

BALANCE ENERGÉTICO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE
GASIFICACIÓN, EN LA FINCA ECOLÓGICA TOSOLY UBICADA EN
SOCORRO, SANTANDER*

BIANKA GAETANA RUGELES HERNANDEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título
de Ingeniera Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
BUCARAMANGA
2007

BALANCE ENERGÉTICO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE
GASIFICACIÓN, EN LA FINCA ECOLÓGICA TOSOLY UBICADA EN
SOCORRO, SANTANDER*

BIANKA GAETANA RUGELES HERNANDEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título
de Ingeniera Electricista

Director:

Ing. Fabio Emiro Sierra

Codirector:

Prof. Jaime Galindo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
BUCARAMANGA
2007

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

Dr. Ing. Msc Fabio Emiro Sierra, quien es el director del proyecto y con quien tuve la oportunidad de aprender y profundizar sobre temáticas relacionadas con Mecanismos de Desarrollo limpio.

UTA FOUNDATION, por darme la oportunidad de trabajar en la finca Ecológica Tosoly, ubicada en Socorro-Santander

A mi familia y a Dios por su apoyo incondicional.

RESUMEN

Titulo

BALANCE ENERGÉTICO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN, EN LA FINCA ECOLÓGICA TOSOLY UBICADA EN SOCORRO, SANTANDER*

Autora

BIANKA GAETANA RUGELES HERNANDEZ**

Palabras claves

Complejos de cobre-hidrógeno, DFT (B3LYP), superficie de energía potencial (SEP), teoría de átomos en moléculas, densidad de carga, puntos críticos sobre la SEP.

Descripción

En este trabajo se presenta la caracterización y el balance energético del sistema de gasificación a altas y bajas temperaturas del gasificador de lecho fijo, que se encuentra en la finca ecológica Tosoly, en Socorro Santander. Se realizaron diferentes pruebas a la biomasa residual y materia prima utilizada en la alimentación de la planta, tales como Análisis Elemental y análisis próximo, para poder predecir el comportamiento del combustible inicial en el proceso. Se medieron parámetros tales como presión, temperatura y flujo de gas y agua, en varios puntos de la planta, con el objetivo de conocer como se llevaba a cabo el proceso de gasificación y encontrar los posibles procesos que hacían ineficiente el sistema, para realizar las diferentes recomendaciones.

Referente al sistema de generación eléctrica, se hicieron pruebas sobre el generador y se investigó sobre el motor diesel y su modificación a 100% gas natural. También se realizó un levantamiento a la instalación y al sistema de distribución que alimentaba los diferentes circuitos existentes dentro de la finca.

Finalmente se comprobó la eficiencia del sistema, teniendo en cuenta los diferentes recursos naturales renovables utilizados, los medios de transformación de estos recursos y al aprovechamiento sostenible de los mismos.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Directora: Fabio Emiro Sierra.

ABSTRACT

Title

ENERGY BALANCE AND CHARACTERIZATION OF PROCESS GASIFICACIÓN, ON
THE FARM IN ECOLOGICAL TOSOLY UBICADA RELIEF, SANTANDER *

Author

BIANKA GAETANA RUGELES HERNANDEZ**

Keywords

gasification, fixed bed, characterization, energy efficiency

Description

This paper presents the characterization and energy balance gasification system at high and low temperatures fixed bed gasifier, which is on the farm ecological Tosoly, Relief Santander. Various tests were performed to biomass and waste raw material used in the feeding of the plant, such as Elemental Analysis and analysis next, in order to predict the behavior of the initial fuel in the process. It medieron parameters such as pressure, temperature and flow of gas and water in several parts of the plant, with the aim to learn as carried out by the gasification process and find possible processes that were inefficient system, to perform various recommendations.

Regarding the electricity generation system was tested on the generator and was investigated on the diesel engine amendment to 100% natural gas. We also conducted a survey to the installation and the distribution system that fed the different circuits within the estate.

Finally, we checked the efficiency of the system, taking into account the different renewable natural resources used, the means of transformation of these resources and sustainable use of the same.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecanicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Directora:
Fabio Emiro Sierra

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
2.-BIOMASA	16
2.1Clasificación de la biomasa	17
2.1.1 Biomasa primaria	17
2.1.2 Biomasa residual	18
2.2 Composición de la biomasa	18
2.3 Caracterización de la biomasa	19
2.3.1 Análisis próximo	19
2.3.1.1 Humedad	19
2.3.1.2 Contenido de materia combustible volátil	20
2.3.1.3 Contenido de cenizas	21
2.3.1.4 Densidad del material	21
2.3.2Análisis mediato, último o elemental	22
2.3.3 Poder calorífico	23
2.4 Ventajas de la biomasa	24
2.5 Restricciones en el uso de la biomasa	
2.6 Procesos de conversión de biomasa en energía	26
2.6.1 Métodos biológicos	26
2.6.1.1 Digestión anaeróbica o gasificación a bajas temperaturas	26
2.6.1.2 Fermentación alcohólica	27
2.6.1.3 Relleno sanitario	27
2.6.2 Procesos termoquímicos	28
2.6.2.1 Combustión	28
2.6.2.2 Pirolisis	28
2.6.2.3 Gasificación a altas temperaturas	29
2.6.2.4 Licuefacción	30
3. PROCESOS DE GASIFICACIÓN	31
3.1Gasificación a bajas temperatura o digestión anaeróbica	31
3.1.1Etapas del proceso de digestión anaeróbica	31
3..1.1.1 Solubilización	31

3.1.1.2 Acidogénesis	31
3.1.1.1.3Metanogénesis	31
3.1.2 Características de la biodigestión	32
3.1.2.1 PH	32
3.1.2.2 Temperatura	33
3.1.2.3 Razón C/N	33
3.1.2.4 Porcentaje de agua	33
3.1.3 Tipos de digestores y funcionamiento	33
3.1.3.1 Digestores de carga por cargas de lotes	34
3.1.3.2 Digestores de carga continua	34
3.1.3.2.1 Verticales	34
3.1.3.2.2 De desalojo	34
3.1.3.3 De cúpula fija o tipo chino	35
3.1.3.4 De cúpula móvil o tipo hindu	35
3.1.3.5.De estructura flexible	35
3.1.3.5.1 Biodigestor de flujo continuo	36
3.2Gasificación a altas temperaturas	37
3.2.1.Reacciones de gasificación	38
3.2.2 Variables del proceso de gasificación	41
3.2.2.1Temperatura	40
3.2.2.2Tiempo de permanencia	40
3.2.2.3 Agente oxidante	41
3.2.2.4Materual de inicio	42
3.2.3.1Gasificadores de lecho fijo	43
3.2.3.1.2 Gasificadores en contracorriente	
3.2.3.1.3 Gasificadores de flujo cruzado	44
3.2.3.2 Gasificadores de lecho fluidizado	44
3.2.3.2.1 Gasificadores de lecho fluidizado con Circulación	45
3.2.3.2.2 Gasificadores gemelos de lecho fluidizado	45
3.2.4 Clasificación de los procesos de gasificación	46
3.2.5 Eficiencia energética del proceso de gasificación	46
3.2.6 Productos de la gasificación	47
3.2.7 Residuos sanitarios y ambientales derivados del empleo de gas	48
3.2.7.1 Riesgos tóxicos	49
3.2.7.2 Riesgos de incendio	50
3.2.7.3 Riesgos de explosión	51
3.2.7.4 Riesgos ambientales	52

3.2.8 Aplicaciones	52
3.2.8.1 Combustión in situ del gas producido	52
3.2.8.2 Combustión externa del gas producto	53
3.2.8.3 Combustión interna en una máquina	53
3.2.8.4 Combustión en una turbina de gas	53
3.2.8.5 Uso como materia prima	53
4. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE GAS	54
4.1 Fuente de energía primaria	54
4.1.1 Gas natural	54
4.2 Máquinas Mecánicas	55
4.2.1 Turbinas a gas	55
4.2.1.1 Ciclo Brayton	55
4.2.1.2 Definición	57
4.2.1.3 Clasificación	57
4.2.1.3.1 Según el flujo de gases en relación con el eje	59
4.2.1.3.2 Según la forma de montaje del generador de gas y de la turbina de potencia	59
4.2.1.3.2.2 De dos ejes	59
4.2.1.3.3 De acuerdo el número escalonamiento	60
4.2.1.3.3.1 Turbinas de acción	60
4.2.1.3.3.2 Turbinas de reacción	60
4.2.1.3.4 De acuerdo a la clase de circuito	60
4.2.1.3.4.1 Turbina con un escalonamiento	60
4.2.1.3.4.2 Turbina de gas en circuito cerrado	61
4.2.1.3.5 De acuerdo al campo de aplicación	62
4.2.1.3.5.1 Turbosobrealimentador	62
4.2.1.3.5.2 Propulsión aeronáutica	62
4.2.1.4 Rendimiento de las turbinas de combustión a gas	62
4.2.2 Máquinas de combustión interna	64
4.2.2.1 Ciclo Otto	64
4.2.2.2 Ciclo Diesel	65
4.2.2.3. Definición	65
4.2.2.4 Elementos principales de los motores de combustión interna	66
4.2.2.5 Cámara de combustión	66
4.2.2.5.1 Sistema de bombeo	66
4.2.2.5.2 Sistema de alimentación	66
4.2.2.5.3 Encendido	67
4.2.2.5.4 Sistema de arranque	67

4.2.2.5.5 Refrigeración	68
4.2.2.6 Motor de gasolina con sistema dual gas natural/gasolina	68
4.2.2.7 Motor diesel con sistema de dual gas natural/diesel	70
4.2.2.7.1Funcionamiento del motor diesel con combustible	71
4.2.2.8 Dispositivos para combustible dual	72
4.2.2.8.1 Cámaras de mezclado simple	72
4.2.2.6.2 Motor diesel convertido en motor a gas	72
4.2.2.9 Motor a gas	73
4.3 MÁQUINAS ELÉCTRICAS	74
4.3.1Clasificación de las máquinas eléctricas	74
4.3.1.1 Clasificación por usos	74
4.3.1.2Clasificación por tipo de corriente y su funcionamiento	74
4.3.1.3Clasificación por nivel de potencia	75
4.3.1.4 Clasificación por frecuencia de giro (velocidad)	76
5. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	77
5.1 DESCRIPCION DE EQUIPOS	78
5.1.1 GASIFICADOR DE LECHO FIJO	78
5.1.1.1Tolva de alimentación	79
5.1.1.2 Reactor	79
5.1.2 SISTEMA DE REFRIGERACION	80
5.1.2.1 Tubo ventura	81
5.1.2.2 Tanque acumulador	82
5.1.2.3 Motobomba	82
5.1.2.3.1 Motobomba AC	82
5.1.2.3.2 Motobomba DC	82
5.1.2.4 Desagüe	83
5.1.3 SISTEMA DE FILTRACION	83
5.1.3.1 Filtro fino	83
5.1.3.2 Filtro de seguridad	85
5.1.4 SISTEMA DE GENERACION DE ENERGÍA ELÉCTRICA	86
5.1.4.1 Motor Diesel modificado	86
5.1.4.2 Generador	86
5.1.4.3 Tablero de medición eléctrica	86
5.1.4.4 Batería	86
5.1.5 SISTEMA DE BIOGÁS	86
5.2 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS	87

6. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA	90
6.1 Análisis próximo	90
6.1.1 Poder calorífico	90
6.1.1.2 Parte experimental	91
6.1.1.2.1 Desarrollo	91
6.1.1.2. 2 Cálculos	94
6.1.1.2.2.1 Poder calorífico de las muestras en base	96
6.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD	97
6.1.2.1 Desarrollo	99
6.1.2.2 Cálculos	99
6.1.3 CONTENIDO DE CENIZA	101
6.1.3.1 Desarrollo	101
6.1.3.2 Cálculos	102
6.1.4 Materia volátil	103
6.1.4.1 Desarrollo	104
6.1.4.2 Cálculos	104
6.2ANALISIS ELEMENTAL	105
6.2.1 Composición elemental	105
6.2.1.1 Diagrama de Van-Krevelen	106
6.2.1.2 Calculo de formula elemental	107
6.2.1.3 Cálculo del poder calorífico	108
 7. DESARROLLO EXPERIMENTAL	 109
7.1 Temperatura de ignición	109
7.2 Medición de la temperatura	111
7.2.1 Resultados Obtenidos	112
7.3 Medición de presión y flujo	113
7.3.1 Resultados	113
7.4 Composición del gas producido.	114
7.5 Medición de Variables eléctricas	114
7.5.1 Potencia y Torque	114
7.5.1.1 Resultados	116
7.5.2 Levantamiento de la red de distribución eléctrica	118
 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Efectos tóxicos de diferentes concentraciones de monóxido de carbono en el aire.	27
Tabla 2. Tabla comparativa entre un motor Diesel y Otto.	68
Tabla 3. Poder calorífico de las muestras.	95
Tabla 4. Media aritmética y desviación estándar del poder calorífico calculado.	95
Tabla 5. Comparación del poder calorífico entre las muestras y carbón.	96
Tabla 6. Poder calorífico de las muestras recolectadas en invierno.	97
Tabla 7. Comparación del poder calorífico de las muestras en verano e invierno.	97
Tabla 8. Cálculos para determinar la Humedad higroscópica.	99
Tabla 9. Desviación y media aritmética de la humedad calculada.	99
Tabla 10. Tabla comparativa de la humedad para muestras en invierno y al corte.	101
Tabla 11. Contenido de ceniza en base húmeda y base seca.	
Tabla 12. Contenido de ceniza promedio.	102
Tabla 13. Cálculos para material volátil en base húmeda, base seca y base libre de cenizas.	104

Tabla 14	Materia volátil promedio.	105
Tabla 15.	Análisis Elemental.	106
Tabla 16.	Datos y cálculos para el diagrama de VAN-KREVELEN.	107
Tabla 17.	Calculo de las relaciones atómicas.	108
Tabla 18.	Temperatura de ignición medida en las muestras.	110
Tabla 19.	Composición del gas de síntesis.	114

LISTA DE ECUACIONES

Ec 1. Reacción bruta de la fotosíntesis en plantas verdes y algas	16
Ec 2. Reacción neta de la fotosíntesis en plantas verdes y algas	16
Ec 3. Reacción bruta de la fotosíntesis en bacterias fotosintéticas:	16
Ec 4. Contenido de humedad	20
Ec5. Materia volátil en base húmeda	20
Ec6. Materia volátil en base secaBase	20
Ec7. Materia en base seca libre de cenizas	20
Ec8. Contenido de ceniza en base húmeda	21
Ec.9 Contenido de ceniza en base seca	21
Ec.10 Densidad verdadera	22
Ec11. Poder calorífico superior	23
Ec 12. Reacciones típicas en la metalogénesis	32
Ec 13 Reacciones típicas en la metanogénesis	32
Ec14 Reacciones heterogéneas gas-agua	38
Ec 22. Eficiencia energética del proceso de gasificación	47
Ec 23 Poder calorífico	92

Ec 24 Poder calorífico de las muestras recolectadas en invierno	95
Ec25 Contenido de humedad	99
Ec.26 Contenido de ceniza en base húmeda y base seca	102
Ec.27 Contenido de ceniza en base seca	102
Ec.28 Contenido de material volátil en base húmeda	104
Ec.29 Contenido de material volátil en base seca	104
Ec.30 Contenido de material volátil en base seca libre de cenizas	104
Ec 31. Relación de carbono/oxígeno	107
Ec 32. Poder Calorífico teórico	109

INTRODUCCION

El sistema colombiano de generación de energía eléctrica presenta la mayor capacidad instalada en plantas hidroeléctricas, seguida de plantas térmicas a gas y a carbón. Sin embargo en el país no existe cobertura total de energía, ya sea por razones económicas o geográficas, siendo amplio en muchas regiones, especialmente en el campo y zonas selváticas, el uso de la leña para la combustión y de plantas diesel en labores domésticas.

La utilización de residuos agrícolas como el bagazo de la caña, la cascarilla de arroz, el cisco de café, las fibras y el cuesco de palma de aceite, se ha hecho principalmente a través de combustión en los ingenios, molinos, trilladoras y plantas extractoras y casi siempre pasan a ser un elemento de desecho cuando no se utilizan para la generación. Respecto a los residuos provenientes de la ganadería los cuales están en mayor cantidad que los agrícolas (El 45% del territorio nacional es usado para esta actividad), son utilizados en muy pocas ocasiones para el abono de los cultivos, y al igual que los residuos agrícolas estos son considerados casi siempre como basura.

La sustitución de combustibles fósiles y de la leña por fuentes de energías alternativas disponibles localmente, así como el aprovechamiento de la biomasa residual sólida seca y húmeda para la generación de energía a partir de biogás y gas de síntesis constituyen una oportunidad para el “desarrollo de proyectos de mecanismo de desarrollo limpio” reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero y que tengan un efecto decisivo sobre el desarrollo sostenible de las regiones no Interconectadas.

Es así como la “ fundación para la producción agropecuaria tropical sostenible capítulo Colombia-UTA”, con sede en Socorro, Santander desde hace algunos

años, en la finca Tosoly ha venido desarrollando proyectos de investigación relacionados con generación de energía a partir de recursos renovables, tales como el sol, y la biomasa primaria y residual. Referente a la biomasa, obtienen gas pobre a partir de procesos de biodigestión (biogás) y gasificación a altas temperaturas (gas de síntesis), los cuales son el combustible de un motor que está acoplado a un generador.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el sistema de gasificación y realizar el balance energético del gasificador del lecho fijo ubicado en la finca ecológica Tosoly. En los tres primeros capítulos se exponen aspectos teóricos generales sobre biomasa tales como clasificación, caracterización, procesos de conversión para obtener energía y generación de energía eléctrica a partir de gas de síntesis y biogás.

La descripción de la planta, definiendo sus partes y funcionamiento se encuentra en el capítulo cinco. En el capítulo seis se describe y analiza las pruebas realizadas para caracterizar la materia prima.

En el capítulo siete y ocho se presenta y analiza la información experimental utilizada en este trabajo, describiendo los procedimientos para su realización.

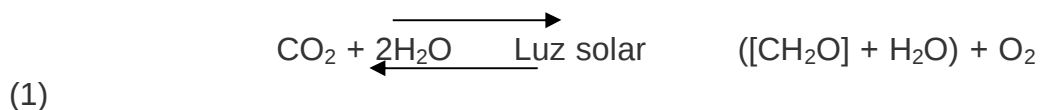
Finalmente en el capítulo nueve se presentan las conclusiones y las recomendaciones para mejorar el proceso de gasificación en el gasificador de lecho fijo de la finca Tosoly con el fin de hacer uso racional y eficiente de la energía.

2. BIOMASA

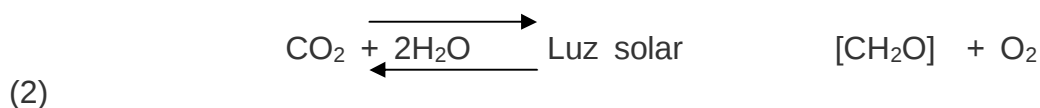
La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material de vegetal y animal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o animales.

El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. La energía química que se almacena en las plantas y los animales (que se alimentan de plantas u otros animales), o en los desechos que producen, se llama bioenergía. Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía, a menudo en la forma de calor, y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de la planta. Esencialmente, el uso de la biomasa para la energía es la inversa de la fotosíntesis. [28]

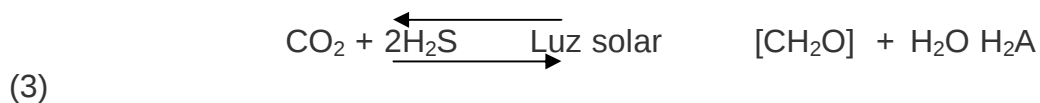
Reacción bruta de la fotosíntesis en plantas verdes y algas



Reacción neta de la fotosíntesis en plantas verdes y algas



Reacción bruta de la fotosíntesis en bacterias fotosintéticas:



Este proceso de captación de la energía solar y su acumulación en las plantas y árboles como energía química es un proceso bien conocido. Los carbohidratos, entre los que se encuentra la celulosa, constituyen los productos químicos primarios en el proceso de bioconversión de la energía solar y al formarse aquellos, cada átomo gramo de carbono absorbe cierta cantidad de energía solar, que es precisamente la que después se recupera, en parte con la combustión de la celulosa o de los combustibles obtenidos a partir de ella (gas, alcohol, etc.) [28].

En la naturaleza, en última instancia toda la biomasa se descompone a sus moléculas elementales acompañada por la liberación de calor. Por lo tanto la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales pero en una tasa más rápida. De todas las fuentes renovables de energía, la biomasa se diferencia en que almacena energía solar con eficiencia. Además, es la única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. [3]

2.1 CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

La clasificación de la biomasa se hace de acuerdo a su origen de la siguiente forma:

Biomasa Primaria

Biomasa Residual

2.1.1 Biomasa primaria

Está compuesta por todo material de origen biológico producido por los vegetales a través de la captación de la energía solar y asimilación del CO₂ atmosférico y agua, mediante la fotosíntesis.

Sus elementos son aprovechados en estado natural en cuanto a características y localización. Básicamente, la conforman árboles y arbustos, pastos cultivos y plantas acuáticas.

Su gran ventaja es que se trata de una fuente renovable y con una alta expectativa de vida. [27]

Sin embargo el aprovechamiento con lleva a algunos inconvenientes, entre los que se destacan:

- La biomasa terrestre está muy dispersa siendo casi imposible su recolección, transporte y transformación en alguna forma energética útil.
- De la biomasa terrestre, gran parte, es necesario conservarla y protegerla, con el ánimo de preservar los ecosistemas.
- La mayor parte de esta biomasa es consumida, principalmente, por animales de orden superior, microorganismos, y, en mínima parte, por el hombre.

2.1.2 Biomasa residual

Tiene dos orígenes definidos: uno es el procesamiento de biomasa primaria y el otro de desechos orgánicos de tipo animal. Estos incluyen los provenientes de animales libres y de animales en procesamiento (plantas de sacrificio) [13]. En este conjunto, por su importancia, pueden ser citadas entre otras:

- La biomasa generada por la actividad urbana, tales como las basuras. los residuos de mercados, y los vertimientos orgánicos domésticos
a los alcantarillados.

- También son importantes los residuos agropecuarios, tales como: pulpa de café, cascarilla de arroz, residuos de crianza y sacrificio de animales, residuo de aserríos, etc.

Colombia es un país cuya economía está basada en la producción del sector rural, el cual aporta aproximadamente, el 65% de nuestros alimentos, el 30% de las materias primas para la actividad industrial y agroindustrial, y genera más del 85% de nuestras exportaciones.

Como consecuencia de esta gran actividad agropecuaria, es enorme la cantidad de biomasa residual que se produce, esta representa una potencial fuente de energía que podría ser de gran provecho.

2.2 COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA

Está compuesta por carbono elemental, compuestos orgánicos complejo de estructura desconocida y material mineral.

Los compuestos orgánicos (básicamente alquitranes) contienen carbono, hidrogeno, oxigeno, azufre y nitrógeno dentro de su estructura.

