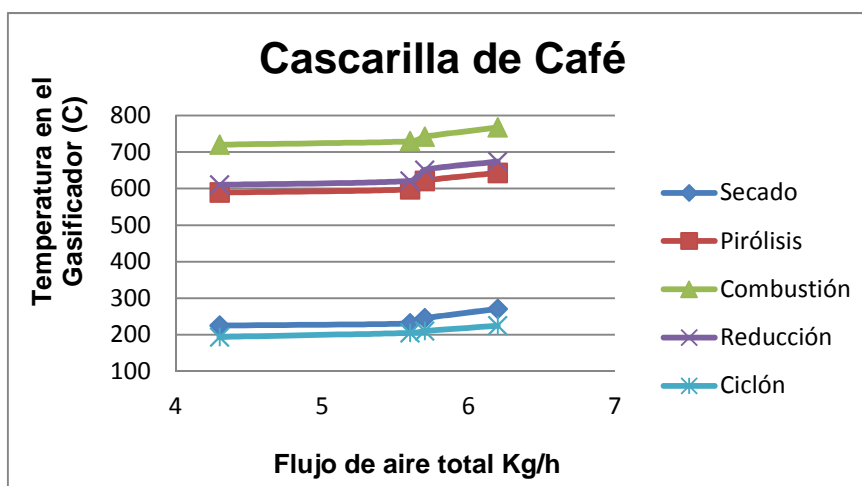


Figura 28. Temperatura final del proceso vs. Flujo de aire total. (Café)

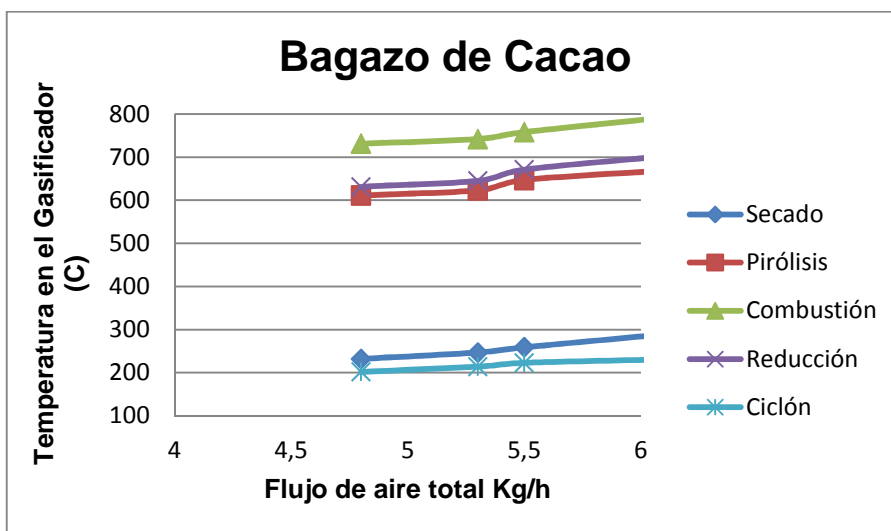


Figura 29. Temperatura final del proceso vs. Flujo de aire total. (Cacao)

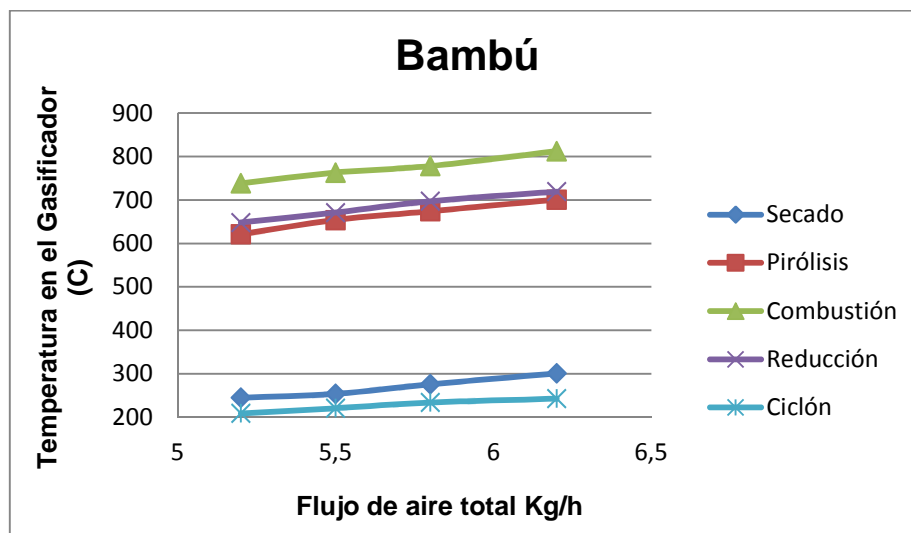


Figura 30. Temperatura final del proceso vs. Flujo de aire total. (Bambú)