La composición se establece mediante dos procedimientos de análisis: el análisis próximo o inmediato y el análisis mediato, último o elemental

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Cada tipo de biomasa tiene propiedades específicas que determinan su comportamiento como combustible en cualquier transformación a la que sea sometido. En las conversiones termoquímicas algunas propiedades de notable importancia son los contenidos de humedad, de ceniza,

material volátil, la densidad del material, la composición elemental y el poder calorífico. [5]

La determinación de estas propiedades se hacen mediante los procedimientos establecidos en las normas emitidas y publicadas por organizaciones de estandarización de la ISO.

La clasificación de los dos procedimientos de análisis para establecer las propiedades son:

2.3.1 Análisis próximo:

El análisis inmediato constituye la caracterización básica. Este análisis reporta el porcentaje en peso de los siguientes componentes:

2.3.1.1 Humedad

El contenido de humedad es la cantidad de agua en el material, expresado como un porcentaje del peso del material. Su valor se utiliza posteriormente para expresar composición del material respecto a un estado de referencia en base seca.

El agua se encuentra presente en el carbón en más de una forma: una parte con una mezcla mecánica y otra como una mezcla física y química.

La mezcla mecánica tiene las mismas propiedades del agua común y corriente y se encuentra en la superficie formando lo que se denomina agua libre [28].

El agua de la mezcla fisicoquímica se denomina agua combinada.

De acuerdo a lo anterior se tiene dos clases de contenido de humedad :

La humedad superficial o humedad contenida en la muestra que puede ser evaporada por una corriente de aire a 30°C, y la humedad higroscópica que puede ser conocida secando la muestra bajo un flujo constante de nitrógeno con temperaturas alrededor de los 106 ° u otros.

Mediante la norma ISO 5068–1983 se determina la humedad giroscópica de la muestra y su valor se calcula a partir de la diferencia de pesos.[15]

El cálculo de este contenido de humedad se hace con la siguiente ecuación,

$$W=(m_{ti}-m_{tf})*100/m_{ti} \text{ (\%)} \quad (4)$$

Un alto contenido de humedad reduce la eficiencia térmica porque el calor se emplea para eliminar el agua y, en consecuencia, esta energía no está disponible para las reacciones de reducción y para la transformación de la energía térmica en energía química del gas. Por lo tanto, un alto contenido de humedad se traduce en valores caloríficos bajos del gas. [11]

2.3.1.2 Contenido de materia combustible volátil

En la biomasa no existe materia volátil como tal, sino que se produce a la descomposición que experimenta por calentamiento a alta temperaturas. Esta formada por gases combustibles, hidrógeno, monóxido de carbono, metano y otros hidrocarburos, vapores de alquitrán y algunos gases incombustibles como el dióxido de carbono entre otros. [29]

La materia combustible volátil se encuentra formando compuestos orgánicos de estructura molecular compleja que contiene todo el nitrógeno, el oxígeno, el hidrógeno y además carbono.

Para la biomasa el contenido de materia volátil varía, generalmente entre el 70 y 90% y es un parámetro importante porque sirve para encontrar la tecnología apropiada.

Esta prueba de determinación de materia volátil se realiza de acuerdo a la norma ISO 562-1996

Los cálculos de materia volátil se realizan según las siguientes formulas,[17]

$$\text{Base Húmeda} \quad F_{an} = (m_{ti} - m_{tf}) * 100 / m_{ti} \quad (\%) \quad (5)$$

$$\text{Base seca} \quad F_{wf} = F_{an} * 100 / (100 - W) \quad (\%) \quad (6)$$

$$\text{Base seca libre de cenizas} \quad F_{waf} = F_{wf} * 100 / (100 - A_{wf}) \quad (\%) \quad (7)$$

La cantidad de volátiles en el material de alimentación determina la necesidad de medidas especiales (ya sea en el diseño del gasificador o en el proyecto del conjunto de depuración del gas) a fin de extraer los alquitranes del gas producido, en aplicaciones para motores.

2.3.1.3 Contenido de cenizas:

La ceniza es el residuo restante cuando el combustible se quema bajo condiciones específicas, de manera que haya combustión total; y está formada por compuestos de silicio, aluminio, hierro, calcio y pequeñas cantidades de compuestos de magnesio, titanio, sodio y potasio, formando una mezcla de silicatos, óxidos y sulfatos [24]. Las cenizas tienen efectos catalizadores, los cuales deben ser tenidos en cuenta, en las reacciones presentes en el proceso de gasificación.

El contenido de ceniza en base húmeda y en base seca se calcula con las siguientes dos ecuaciones, respectivamente.[15]

$$A_{an} = m_{tf} * 100 / m_{ti} \quad (\%) \quad (8)$$

$$A_{wf} = A_{an} * 100 / (100 - W) \quad (\%) \quad (9)$$

Las cenizas pueden causar diversos problemas, sobre todo en los gasificadores de tiro directo o de tiro invertido. La formación de escoria o de clinker en el reactor, ocasionada por la fusión y aglomeración de cenizas, en el mejor de los casos representará un aumento importante de la mano de obra necesaria para el funcionamiento del gasificador. Si no se adoptan medidas especiales, la acumulación de escoria puede ocasionar la formación excesiva de alquitrán y el bloqueo total del reactor, con la posibilidad de que se produzcan fugas con el consiguiente riesgo de explosión, especialmente en los gasificadores de tiro directo.

2.3.1.4 Densidad del material

La densidad de un material se define como su peso por unidad de volumen.

Se suelen determinar tres tipos de densidad diferentes para un mismo material: La densidad a granel, la densidad aparente y la densidad verdadera.

La densidad a granel se determina llenando con el material un recipiente de volumen conocido y pesándolo. Los espacios vacíos entre las partículas del material varían de acuerdo al tamaño de partícula y al grado de compactación; por estos los valores obtenidos para la densidad a granel pueden diferir considerablemente.

La determinación de la densidad aparente involucra el uso de un fluido que no penetre completamente los poros del material. Los valores de densidad aparente para un material determinado difieren cuando es medida en fluidos diferentes, dependiendo del tamaño molecular y la capacidad del fluido para penetrar los poros.

La densidad verdadera se determina utilizando el gas, el cual es generalmente helio. Este presenta varias ventajas; Tener un diámetro atómico suficientemente pequeño que le permite penetrar en los poros de menor tamaño del material; ser un gas noble bastante estable a los cambios del ambiente. [12]

En el cálculos de la densidad verdadera se utiliza la siguiente formula, en la cual se tiene en cuenta, además, el contenido de humedad de la muestra,

$$D_v = m_{ti} / (V \cdot 100 / (100 - W)) \quad (\text{Kg/cm}^3) \quad (10)$$

2.3.2 ANALISIS MEDIATO, ÚLTIMO O ELEMENTAL

Este análisis es más detallado que el análisis próximo, es el análisis requerido en la realización de balances de materia y energía.

El análisis elemental es un análisis que reporta los porcentajes en peso de las cenizas y los elementos últimos contenido en el carbón, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

Estos elementos, en el análisis último, provienen de los siguientes componentes del análisis próximo:

CARBONO: Es la suma del carbono fijo y el carbono presente en la materia combustible volátil.

HIDRÓGENO: Es la suma del hidrogeno presente en la materia combustible volátil y en la humedad.

OXÍGENO: Es la suma del oxigeno presente en la materia combustible volátil y en la humedad.

NITRÓGENO: Esta presente solamente en la materia combustible volátil.

AZUFRE: Es la suma del azufre presente en la materia combustible volátil (azufre orgánico) y el contenido en la materia mineral el carbón(azufre inorgánico).

Para la estimación de los contenidos de estos elementos no se sigue una norma de estandarización. Para la estimación se utilizan analizadores automáticos, los cuales deben tener principios de medición normalizados y ser contruidos bajo normas especificas, lo que permite asegurar que los valores obtenidos pueden ser comparables con los valores de otro analizador.[12]

2.3.3 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la reacción química total entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión. La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior y poder calorífico inferior.

El poder calorífico se define como el cociente entre el cambio energético sufrido por el material durante una combustión completa y la masa usada en la prueba, teniendo en cuenta las siguientes suposiciones : La temperatura de la muestra y de los productos de combustión es 25°, el agua formada durante la combustión se encuentra en estado líquido , los productos de la combustión del carbono y el azufre se encuentran en estado gaseoso como dióxido de carbono y dióxido de azufre y no ocurre oxidación del nitrógeno.[22]

El poder calorífico inferior H_u se diferencia del anterior en que el agua se forma durante la combustión se encuentra como vapor. Si la cantidad de hidrogeno h y la del agua w de la muestra son conocidas, y se tiene en cuenta el valor del calor de vaporización de agua, $=2441$ J/g, se puede calcular el poder calorífico inferior a partir del poder calorífico superior con la siguiente ecuación:

$$H_u = H_o - \Delta h_{\text{vapH}_2\text{O}} * (w + 9h) \quad (11)$$

Para esta prueba se sigue la norma ISO 1928-1995, [18] con base en la cual se determina el poder calorífico superior utilizando una bomba calorimétrica con un baño de agua. Para su determinación se quema una muestra del material bajo condiciones fijas. Durante esta combustión el cambio energético aumenta la temperatura del calorímetro respecto a su temperatura inicial. Con esta diferencia de temperaturas se puede calcular el poder calorífico cuando la capacidad calorífica del sistema es conocida y se tiene en cuenta las correcciones necesarias por presión y/o temperatura.

2.4 VENTAJAS DE LA BIOMASA

- La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye al calentamiento global. De hecho, produce una reducción los niveles atmosféricos del bióxido de carbono, como actúa como recipiente y el carbón del suelo puede aumentar.
- Los combustibles de biomasa tienen un contenido insignificante de azufre y por lo tanto no contribuyen a las emisiones de dióxido de azufre que causan la lluvia ácida. La combustión de la biomasa produce generalmente menos ceniza que la combustión del carbón, y la ceniza producida se puede utilizar como complemento del suelo en granjas para reciclar compuestos tales como fósforo y potasio [7].
- La conversión de residuos agrícolas, de la silvicultura, y la basura sólida municipal para la producción energética es un uso eficaz de los residuos que a su vez reduce significativamente el problema de la disposición de basura, particularmente en áreas municipales.
- La biomasa es un recurso doméstico, que no está afectado por fluctuaciones de precio a nivel mundial o por las incertidumbres producidas por las fuentes de combustibles importados. En países en vías de desarrollo en particular, el uso de biocombustibles líquidos, tales como biodiesel y etanol, reduce las presiones económicas causadas por la importación de productos de petróleo. [7]
- Los cultivos para energía perennes (las hierbas y los árboles) tienen consecuencias para el medio ambiente más bajas que los cultivos agrícolas convencionales.

2.5 RESTRICCIONES EN EL USO DE LA BIOMASA

- En naturaleza, la biomasa tiene relativamente baja densidad de energía y su transporte aumenta los costes y reduce la producción energética neta. La biomasa tiene una densidad a granel baja (grandes volúmenes son necesarios en comparación con los combustibles fósiles), lo que hace el transporte y su administración difíciles y costosos. La clave para superar este inconveniente está en localizar el proceso de conversión de energía cerca de una fuente concentrada de biomasa, tal como una serrería, un molino de azúcar o un molino de pulpa.
- La combustión incompleta de la leña produce partículas de materia orgánica, el monóxido de carbono y otros gases orgánicos. Si se utiliza la combustión de alta temperatura, se producen los óxidos del nitrógeno.
- Existe la posibilidad que el uso extensivo de bosques naturales cause la tala de árboles y escasez localizada de leña, con ramificaciones ecológicas y sociales serias.
- Hay un conflicto potencial por el uso de los recursos de la tierra y del agua para la producción de energía de biomasa y otras aplicaciones, tales como producción de alimentos y de fibras.
- Algunos usos de la biomasa no son completamente competitivos en esta etapa. En la producción de electricidad por ejemplo, hay fuerte competencia de las nuevas plantas de gas natural, altamente eficientes. Sin embargo, la economía de la producción energética de biomasa está mejorando, y la preocupación cada vez mayor por las emisiones de gas de invernadero está haciendo a la energía de biomasa más atractiva.
- La producción y el proceso de la biomasa pueden implicar un consumo de energía significativa, tales como combustible para los vehículos y los fertilizantes agrícolas, dando por resultado un balance energético reducido para el uso de la biomasa. En el proceso de la biomasa se necesitan reducir al mínimo el consumo de combustibles fósiles, y maximizan la conversión de basura y recuperación de energía. [12]

2.6 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA

La biomasa constituye una fuente de energía renovable, y aunque posee poco contenido comparada con los combustibles fósiles, y además los procesos de secado, suministro y almacenamiento requeridos para su procesamiento implican un mayor grado de complejidad, (por su composición física que es poco homogénea y por el alto contenido de humedad), la energía que puede obtenerse a partir de ella, puede ser empleada con una baja producción de emisiones contaminantes. [7]

Se han desarrollado diversos procesos y tecnologías con el fin de transformar la biomasa en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Se puede decir que existen tres clases de procesos de conversión:

- Bioquímicos
- Termoquímicos
- Fisicoquímicos

2.6.1 MÉTODOS BIOLÓGICOS

La materia orgánica es el principal componente de los residuos sólidos. En este tipo de métodos, el medio empleado para su descomposición es la actividad de

Microorganismos cuyas enzimas actúan sobre las estructuras orgánicas (carbohidratos, proteínas y grasas). Los más mencionados son la digestión anaeróbica, fermentación alcohólica y el relleno sanitario [21].

2.6.1.1 Digestión anaeróbica o gasificación a bajas temperaturas.

Este proceso consiste en descomposición de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos sin presencia de aire. Los productos de la reducción por este método del material orgánico son:

- El biogás compuesto de metano (CH_4) , gas carbónico, vapor de agua y otros compuestos gaseosos en menor proporción; el cual, con un adecuado tratamiento se puede emplear como combustible en diversas actividades tanto industriales como domésticas.
- Compuestos líquidos o semisólidos (Conocidos en el ámbito como efluentes), que pueden ser empleados con excelentes resultados como biofertilizantes o como alimento de fauna acuática sin ningún tipo de riesgo biológico.

2.6.1.2 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA:

Proceso que consiste en la transformación del carbono acumulado en las plantas, como consecuencia de la energía solar, en alcohol por medio de fermentación en diferentes fases según el tipo de biomasa. La fase de coste energético más elevado es la de destilación que contribuye a que el balance energético de la técnica puede no cumplir los parámetros renovables. Los productos obtenidos son biocarburantes como el bioetanol o el biodiesel, utilizados como combustibles alternativos a los fósiles [4].

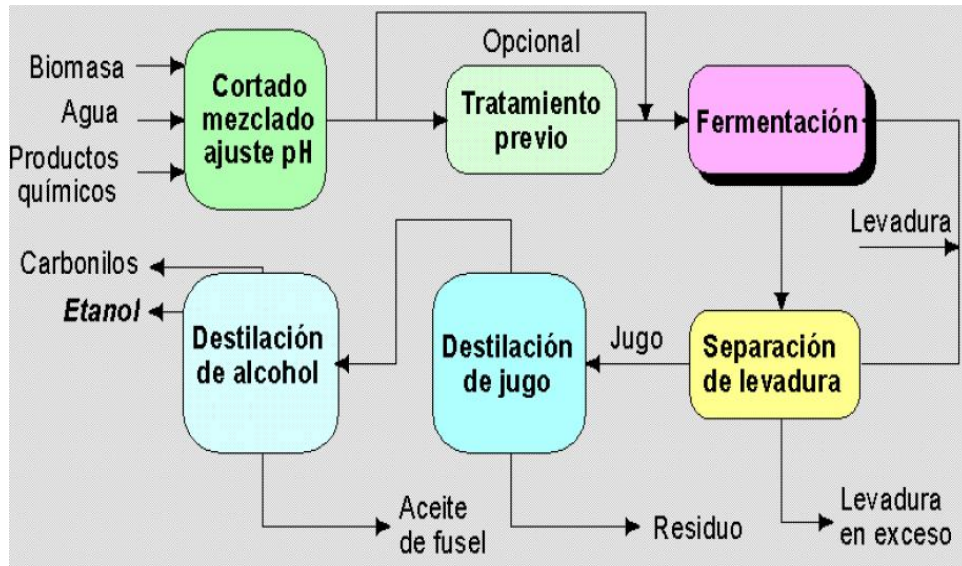


Fig 1.Fermentación alcohólica

2.6.1.3 RELLENO SANITARIO

Consiste en el depósito uniforme de residuos en una excavación, y su posterior descomposición. Su producto final es, principalmente, gases con alto contenido de metano, los cuales pueden aprovecharse dentro de las mismas plantas o actividades vecinas. Para su construcción se deben tener en cuenta aspectos como:

- Cubrimiento diario de los desechos extendidos.
- Evitar la combustión de desechos a cielo abierto.
- Evitar el deterioro de las corrientes de agua aledañas al sitio.
- Prevenir la recolección, disposición y aprovechamiento de gases combustibles.

El relleno sanitario es uno de los métodos mas empleados por su económica y fácil implementación, sin embargo es uno de los que posee el mayor numero de los más nocivos impactos al medio ambiente, tanto atmosférico como acuático y terrestre.

2.6.2 PROCESOS TERMOQUÍMICOS

El calor es la fuente de transformación principal y son los métodos utilizados en la transformación de la biomasa seca (principalmente paja y madera). Se basan en la aplicación de elevadas temperaturas.

Existen cuatro métodos termoquímicos utilizados en la industria para la conversión de biomasa en energía aprovechable: Pirolisis, gasificación, licuefacción y combustión directa. Los productos de estos procesos pueden presentarse en forma de gases, líquidos, sólidos y calor. Las proporciones en las cuales se obtienen estos productos varían de acuerdo a los parámetros de cada proceso [31].

2.6.2.1 COMBUSTIÓN:

Aplicación de elevadas temperaturas con exceso de oxígeno. La combustión directa u oxidación completa de la biomasa al mezclarse con el oxígeno del aire liberando en el proceso dióxido de carbono, agua, cenizas y calor. Este último es utilizado para el calentamiento doméstico o industrial o para producción de electricidad [31].

2.6.2.2 PIROLISIS

La pirolisis se puede definir como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante. Esta

descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. La pirolisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión [1].

Se puede considerar que la pirolisis comienza en torno a los 250° C, llegando a ser prácticamente completa en torno a los 500° C,.

A partir de la pirolisis pueden obtenerse diferentes productos secundarios útiles en función de la tecnología de tratamiento que se utilice.

Los productos primarios formados son los siguientes (en diferentes proporciones según el proceso empleado):

- Gases: Compuestos principalmente de CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros.
- Líquidos: Compuesto por una gran mezcla de distintos productos como pueden ser: cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos, y otras fracciones más pesadas.
- Sólidos: El producto sólido de la pirolisis es un residuo carbonoso (char) que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo.

Existen diferentes tipos de Pirolisis en función de las condiciones físicas en las que se realice. Así, factores como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión, etc., tienen una influencia muy grande en la distribución de productos que se obtienen. [1]

2.6.2.3 GASIFICACIÓN A ALTAS TEMPERATURAS

También es llamada pirolisis por oxidación parcial. Es un proceso de degradación de biomasa en presencia de un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono o una mezcla de estos) que busca maximizar la obtención de gases. Las temperaturas empleadas en este, que suelen ser mayores que las utilizadas durante el proceso de pirolisis, se sitúan alrededor de 800 y 1100 °C. La mezcla gaseosa formada está compuesta principalmente por CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, C_xH_y y varios contaminantes con pequeñas partículas de carbonizado, cenizas o alquitranes.[12]

El proceso general de gasificación puede ser dividido en dos grandes etapas: Es un proceso de degradación de la biomasa y conversión termoquímica del carbonizado o pirolizado bajo la acción de un agente oxidante. Esta división implica que las variables que afecten el proceso de pirolisis también influyan en el proceso general de gasificación. Por otro lado, dependiendo de los parámetros empleados durante la segunda etapa. Puede llevarse a cabo un proceso de gasificación total o un proceso de gasificación parcial o de activación.

2.6.2.4 LICUEFACCIÓN

Es un proceso de conversión termoquímica llevado a cabo bajo algunas temperaturas (generalmente entre 250 °C y 350 °C y altas presiones (entre 100 y 200 bares). Maximiza la producción de líquido, el cual comparado con los que se obtienen a partir del proceso de pirolisis, tiene una mayor energía calorífica y un menor contenido de oxígeno [22].

3. PROCESOS DE GASIFICACIÓN

3.1 GASIFICACIÓN A BAJAS TEMPERATURAS O DIGESTIÓN ANAERÓBICA (BIOGÁS)

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo a través del cual, en ausencia de oxígeno, la materia orgánica es transformada en biogás o gas biológico, formado principalmente por metano y anhídrido carbónico. Para que el proceso tenga lugar es necesaria la intervención de distintos grupos de microorganismos capaces de transformar la materia orgánica [6].

3.1.1 Etapas del proceso de digestión anaeróbica:

3.1.1.1 Solubilización: La materia orgánica cruda formada por polímeros (proteínas complejas, grasas, ácidos orgánicos, proteínas y carbohidratos) es hidrolizada por la acción de exoenzimas, descomponiéndose en compuestos simples y solubles, liberando también CO_2 y H_2 . [11]

3.1.1.2 Acidogénesis : Los compuestos simples solubles, de la primera etapa, siguen un proceso de fermentación que los convierte por oxidorreducción, en ácidos simples de cadena corta ,mediante la acción de bacterias anaeróbicas facultativas. También el oxígeno del medio es eliminado, esto es necesario para que se desarrolle la siguiente fase. [6]

Algunos de los ácidos generados son: ácido acético, propiónico y láctico.