En las figuras 29, 30 y 31 se puede observar como la temperatura de las diferentes zonas: Secado ($80 - 280^{\circ}\text{C}$), Pirólisis ($590 - 720^{\circ}\text{C}$), Gasificación o reducción ($580 - 730^{\circ}\text{C}$) y Combustión ($740 - 850^{\circ}\text{C}$) están dentro del rango necesario para que se desarrollen estos procesos.

Con este flujo de aire se obtiene una velocidad de reacción que aumenta la producción de carbonizados y con ello se reduce la presencia de material volátil y alquitranes en el proceso.

5.1.3. Presión en el filtro granular.

La toma de datos de esta presión se la realizó en el intercambiador de calor, ya que ahí se produce el enfriamiento parcial del gas de síntesis antes de que pase por el filtro granular.

Tabla 18.

Variación de temperatura a la entrada y salida del intercambiador de calor respecto a la presión en el reactor

Biomasa	Tiempo min.	Intercambiador de calor			
		T7 (Entrada)	T8 (Salida)	P1 (Entrada)	P2 (Salida)
		° C	C	Pa	Pa
Cascarilla de café	5	90	37	490	392
	15	122	42	589	392
	25	158	53	686	490
	40	205	67	686	589
Bagazo de cacao	5	84	34	490	392
	18	115	40	589	490
	35	172	55	686	392
	70	210	66	686	490
Bambú	5	92	35	490	392
	20	132	47	589	392
	45	165	58	686	490
	80	222	69	784	589

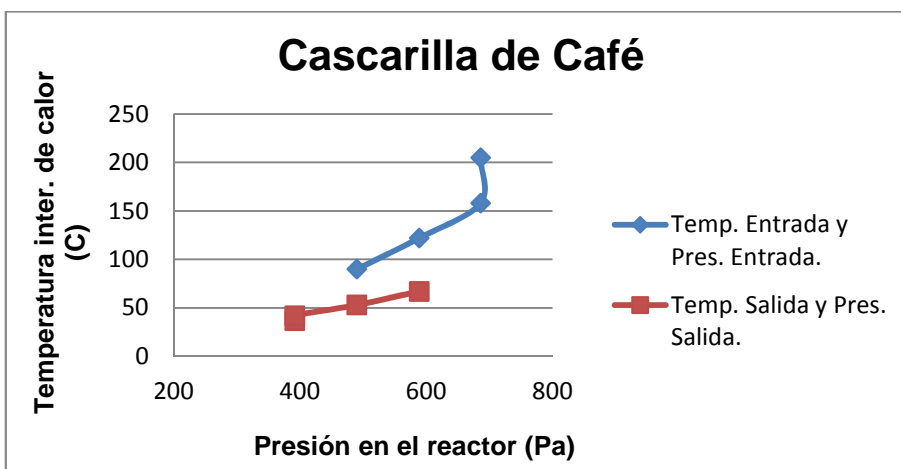


Figura 31. Temperatura vs. Presión en el reactor. (Café)

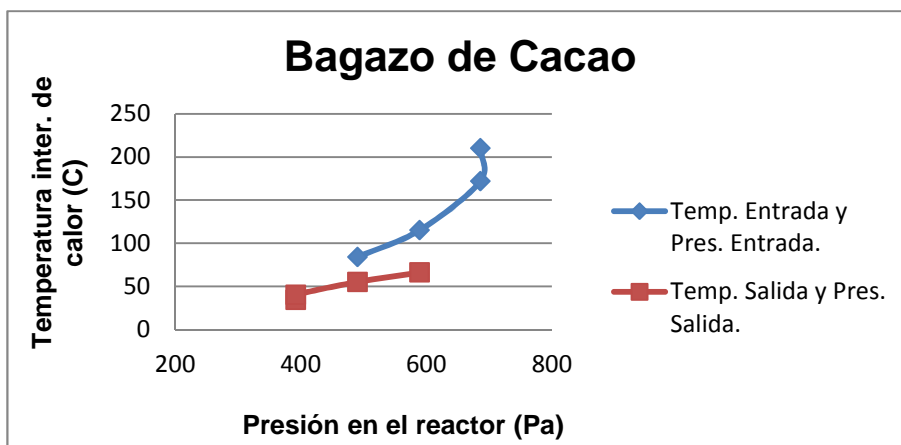


Figura 32. Temperatura vs. Presión en el reactor. (Cacao)

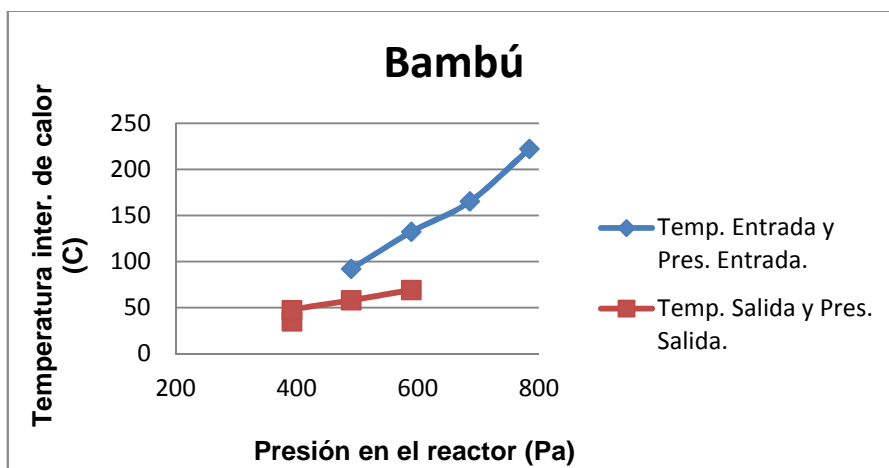


Figura 33. Temperatura vs. Presión en el reactor. (Bambú)

Observamos como a la entrada del intercambiador de calor el gas ingresa a mayor presión y mayor temperatura debido a que se produce un aumento en la velocidad de reacción y esto hace que se produzca dicho efecto, luego el gas de síntesis circula por todo el intercambiador y sale a menor temperatura y menor presión, para posteriormente pasar al filtro granular.

5.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.2.1. Resultados del balance exergético.

Tabla 19.

Resultado de balance de masa en el Gasificador

Biomasa	m_{comb}	m_{aire}	m_{cen}	m_{alq}	m_{gas}
	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h
Cascarilla de café	4,44	4,3	0,148	0,098	8,67
Bagazo de cacao	3,33	5,3	0,071	0,047	8,51
Bambú	2,67	5,8	0,038	0,019	8,41

Tabla 20.

Resultados del Balance exergético en el Gasificador

Biomasa	Q_{perdido}	sal	rev,sal	%
	Kwh	Kwh	Kwh	%
Cascarilla de café	-2566,79	3958,33	4726,28	83,75
Bagazo de cacao	-3502,43	5034,23	5209,14	96,64
Bambú	-1346,41	2905,62	5638,4	51,53

Tabla 21.

Resultados de irreversibilidades y exergía del flujo de salida

Biomasa	dest	2
	Kwh	KJ/Kg
Cascarilla de café	1111,95	174,19
Bagazo de cacao	174,91	241,67
Bambú	2732,78	273,95

Tabla 22.

Resultados de eficiencia del Gasificador según la relación de aire

Biomasa	Ra %	m _{aire} Kg/h	%
Cascarilla de café	38,71	4,3	83,75
Bagazo de cacao	39,47	5,3	96,64
Bambú	45	5.8	51,53

Tabla 23.

Resultados de eficiencia en el Gasificador según porcentaje de humedad y poder calórico de la bioma utilizada

Biomasa	Valor calórico MJ/Kg	Humedad %	%
Cascarilla de café	16,7	9	83,75
Bagazo de cacao	15,8	6	96,64
Bambú	16,1	13	51,53

Tabla 24.