3.1.1.3 Metanogénesis: Los ácidos orgánicos simples devienen en sustratos para la descomposición, estabilización y producción de metano, mediante la acción de bacterias: Metanogénicas, estrictamente anaeróbicas, las cuales producen CH_4 por dos vías: Fermentación de ácido acético y reducción de CO_2 , metanol y ácido fórmico por hidrógeno naciente.[11]

Reacciones típicas en la metanogénesis:

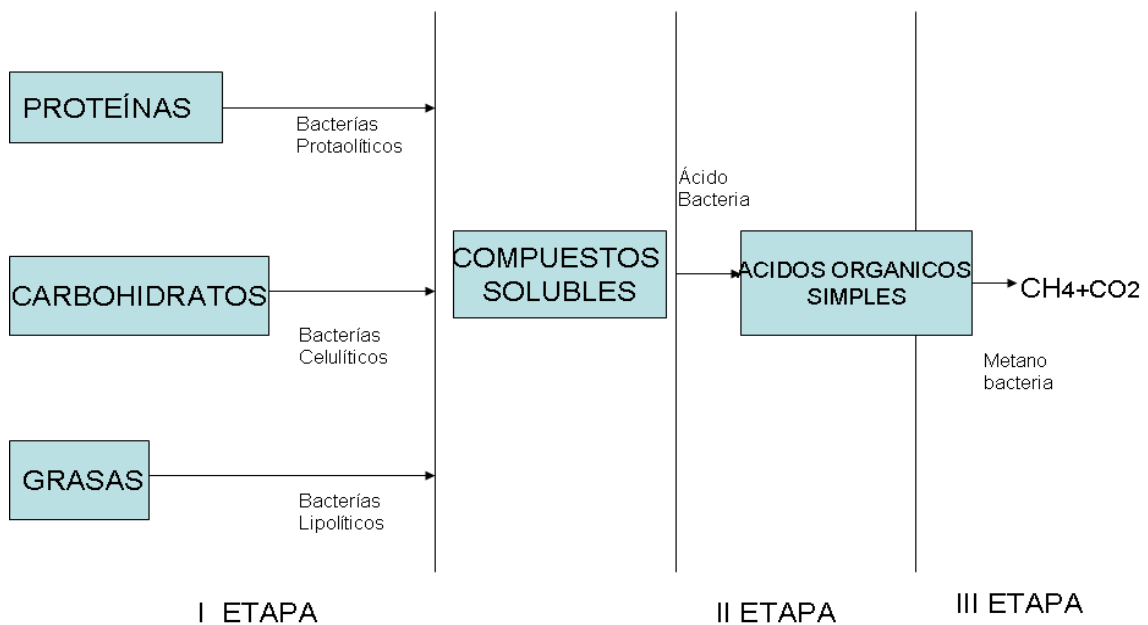
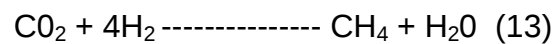
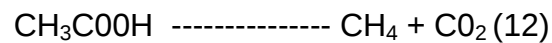


Fig 2. Parámetros incidentes en la digestión anaerobia

3.1.2 Características de la biodigestión

3.1.2.1 PH

El pH es importante en toda forma de vida, y la vida dentro de un generador de biogás no es la excepción. Las ácido bacterias pueden tolerar un pH bajo, pero las bacterias metanogénicas son completamente destruidas por un pH cercano a 5.5, ellas se mantiene entre un rango de 6.8 y 8.5.

Durante la fase inicial de la digestión, la cual toma más o menos dos semanas, el pH cae hasta 6 o aún menos, mientras se libera una gran cantidad de dióxido de carbono. Durante los tres meses siguientes se presenta un leve descenso en la acidez, tiempo en el cual los ácidos volátiles y el nitrógeno se están formando. El pH finalmente se estabiliza entre 7.5 y 8.5. Algo importante es estar seguros que el pH se mantendrá dentro de un rango confortable para las bacterias metanogénicas. [27]

3.1.2.2 TEMPERATURA

Hay tres rangos reconocidos de temperatura en los cuales operan diferentes grupos de bacterias anaeróbicas. Las cuales son:

a-Crioófilas: Pueden sobrevivir en rangos de temperatura de 0 a 5°C .

b-Termoófilas: El rango de temperatura es de 40 -60°C . El óptimo es entre 50-55 °C. Estas bacterias son más sensibles a los cambios de temperatura por lo que se necesita un dispositivo de calentamiento que pueda mantener la temperatura con cambios de 2 °C 0 3 °C.

C-Mesofílicas: La temperatura de este rango es 21 a 40°C son lo suficientemente bajas para mantenerse, y las bacterias no son tan sensitivas a los cambios de temperatura. El óptimo está entre 30 y 35°C .[8]

3.1.2.3 RAZÓN C/N

Las bacterias en la digestión aeróbica como anaeróbica emplean cerca de 30 átomos de carbono para respiración y alimentación por cada átomo de nitrógeno.

3.1.2.4 Porcentaje de agua

En un generador anaeróbico, aunque el agua tiene otros usos se utiliza principalmente como medio de transporte; sólo una pequeña porción de ésta toma parte biológica y químicamente en el proceso del biogás.

3.1.3 TIPOS DE DIGESTORES Y FUNCIONAMIENTO

La clasificación más conocida es según el tipo de carga, los cuales son:

- Digestores de carga por lotes (Batch)

- Digestores de carga continua

3.1.3.1 Digestores de carga por lotes

Estos son completamente llenado con una sola carga, las unidades son selladas en su parte superior para excluir el aire y así generar el gas metano. El proceso puede se acelerado por la introducción de un iniciador, es decir una mezcla con bacterias activas que previamente hayan trabajado en un digestor. La desventaja principal de estas

unidades es que cuando la descomposición cesa y así la generación de gas, el digestor debe ser vaciado y limpiado, requiriendo un considerable trabajo,[11].

3.1.3.2 Digestores de carga continua

Es el más utilizado por las ventajas que presenta. De acuerdo a su disposición se dividen en dos tipos: verticales y los de flujo de tipo tapón o de desalojo.

3.1.3.2.1 Verticales

Son generalmente de construcción circular y operan contra la presión estática del fluido que está dentro de ellos. Consiste en un pozo hermético donde se depositan los desechos a fermentar, y son cargados a través de una tubería que llega hasta el fondo de pozo. A consecuencia de la descomposición de la materia orgánica, ésta pierde densidad y empieza a ascender hacia la superficie de la mezcla y es desalojada del digestor a través de una tubería de descarga o rebosadero. El gas generado por la acción de las bacterias es recogido en la parte superior del digestor y de allí distribuido a los lugares de consumo.[6]

3.1.3.2.2. De desalojo

Se puede describir como un cilindro horizontal, donde la carga se realiza por un extremo, y por el otro desaloja la carga que ya ha trabajado.

Presenta ciertas ventajas sobre los demás tipos de digestores como son: Facilidad de control de su pH, el tiempo de retención y en general del proceso.

De acuerdo al diseño y forma de su estructura, se destacan:

3.1.3.2.3 De cúpula fija o tipo chino

Son aquellos armados en una sola estructura construida en materiales rígidos (concreto, bloques o ladrillos). Debido a la alta presión que pueden alcanzar en su interior y a la constante de variación de la misma, se recomienda su construcción en forma de domo, bajo tierra en suelos estables y firmes, y la impermeabilización de la parte interna de la estructura a fin de evitar el escape de líquido y gases. Estos factores hacen obligatorio la mano de obra altamente calificada para su diseño y construcción.

En la planta de cúpula el gas producido se recoge en la parte superior de la cámara de fermentación. El depósito de gas, es por lo tanto una cámara de obra.

3.1.3.2.4 De cúpula móvil o tipo hindú

Los biodigestores de este grupo fueron diseñados en la India y poseen dos estructuras: la primera, al igual que en los de estructura sólida fija, va enterrada y hecha en concreto, bloque o ladrillos; la segunda en la mayoría de los casos es una campana metálica que flota sobre la primera estructura. Los biodigestores de este grupo son los únicos que logran mantener una presión constante del gas que generan, pero requieren una inversión bastante alta en la construcción de la estructura

y de la campana, y en el mantenimiento de esta última para controlar su corrosión. Debido a su forma cilíndrica son más fáciles de construir que los de cúpula fija [11].

En este tipo de biodigestores el gas se concentra debajo de la campana flotante. La campana se eleva cuando se produce gas y desciende a medida que se va consumiendo.

3.1.3.2.5 De estructura flexible:

Los altos costos de inversión requeridos para la construcción de biodigestores de estructuras sólidas, impiden que personas con poco recursos económicos tengan oportunidad de instalar uno de los anteriores diseños, razón que motivo en Taiwán, en los años sesenta, la idea de hacer las cámaras de digestión en materiales flexibles de nylon y neopreno. En los años setenta se implementó un material de menor costo, subproducto de las refinerías de aluminio, y veinte años después se recurrió al PVC y al polietileno. Generalmente estos materiales tienen forma tubular o cilíndrica con la entrada y la salida del material situadas en los extremos opuestos y la salida del gas en el centro.[6]

3.1.3.5.1 Biodigestor de flujo continuo

Los biodigestores plásticos de flujo continuo están contruidos con una bolsa de polietileno tubular calibre 8 con protección contra rayos ultravioleta. El plástico se usa doble para darle mayor resistencia y duración. Esta bolsa es instalada en una fosa cuyas dimensiones dependen del diámetro de la fosa que se construye con una caja de ladrillo o cemento con un tubo al que se amarra el plástico.

El biodigestor debe quedar ubicado cerca de las instalaciones donde se generan las aguas residuales, a un nivel que permita que lleguen a él por gravedad. En la selección del sitio es importante, también, tener en consideración el uso que se va dar al efluente, de tal forma que pueda ser conducido para fertilización de cultivos o pasturas o para hacer tratamiento posterior de las aguas.

El sitio donde se ubique el biodigestor debe ser un terreno firme que no tenga peligro de derrumbamiento. En zonas de topografía quebrada la fosa debe ubicarse a través de la pendiente. El piso no debe tener desnivel de extremo a extremo., aunque un desnivel del 0.5 % es aceptable.

El ancho y la profundidad de la fosa dependen del diámetro de la bolsa plástica que se emplee. En cada extremo de la fosa se hace una excavación adicional para la instalación de las cajas de entrada y salida del material. La función de estas cajas es servir de sello de agua para generar las condiciones anaeróbica y evitar el escape del biogás. Generalmente se construyen de ladrillo y cemento, aunque también pueden emplearse bloques de cemento o cemento armado.

Referente a la bolsa, se cortan dos porciones de igual tamaño de acuerdo con las medidas determinadas previamente. Luego se procede a introducir una porción dentro de la otra. Una vez hecho esto se debe proceder a coincidir los dobleces longitudinales o bordes de las dos bolsas para que queden totalmente sin arruga como formando una sola bolsa doble.

El biodigestor debe ser protegido mediante una cerca que impida el ingreso de toda clase de animales y su caída accidental sobre la bolsa,

lo que causaría su rompimiento. Adicionalmente, es importante colocar un techo con el fin de prolongar la vida útil del plástico el impacto de los rayos solares [11].

3.2 GASIFICACIÓN A ALTAS TEMPERATURAS (Gas de síntesis)

La gasificación es un proceso de transformación termoquímica en el que un material orgánico, como la biomasa o el carbón, se convierte, a elevadas temperaturas, en una corriente gaseosa con gran contenido energético. Esta corriente gaseosa contiene monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno, metano, trazas de etano y eteno, agua, nitrógeno y algunos contaminantes, como pequeñas partículas de carbonizado, ceniza y alquitranes.[22]

Con el fin de llevar a cabo el proceso de gasificación es necesario obtener el carbonizado a partir de un proceso de pirolisis previo, el cual implica una etapa de secado. En general, para desarrollar el proceso de gasificación, se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

Secado: Durante este proceso, la biomasa se calienta hasta una temperatura superior a la temperatura de evaporación del agua con el fin de extraer toda la humedad.

Pirolisis: Dentro del proceso general de gasificación, el proceso de pirolisis es llamado desgasificación de la biomasa, y aunque provee gases y líquidos que pueden ser aprovechables, su principal objetivo es el de proveer el pirolizado o carbonizado que será transformado en una corriente de gases durante la oxidación del proceso de gasificación.

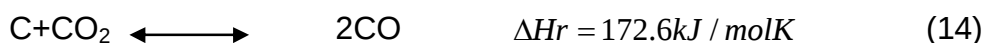
Oxidación del pirolizado, alquitranes y gases producidos durante el proceso de pirolisis: Durante este proceso se llevan a cabo un conjunto de reacciones encaminadas a obtener el gas combustible. Además, dependiendo del objetivo del proceso general, es posible obtener un residuo sólido llamado carbón activado.