Resultado del tiempo de arranque del proceso de gasificación según el porcentaje de humedad y el tamaño de partícula de la biomasa

Descripción	Cascarilla de café	Bagazo de cacao	Bambú
Humedad de la biomasa	9%	6%	13%
Tamaño de la partícula	0.5 – 1 cm	1 – 3 cm	2 – 4 cm
Tiempo de inicio de gasificación (tiempo de llama)	16 min	12 min	20 min
Tiempo final de gasificación	36 min	60 min	1h 10min
Tiempo total del proceso de gasificación (h)	0.866 h.	1.2 h.	1.5 h.
gr. De ceniza en el reactor	4.5oz (127.575gr)	3oz (85.05gr)	2oz (42.525gr)
gr. De alquitrán + agua producidos	3oz (85.05gr)	2oz (56.7gr)	1oz (28.35gr)

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El Gasificador, además de la madera, puede ser operado con otras biomásas y su operación resulta más exitosa cuando se cumplen los requerimientos de humedad y dimensiones especificadas por el fabricante. En la tabla 24 observamos que la cascarilla de café y el bagazo de cacao cumplen con estas recomendaciones, y aunque tienen mayor contenido de cenizas, el Gasificador opera más eficientemente que con el bambú.

La humedad de la biomasa influye también en el tiempo de arranque del reactor, menores humedades requieren menores tiempos. Así, en la tabla 24 podemos notar que el bagazo de cacao tiene un inicio de proceso de gasificación (tiempo de llama) a los 12 minutos, debido a que su humedad es menor respecto a las otras biomásas.

El poder calorífico de cualquier tipo de biomasa disminuye conforme aumenta el contenido de humedad en la misma. Es decir, la cantidad de biomasa a utilizar es inversamente proporcional al poder calorífico del mismo, para ello en la tabla 23 se puede distinguir este efecto con el bagazo de cacao que aunque tiene un poder calórico inferior tiene un porcentaje de humedad más bajo que el café y el bambú, lo cual hace que la eficiencia del proceso de gasificación alcance el 96%.

Obsérvese que para un suministro de aire de 5.3 Kg/h se obtiene el mayor valor de la eficiencia del Gasificador (96 %), una potencia térmica de salida de 5034 Kwh, sin embargo para un flujo mayor de 5.7 Kg/h como el que se empleó en la caña guadua se obtiene una eficiencia de 51 %, esta diferencia corresponde a la relación de aire empleada que para el primer caso del bagazo de cacao es de 0.39 y en el segundo caso es de 0.45, y según los datos del fabricante para este Gasificador el rango de trabajo es entre 0.25 – 0.4 para alcanzar los valores de eficiencia más altos.

El proceso de gasificación que registró mayor pérdida de exergía por irreversibilidades fue el que se realizó con el bambú, ya que se desperdicia el potencial para producir trabajo a una tasa de 2732.48 Kwh, esto debido también a las características de la biomasa ya antes mencionadas y los parámetros de operación empleados.

La exergía del flujo de salida se refiere al potencial máximo de trabajo del flujo de gas en las condiciones de entrada.

5.2.2. Resultados del análisis de cromatografía de gases

El análisis de cromatografía de gases de los tres tipos de biombras utilizadas de lo realizó en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. ANEXO G.

CAPÍTULO VI

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

6.1. Análisis económico.

6.1.1. Costos directos

Tabla 25.

Materiales, equipos y mano de obra

DESCRIPCION	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
		(USD)	(USD)
Termocuplas tipo K con bulbo de 4 plg.	8 und.	35.00	280.00
Conectores para termocuplas tipo K.	16 unid	6.00	96.00
Instalación de termocuplas y conectores	1	50.00	50.00
Análisis de cromatografía de gases.	3	50.00	150.00
Biomasa – Cascarilla de café.	200Kg	5.00	10.00
Biomasa – Bagazo de cacao.	200Kg	5.00	10.00
Biomasa – Bambú.	200Kg	3.00	6.00
		TOTAL	602.00

6.1.2. Costos indirectos

Tabla 26.

Materiales, herramientas y transporte

DESCRIPCION	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
		(USD)	(USD)
Múltímetros para censar temperatura.	2	30.00	60.00
Llave universal para ajuste de pernos en bridas.	1	15.00	15.00
Llave de tubo para ajuste de uniones.	1	12.00	12.00
Materiales para limpieza y encendido del Gasificador.	1	50.00	50.00
Transporte de materia prima.	1	40.00	40.00
		TOTAL	177.00

6.1.3. Misceláneos

Tabla 27.

Otros costos indirectos

DESCRIPCION	COSTO
	(USD)
Útiles de oficina.	20
Impresiones.	90
Copias de textos.	20
Varios.	100
TOTAL	230

6.1.4. Costo total del proyecto

Tabla 28.

Total del proyecto

Ítem	Descripción	Valor
1	Costos directos.	602.00
2	Costos indirectos.	177.00
3	Misceláneos.	230.00
	TOTAL	1009.00

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1. CONCLUSIONES.

- Dentro del Plan Nacional de transformación de la matriz energética, el proceso de gasificación de residuos agroindustriales se presenta como una gran alternativa para pasar de una energía cara y contaminante, basada en hidrocarburos, a una más barata y limpia que tiene la ventaja de ser instalada en comunidades localizadas en zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional.
- De acuerdo a las características fisicoquímicas iniciales y los parámetros óptimos de operación del sistema, la cascarilla de café, el bagazo de cacao y el bambú cumplen con las condiciones requeridas para ser utilizados en gasificación, comportándose como buenos agentes combustibles.
- Los resultados obtenidos a partir de las mediciones del contenido de alquitrán y cenizas del gas generado, están por debajo de los valores medios reportados en la literatura y en las evaluaciones hechas a gasificadores concurrentes con una única inyección de aire, lo cual demuestra que con el uso de dos puntos de suministro de aire se consigue una mejora de la calidad del gas.
- Un aspecto importante de los resultados obtenidos de forma numérica se centra en la eficiencia del gasificador que está por encima del 40% de una maquina térmica real y nos indica que el poder calórico del gas pobre resultante es aceptable.
- Además el aprovechamiento de los gases combustibles generados producto de la gasificación, como monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano, mediante la producción de energía eléctrica, reduce la emisión de gases de efecto invernadero, que se generarían normalmente al descomponerse los residuos sólidos.

7.2. RECOMENDACIONES

- Se deben desarrollar trabajos futuros para la determinación de la influencia de la variación de parámetros tales como tipo de biomasa, tamaño de grano y agente gasificante.
- El país cuenta con un gran inventario de biomasa residual agrícola para generar energía a través de la gasificación, por lo que instituciones como el INER, deberían aprovechar este recurso para reducir la demanda de energía eléctrica por ejemplo en empresas agroindustriales.
- Se recomienda que la planta sea operada en el futuro para investigaciones sobre gas de síntesis y evitar que se deteriore por falta de uso.
- Incentivar a Universidades y Escuelas Politécnicas como la Universidad de las Fuerzas Armadas, para que utilice la planta con fines académicos y de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- AENE. (2003). *Muestreo y caracterización de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá.
- anecafé. (s.f.). *Asociación Nacional de Exportadores de Café*. Obtenido de <http://www.anecafe.org.ec/>
- ANKUR. (s.f.). *Ankur Scientific Energy Technologies*. Obtenido de <http://www.ankurscientific.com/>
- CIE. (s.f.). *Corporación para la Investigación Energética*. Obtenido de <http://www.energia.org.ec/cie/>
- ECOELECTRIC. (2010). *Recurso biomásico en el Ecuador*, 21-22.
- FOCER. (2002). *Manuales sobre energías renovables/BIOMASA*. Costa Rica: BUN-CA.
- Fonseca, N. (2003). *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa en motores de combustión interna alternativos*. Bogotá/Colombia.
- García, H. (2011). *Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Huaráz, C. (2013). *Gasificador a base de cascarilla de arroz*. Lima/Perú.
- INEC-MAC-SICA. (2002). III Censo Nacional Agropecuario.
- López, D. (2009). *ENERGÍA DE BIOMASA*.
- Martín. (2008). *Gasification Basics*. Berkley: All Power Labs.
- NESTLÉ-ECUADOR. (2008). *Cacao como recurso energético*. Manta.
- Phyllis2, E. (s.f.). *Database for biomass and waste Phyllis2*. Obtenido de <https://www.ecn.nl/phyllis2/>
- Plan Nacional de Promoción del Bambú, M. d. (20 de Marzo de 2010). *TODOPRODUCTIVIDAD*. Obtenido de <http://todoproductividad.blogspot.com/search?q=bambu>
- Program, S. (1998). *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Golden. COLORADO.

ANEXOS