Los productos sólidos, líquidos y gaseosos de la pirolisis reaccionan con un medio oxidante o medio de gasificación que es, generalmente, dióxido de carbono, vapor de agua, aire o una mezcla de estos. La gasificación del carbonizado es una combinación de varias reacciones sólido-gas y gas-gas en las cuales el carbonizado es oxidado a monóxido y dióxido de carbono y el hidrogeno se genera a través de la reacción de intercambio agua-gas. Las reacciones sólido:gas de la oxidación del carbonizado son las más lentas y limitan la velocidad del proceso de gasificación [1].

3.2.1 REACCIONES DE GASIFICACION

Las principales reacciones que ocurren durante el proceso de gasificación son las siguientes:

Las reacciones heterogéneas gas-agua



La reacción homogénea gas-gas



La reacción de formación de metano:



La reacción de oxidación



Las reacciones son endotérmicas y se consideran las más importantes en el proceso de gasificación. La reacción de oxidación suministra la energía necesaria para las reacciones. La reacción de intercambio ocurre, principalmente, cuando se tienen altas concentraciones de vapor de agua, mientras que la reacción es importante a altas presiones. La reacción es importante en la gasificación por dos razones: La energía contenida en el gas producido se incrementa y el oxígeno requerido es menor debido al calor disipado en la generación de metano.[31]

A medida que la gasificación avanza, el carbonizado pierde masa. Con base en esta pérdida de masas hay dos formas para determinar la velocidad de gasificación. La primera se expresa como :

$$r = \frac{1}{W} \left(\frac{dW}{dt} \right) = \frac{1}{(1-x)} \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (19)$$

donde r es la velocidad de gasificación normalizada, t es el tiempo, W es la masa de carbonizado que queda en un tiempo t , x es la conversión del carbonizado, esto es,

$$x = \frac{(W_o - W)}{W_o} \quad (20)$$

y W_0 es la masa inicial de carbonizado. La segunda forma es:

$$r' = (-1/W_0) \cdot (dW/dt) = (dx/dt) \quad (21)$$

En este caso r' se define como la velocidad de gasificación.

La velocidad de gasificación se verá afectada no solamente por la cinética química sino también por resistencias en el interior de la partícula y por transferencia de masa.

La gasificación de carbonizados de biomasa no es un proceso simple de primer orden; esto ocurre solo en un periodo de inducción de la reacción. Después de este periodo de inducción la velocidad de la reacción se encuentra en un intervalo cuyo comportamiento tiene un orden entre cero y uno. La conversión transcurre inicialmente a una velocidad constante, que es también la velocidad máxima. En cierto punto de conversión dependiendo, de las condiciones reales, la velocidad comienza a decrecer y alcanza un mínimo al final del proceso de conversión [1].

3.2.2 VARIABLES DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN

La composición del gas producido está determinada principalmente por la composición química del carbonizado, el tipo y cantidad relativa del medio de gasificación, el tipo de reactor y condiciones de operación.

Las principales variables involucradas en el proceso de gasificación son la temperatura a la cual se lleve a cabo el proceso, el tiempo de permanencia del material del agente oxidante, la concentración y el tipo de agente oxidante y el tipo de sustrato que se emplee.

3.2.2.1 TEMPERATURA

Se pueden presentar principalmente tres casos:

Bajas temperaturas: La velocidad con la cual se llevan a cabo las reacciones químicas entre el sólido y el gas es baja comparadas con aquella a la cual se mueven los reactantes y los productos hacia y desde el sustrato, por lo cual el factor limitante del proceso de gasificación es la velocidad de las reacciones químicas.

Temperatura medias: A temperaturas medias, aumenta la velocidad en la cual se llevan a cabo las reacciones. Sin embargo, la producción de gases debido a reacciones químicas ocurre más rápidamente que la difusión de reactantes desde la superficie hacia el interior de las partículas sólidas del sustrato a través de los poros, por lo cual, la difusión a través de los poros se constituye como el factor limitante del proceso de gasificación [32].

Temperaturas altas:

Cuando el procesos de gasificación se lleva a cabo a altas temperaturas, las reacciones químicas que suceden sobre la superficie del sustrato se realizan de forma tan rápida que los productos impiden la difusión de nuevos gases reactantes hacia la superficie de las partículas sólidas; a su vez, el gas reactante que se encuentra alrededor de la partícula impide la difusión, a través de si mismo, de los gases producidos durante las reacciones. Así, en este caso, el factor limitante del proceso de gasificación es la difusión del gas reactante hacia la superficie del sustrato sólido con el fin de continuar las reacciones y generar nuevos productos.

3.2.2.2 TIEMPO DE PERMANENCIA

Para una misma temperatura de realización del proceso de gasificación, la pérdida de masa se presenta durante la transformación termoquímica, y por lo tanto, las proporciones, en las cuales son generados los productos, se ve afectada por el tiempo de permanencia, es decir, el tiempo durante el cual se permite a la biomasa reaccionar con el agente oxidante.[28]

En general al aumentar tanto dicho tiempo como la temperatura a la cual se lleva el proceso de gasificación, disminuye la cantidad de material sólido remanente y aumenta la proporción de gases generados.

3.2.2.3 AGENTE OXIDANTE:

Para el proceso de gasificación se puede utilizar aire, oxígeno dióxido de carbono, vapor de agua o una mezcla de estos.

La gasificación con aire produce un gas de calidad pobre en cuanto a su poder calorífico ($4\text{-}7 \text{ MJm}^{-3}$) debido a su baja densidad energética. En cambio la gasificación con oxígeno produce un gas de mejor calidad ($10\text{-}18 \text{ MJm}^{-3}$), pero implica altos costos para la producción del oxígeno y se presentan mayores riesgos durante el proceso de gasificación.

Cuando se utiliza vapor de agua o dióxido de carbono como medio de gasificación el gas que se obtiene es de una calidad similar al obtenido con oxígeno; además, se evitan los altos costos de producción y los riesgos de operación. La gasificación con vapor de agua es de 3 a 5 veces más rápida que la gasificación con dióxido de carbono.

3.2.2.4 MATERIAL DE INICIO

La materia prima para la gasificación es el carbonizado que se obtiene en el proceso de pirolisis.

En particular, la estructura porosa y la distribución de tamaño de poro determinan el área superficial disponible para la reacción y la facilidad con la cual los reactantes gaseosos y los productos pueden moverse hacia y desde la superficie. Una gran área superficial del carbonizado indica una buena disponibilidad de carbono para la reacción. Un área superficial grande se obtiene cuando la pirolisis se lleva a cabo completamente y a altas temperaturas.

La reactividad del carbonizado está influido por : La estructura química que determinan el número de sitios activo, clarea superficial interna y la porosidad que controlan las velocidad de difusión, y los compuestos inorgánicos que pueden tener un efecto catalizador o inhibidor.

Un alto contenido de cenizas, las cuales pueden estar formadas por potasio, magnesio, sodio, hierro y calcio, representa diferencias en la reactividad del carbonizado. Todos estos elementos se conocen como buenos catalizadores para la gasificación de biomasa con vapor o con dióxido de carbono.

3.2.3 TIPOS DE GASIFICADORES

Otro factor que determina la composición del gas producido es el tipo de reactor que se utilice para la gasificación.

La mayoría de gasificadores pueden dividirse en varias zonas, una de secado, una de pirolisis, una de gasificación y una de enfriamiento de

las cenizas. La importancia relativa de cada zona depende del contenido de humedad y de la velocidad de secado, de la velocidad de transferencia de calor, la velocidad de gasificación y la velocidad de enfriamiento [11].

Para producir un gas adecuado a partir de biomasa, se han desarrollado varios tipos de reactores. A continuación se hará una descripción de los reactores más importantes, su característica y limitaciones.

3.2.3.1 Gasificadores de lecho fijo:

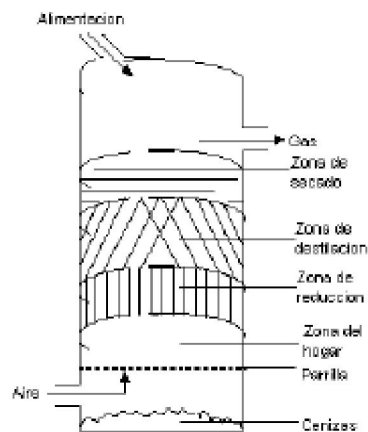


Figura 3- Gasificador de lecho fijo

La toma de aire se encuentra en el fondo y los gases salen por arriba. Cerca de la parrilla, en el fondo, tienen lugar las reacciones de combustión, que van seguidas de reacciones de reducción algo más arriba, en el gasificador. En la parte alta del gasificador tiene lugar el calentamiento y pirólisis de la carga, como resultado de la transferencia de calor, por convección forzada y radiación, de las zonas inferiores. Los alquitranes y productos volátiles producidos durante este proceso son transportados por la corriente de gas. Se remueven las cenizas del fondo del gasificador. [11]

Las principales ventajas de este tipo de gasificador consisten en su simplicidad, alta proporción de carbón vegetal quemado e intercambio interno de calor que motiva unas bajas temperaturas de salida del gas y alta eficiencia del equipo y también la posibilidad de funcionar con muchos tipos de carga (aserrín, cáscaras de cereales, etc.).

Los principales inconvenientes provienen de la posibilidad de que se produzcan "chimeneas" en el equipo, situaciones explosivas peligrosas y la necesidad de instalar parrillas de movimiento automático y también problemas relacionados con la eliminación de líquidos condensados que contienen alquitranes, resultantes de las operaciones de depuración del gas. Esto último tiene poca importancia si el gas se emplea para aplicaciones directas del calor, en cuyo caso los alquitranes simplemente se queman.

3.2.3.1.1 Gasificadores en paralelo:

Se caracterizan por tener una garganta. La biomasa es alimentada desde la parte superior y el medio de gasificación se introduce en el gasificador por encima de esta garganta. Los productos de reacción son íntimamente mezclados en la región de turbulencia de alta temperatura alrededor de la garganta, lo cual favorece la descomposición de alquitranes.

Esta configuración permite una alta conversión de los componentes intermedios de la pirolisis y un gas relativamente limpio [1].

La gasificación en paralelo es simple, pero estos gasificadores se pueden utilizar para fragmentos de material que tengan un diámetro

entre 1 y 30cm. Debido al bajo contenido de alquitranes en el gas, estos gasificadores pueden ser usado en maquinas de combustión interna [1].

3.2.3.1.2 Gasificadores en contracorriente:

En estos gasificadores el flujo de gases y sólidos ocurre en dirección opuesta. Primero la biomasa se seca con el flujo ascendente de gases producidos. Después de secarse, el combustible sólido se piroliza, produce carbonizado, el cual continua descendiendo y se gasifica, y los vapores de la pirolisis son arrastrados por la corriente caliente de gases producidos. Los alquitranes en los vapores pueden condensarse, por el combustible frío que desciende, o salen del gasificador con la corriente gaseosa, contribuyendo a su alto contenido de alquitranes.

Los gases que se producen contienen una cantidad importante de alquitranes e hidrocarburos, que contribuyen a su alto poder calorífico. La corriente gaseosa requiere limpieza si va a ser usada en procesos posteriores. Las principales ventajas son su construcción simple y una alta eficiencia térmica [11].

3.2.3.1.3 Gasificadores de flujo cruzado

La variación que se hace consiste en que los sólidos descienden y el flujo del gas es perpendicular al flujo de sólidos. La principal ventaja es su construcción simple pero, al igual que en el caso anterior, habrá una gran cantidad de alquitranes en los gases producidos [28].

3.2.3.2 Gasificadores de lecho fluidizado

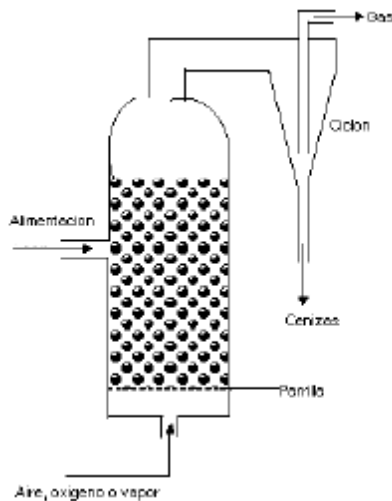


Fig 4 . Gasificador de lecho fluidizado.

Un gas fluye de un material sólido fino con elevada velocidad y expande el lecho sólidos de granos. Un incremento posterior en la velocidad del gas hace que el lecho de granos se comporte como un líquido en ebullición. Las pocas partículas que escapan con la corriente gaseosa se pueden separar en un ciclón y eliminarse del sistema o recircularse al lecho fluidizado. (ver figura 4).

Los gasificadores de lecho fluidizado tienden a producir una corriente gaseosa con

un contenido de alquitranes entre el de gasificador paralelo y el de contracorriente.

La pérdida de fluidez del lecho, debido a la sinterización del lecho es una de los problemas comunes y depende de las propiedades térmicas de las cenizas.

Los lechos fluidizados presentan características no disponibles en los

gasificadores de lecho fijo, como altas velocidades de transferencia de masa y calor y una buena mezcla de la fase sólida, lo que significa que las velocidades de reacción son mas altas y la temperatura es mas o menos constante en el lecho.[22]

3.2.3.2.1 Gasificadores de lecho fluidizado con circulación

Los sistemas fueron desarrollados para recuperar los sólidos perdidos con la corriente gaseosa. Estos sólidos se reciclan al lecho fluidizado y se mejora la conversión del carbón comparada con el del lecho fluidizado simple. Se produce una corriente gaseosa caliente que se usa en evaporadores para recuperar su calor sensible.

3.2.3.2.2 Gasificadores gemelos de lecho fluidizado

Se usan para producir una corriente gaseosa de alto poder calorífico. Estos gasificadores son realmente pirolizadores que se calientan con arena del segundo lecho fluidizado, la cual se calienta, a su vez, por la combustión del producto carbonizado antes de recircularse al primer reactor. Se adiciona usualmente vapor para favorecer la reacción de intercambio para genera hidrogeno y la reacciones carbón-vapor. La calidad de la corriente gaseosa es buena desde el punto de vista de poder calorífico, pero pobre en términos del arrastre de alquitranes del proceso de pirolisis .[28]

3.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE GASIFICACIÓN

Hay varias formas para clasificar los diferentes procesos:

3.2.4.1 Por la forma para suplir el calor, ya que la mayor parte de los reacciones son endotérmicas:

3.2.4.1.1 Calentamiento interno:

- Autotérmico
- Cíclico
- Energía, en forma de calor, transportado por fluídos y sólidos.

3.2.4.1.2 Calentamiento externo:

- Energía transferida a través de las paredes del recibiendo de
- Reacción.

3.2.4.2 Por contacto con los reactantes

- Lecho fijo
- Lecho fluidizado
- Suspensión de las partículas en el medio gasificante.

3.2.4.3 Por flujo de los reactantes:

Paralelo

Contracorriente

3.2.4.4 Por el medio gasificante

Vapor con oxígeno o aire, u oxígeno enriquecido con aire

Con Hidrogeno

3.2.4.5 Por las condiciones del residuo removido

Por secado de las cenizas en el proceso de descoriación

Por formación de escoria.

3.2.5 EFICIENCIA ENERGETICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN

La meta del proceso de gasificación es transformar en un gas de alto ó medio poder energético tanta materia prima como sea posible, por lo cual, la eficiencia puede definirse como la relación entre el contenido de energía del gas producido y la energía de la materia, tal como se puede observar en la expresión:

$$\eta_{\text{Proceso de gasificación}} = \frac{H_G * \dot{V}}{H_S * \dot{m}} \quad (22)$$

H_G : Poder calorífico inferior del gas producido en KJ/m³

H_S : Poder calorífico inferior de la materia prima en KJ/Kg

$\dot{V}$: Flujo volumétrico de gas producido en m³/s

$\dot{m}$: Flujo másico de materia prima suministrada en Kg/s

Subproductos como cenizas y líquidos de poco interés energético que pueden contener carbono que no fue transformado durante el proceso, se asume como pérdidas energéticas. El rango de este tipo de pérdidas

es de 2% a 30%. Además de éstas, se presentan pérdidas de calor en el reactor (de 4 a 10%) y un conjunto de pérdidas experimentadas en el momento de emplear el gas como combustible. Estas últimas, están representadas por la energía necesaria para evaporar el agua presente en el gas producido a raíz de las reacciones del proceso de gasificación. Debido a estos conjuntos de pérdidas, la eficiencia del proceso de gasificación se encuentra generalmente entre 50% y 90%.

3.2.6 PRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN

Aunque el proceso de gasificación tiene como objetivo principal la producción de gas, si se lleva a cabo un proceso de gasificación parcial, puede obtenerse un subproducto llamado carbón activo.

3.2.6.1 Gas producido

El gas producido contiene monóxido y dióxido de carbono., hidrógeno, metano, pequeñas cantidades de etano y eteno, agua, nitrógeno (se obtiene cuando se emplea aire como oxidante) y varios contaminantes. Las proporciones en las cuales se presenta cada uno de estos componentes varía de acuerdo al agente oxidante, la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso de gasificación, el tiempo de permanencia y el material empleado y el tipo de reactor durante el proceso. Esto hace que el poder calorífico del gas generado también varíe, pudiéndose obtener valores entre 12MJ/m^3 y 14 MJ/m^3 .

Las impurezas que pueden presentarse en el gas, son potenciales causantes de erosión o corrosión en los equipos empleados, hacen necesario que para la mayoría de aplicaciones que se lleven a cabo

Procesos de limpieza y remoción de partículas y de compuestos condensables.

3.2.6.2 Carbón activo

Los carbones activados son formas desordenadas de carbón con altos niveles de porosidad y área superficial.

La obtención de carbones activados puede ser llevada a cabo a partir del proceso de gasificación parcial y empleando como materia prima tanto carbón y madera como una gran variedad de subproductos de la agroindustria. La calidad de un carbón activado, en términos de sus propiedades adsorptivas, puede ser definida mediante los parámetros de porosidad y área superficial, como también de la composición química de la superficie.[1]

3.2.7 RIESGOS SANITARIOS Y AMBIENTALES DERIVADOS DEL EMPLEO DEL GAS POBRE

Los sistemas de gasificación tienen que diseñarse para cumplir con todos los requerimientos ambientales y de seguridad. Si se opera correctamente y no ocurren accidentes, el impacto ambiental será aceptable. La seguridad es una consideración importante y hay una serie de precauciones que, definidas internacional, nacional y localmente, deben ser tenidas en cuenta.

3.2.7.1 Riesgos tóxicos

Un componente importante del gas pobre es el monóxido de carbono, gas extremadamente tóxico y peligroso debido a su tendencia a

combinarse con la hemoglobina de la sangre, lo que evita la absorción y distribución del oxígeno.

Afortunadamente las instalaciones normales de gas pobre trabajan por succión, de modo que aunque se produzca una pequeña fuga en la instalación, no se escapan del equipo gases peligrosos durante su funcionamiento. Sin embargo, la situación es distinta durante la puesta en marcha y en el cierre de la instalación.

Durante la puesta en marcha generalmente se da salida al gas, siendo necesario garantizar que los gases producidos no se retienen en una habitación cerrada. Como norma, una chimenea apropiada proporciona suficiente seguridad.

Durante el cierre de la instalación se produce un aumento de presión en el gasificador, ocasionado por el combustible todavía caliente y en fase de pirólisis. Como resultado de ello, se liberan de la instalación gases que contienen monóxido de carbono, durante un período relativamente corto. Debido al peligro de estos gases, generalmente se recomienda que la instalación del gasificador se sitúe al aire libre, si es necesario protegida con un techo.

La siguiente tabla muestra los efectos tóxicos de diferentes concentraciones de monóxido de carbono en el aire:

Porcentaje de CO en el aire	ppm	Efectos
0,005	50	sin efectos importantes
0,02	200	posiblemente dolor de cabeza, en la frente y ligero durante 2 ó 3 horas
0,04	400	dolor en la frente y náuseas, después de 1 a 2 horas; en la parte posterior de la cabeza, después de 2,5 a 3,5 horas
0,08	800	dolor de cabeza, mareos y náuseas en 45 minutos; colapso y posiblemente inconsciencia, en 2 horas
0,16	1 600	dolor de cabeza, mareos y náuseas en 20 minutos; colapso e inconsciencia y posible fallecimiento, en 2 horas
0,32	3 200	dolor de cabeza y mareos en 5 a 10 minutos; inconsciencia y peligro de muerte, en 30 minutos
0,64	6 400	dolor de cabeza y mareos, en 1 a 2 minutos, inconsciencia y peligro de muerte, en 10 a 15 minutos
1,28	12 800	efecto inmediato; inconsciencia y peligro de muerte en 1 a 3 minutos

Tabla 1. Efectos tóxicos de diferentes concentraciones de monóxido de carbono en el aire:

3.2.7.2 Riesgos de incendio

Los riesgos de incendio pueden provenir de las siguientes causas:

- Elevada temperatura exterior del equipo.
- Riesgos de chispas al recargar el combustible.

- Llama en la entrada de aire del gasificador o en la tapa de recarga.

Los riesgos se pueden reducir considerablemente adoptando las siguientes precauciones:

Aislamiento de las partes más calientes del sistema.

Instalación de un dispositivo de llenado de doble compuerta.

Instalación de una válvula de retorno de la llama en la entrada del gasificador.

3.2.7.3 Riesgos de explosión

Se pueden producir explosiones si el gas está mezclado con suficiente aire para formar una mezcla explosiva. Esto puede producirse por varias razones:

- Filtración de aire en el sistema de gas.
- Penetración de aire al repostar combustible.
- Filtración de aire en un gasificador frío que contiene todavía gas que, en consecuencia, se quema.
- Retroceso de la llama desde el quemador de gases de escape, cuando el sistema se carga con una mezcla combustible de aire y gas durante el arranque.

La filtración de aire en el sistema de gas no da lugar generalmente a explosiones. Si se produce una filtración de aire en la parte inferior del gasificador (suele ser el caso) se produce una combustión parcial del gas, lo que eleva las temperaturas de salida del gas, disminuyendo su calidad.

Cuando los gases pirolíticos de la sección del depósito se mezclan con aire (lo que suele suceder durante el repuesto de combustible) se puede formar una mezcla explosiva. No es infrecuente que esto produzca pequeñas explosiones, relativamente inofensivas, especialmente cuando el nivel de combustible del depósito es relativamente bajo.

Se pueden evitar los riesgos para el operario si se queman los gases en la sección del depósito introduciendo un trozo de papel encendido o algo similar, inmediatamente después de abrir la compuerta del combustible. Otra posibilidad es instalar un sistema de relleno de doble compuerta.

La filtración de aire en un gasificador frío y el encendido inmediato producirá una explosión. Los sistemas cuando están fríos deben ventilarse siempre cuidadosamente, antes de encender el combustible.

Durante el arranque de una instalación, los gases como norma no se pasan por toda la sección de filtrado, a fin de evitar la obturación de los filtros por los alquitranes producidos durante el arranque. El filtro puede contener todavía aire y al producirse un gas inflamable y conducirlo a través de la sección de filtrado -a veces muy voluminosa- se puede producir una mezcla explosiva. Si en este momento se prende el gas en la salida del ventilador puede producirse un retroceso de la llama, dando lugar a una violenta explosión en la sección de filtrado. Por esta razón, es aconsejable equipar la salida del ventilador con un cierre hidráulico.

3.2.7.4. Riesgos ambientales

Durante la gasificación de la madera o de los residuos agrícolas, se producen cenizas (en el gasificador y en la sección de depuración) y líquido condensado (principalmente agua). Este último puede estar contaminado por resinas fenólicas y alquitrán.

Las cenizas no constituyen un riesgo ambiental y pueden eliminarse de forma normal. Para el líquido condensado que contiene alquitrán la situación es diferente y su eliminación en gran número de gasificadores puede tener efectos ambientales perturbadores. No se dispone de datos definitivos sobre biodegradación de los componentes fenólicos y los alquitranes de los líquidos condensados, siendo necesario estudiar cuidadosamente su eliminación [31].

Las propiedades de las emisiones de escape de los motores que funcionan con gas pobre se consideran generalmente aceptables, comparables a las de los motores diesel.

3.2.8 APLICACIONES

Se pueden identificar las siguientes aplicaciones de acuerdo a la calidad requerida del gas producido:

3.2.8.1 Combustión in-situ del gas producido

Es más o menos comparable con una combustión en dos etapas o incineración. En la primera etapa el material sólido se gasifica inyectando una cantidad sub estequiométrica de aire. El gas caliente producido, que contiene ceniza y alquitrán y tiene un bajo poder calorífico ($4-7 \text{ MJ/Nm}^3$), se mezcla con aire y se queman después en un

horno. Es importante que el gasificador y el horno se encuentren muy cerca para minimizar la distancia de transporte del gas caliente y sucio [13].

3.2.8.2 Combustión externa del gas producto

La mayor ventaja de esta aplicación es la de que hornos existentes abastecidos con aceite combustible o gas natural puede conectarse al gas producido.

3.2.8.3 Combustión interna en una máquina

La opción más interesante de la gasificación es la posibilidad de convertir la energía química de combustibles sólidos en electricidad sin el uso de un ciclo de vapor.

En este caso las maquinas son mas sensibles al polvo y al alquitrán que los quemadores, por lo que se hace necesaria una limpieza exhaustiva del gas. Además del polvo y el alquitrán, ácidos como el ácido acético deben ser removidos. La presencia de ácidos puede ocasionar corrosión severa de algunas partes de la máquina y afectar propiedades lubricantes del aceite de la máquina.

3.2.8.4 Combustión en una turbina de gas

Como las máquinas de combustión interna, las turbinas de gas pueden convertir la energía química de un gas en potencia que puede, a su vez, usarse para manejar una máquina o para generar electricidad con el uso de un alternador. En comparación con las maquinas de combustión interna, las turbinas de gas ofrecen como ventajas largos periodos de funcionamiento entre revisiones y bajos costos de mantenimiento [32].

3.2.8.5 Uso como materia prima

En la industria química, las mezclas de CO y H₂ se refieren como gas de síntesis, ya que muchos químicos pueden ser preparados directa o indirectamente a partir d estos gases. Los productos primarios que se pueden derivar de gases con alto poder calorífico son:

- Amoniaco.
- Metanol.
- Gas natural sustituto.
- Parafinas lineales y olefinas.
- Hidrógeno, usado como gas para vehículo de transporte, no contaminante.

4. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE GAS

El sistema eléctrico colombiano se divide en tres sectores importantes, los cuales son: Generación, transmisión y distribución y comercialización. Referente a las centrales de generación un porcentaje alto es de tipo hidroeléctrico, seguido de plantas térmicas a carbón y gas, y una pequeña parte usa como fuente primaria el viento.

La fuente primaria de energía, las máquinas mecánicas capaces de convertir la energía primaria en trabajo mecánico, que a su vez transmiten a una máquina eléctrica para finalmente obtener energía eléctrica son los elementos esenciales de un sistema de generación.

En el caso específico de una central térmica a gas, las materias primas pueden ser gas natural, gas pobre o gas de síntesis y biogás, siendo empleado los dos últimos en la agroindustria y las zonas no interconectadas.

4.1 FUENTE DE ENERGIA PRIMARIA

4.1.1 GAS NATURAL: El gas natural es energía fósil, algunas veces asociadas con los depósitos de petróleo crudo. Se utilizan grandes volúmenes como combustibles y en la síntesis de compuestos orgánicos. Es una Mezcla inflamable de hidrocarburos gaseosos ,aunque su composición varía en función del yacimiento del que se extrae, está compuesto principalmente por metano en cantidades que comúnmente pueden superar el 90 o 95%, y suele contener otros gases

como nitrógeno, etano, CO_2 , H_2S , butano, propano y trazas de hidrocarburos más pesados.[31]

4.1.2.GAS POBRE o GAS DE SINTESIS: El gas pobre, que se produce al gasificar la madera, el carbón vegetal o el carbón mineral, con el aire, consiste en un 40% aproximadamente de gases combustibles, principalmente monóxido de carbono, hidrógeno y algo de metano. El resto no es combustible y consiste sobre todo en dióxido de carbono y vapor de agua. [31]

4.1.3 BIOGÁS : Es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de aire (esto es, en un ambiente anaeróbico). Cuando la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno, actúa este tipo de bacterias, generando biogás.[11]

Es una mezcla constituida por metano CH_4 en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono, conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Sus características han sido resumidas en el

4.2 MAQUINAS MECÁNICAS

4.2.1 TURBINAS A GAS

4.2.1 .1 CICLO BRAYTON

Ciclo Utilizado:

El ciclo de la turbina a gas es el ciclo Joule o Brayton. Este se ilustra en la figura 5. en un diagrama p-V y uno T-S.. Consta de las siguientes evoluciones:

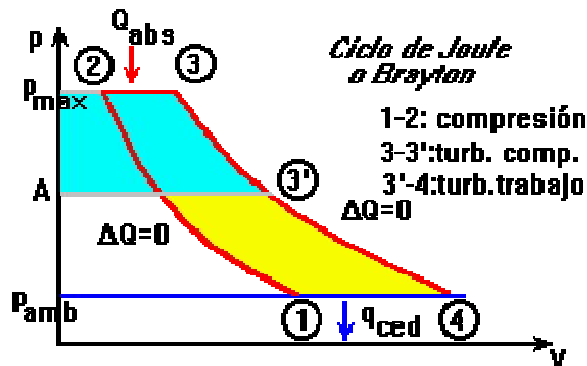


Fig 5 Ciclo de Joule o Brayton

En 1 se toma aire ambiente. Este se comprime hasta 2 según una adiabática (idealmente sin roce, normalmente una politrópica con roce).

Luego el aire comprimido se introduce a una cámara de combustión. Allí se le agrega una cierta cantidad de combustible y este se quema. Al producirse la combustión se realiza la evolución 2-3. Típicamente esta es isobárica (o casi isobárica, pues se pierde un poco de presión por roce). Como a la cámara de combustión entra tanto fluido como el que sale, la presión casi no varía. La temperatura T_3 es una temperatura crítica, pues corresponde a la mayor temperatura en el ciclo. Además también es la mayor presión. Por lo tanto los elementos sometidos a T_3 serán los más solicitados.[9]

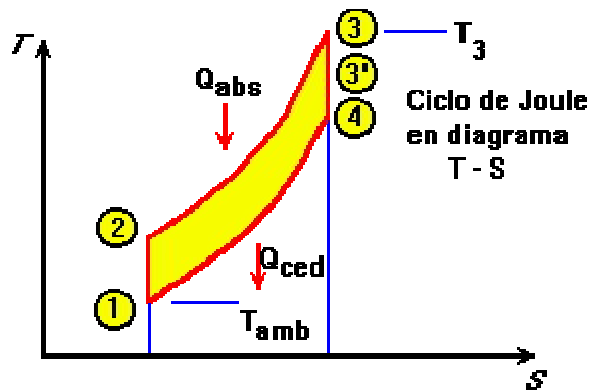


Fig 6.Ciclo de Joule T vs S

A continuación viene la expansión de los gases hasta la presión ambiente(fig 6). Esta expansión la debemos dividir en dos fases. En la primera (de 3 a 3') el trabajo de expansión se recupera en una turbina que sirve para accionar el compresor. En la segunda fase (de 3' a 4) existen dos opciones:

Si entre 3' y 4 se instala una turbina, el trabajo de expansión se convierte en trabajo mecánico. Se trata de un turbopropulsor o lo que comúnmente se llama turbina a gas.

Si entre 3' y 4 se sigue con la expansión de los gases en una tobera, el trabajo de expansión se convierte en energía cinética en los gases. Esta energía cinética sirve para impulsar el motor. Se trata de un turboreactor o lo que comúnmente se llama un motor a reacción.

Finalmente los gases de combustión se evacúan a la atmósfera en 4. La evolución 4-1 es virtual y corresponde al enfriamiento de los gases hasta la temperatura ambiente.

Si bien este ciclo se realiza normalmente como ciclo abierto, también es posible realizarlo como ciclo cerrado. Es decir tener un fluido de trabajo

que siga las evoluciones del ciclo. Entre 2 y 3 se le aporta calor externo y entre 4 y 1 se le extrae. También es posible realizarlo sin combustión interna, haciendo un aporte de calor entre 2 y 3. Esto se ha hecho en algunos motores solares en que se opera según un ciclo Brayton. [32]

Diagrama de Bloques:

A continuación veremos como se visualiza el ciclo de Joule en un diagrama de bloques. Las componentes principales de la máquina son:

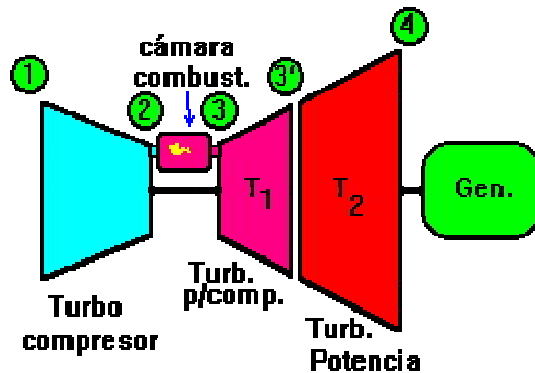


FIG7. Diagrama de bloques

4.2.1.2. Definición

Una turbina de gas es un motor térmico rotativo de flujo continuo con una baja relación peso-potencia y velocidad de giro muy elevada. La turbina simple está compuesta de tres secciones principales: un compresor, una cámara de combustión y la turbina de potencia.

Las turbinas de gas operan en base en el principio del ciclo Brayton, en donde aire comprimido es mezclado con combustible y quemado bajo condiciones de presión constante. El gas caliente producido por la combustión se le permite expandirse a través de la turbina y hacerla girar para llevar a cabo trabajo. En una turbina de gas con una eficiencia del 33%, aproximadamente $2/3$ del trabajo producido se usa comprimiendo el aire. El otro $1/3$ está disponible para generar electricidad, impulsar un dispositivo mecánico, etc.[30]

Una variación del sistema de turbina simple (Brayton) es el de añadir un regenerador. El regenerador es un intercambiador de calor que aprovecha la energía de los gases calientes de escape al precalentar el aire que entra a la cámara de combustión. Este ciclo normalmente es utilizado en turbinas que trabajan con bajas presiones.

Las turbinas de gas con altas presiones de trabajo pueden utilizar un interenfriador para enfriar el aire entre las etapas de compresión, permitiendo quemar más combustible y generar más potencia. El factor limitante para la cantidad de combustible utilizado es la temperatura de los gases calientes creados por la combustión, debido a que existen restricciones a las temperaturas que pueden soportar los alabes de la turbina y otras partes de la misma. Con los avances en la Ingeniería de los materiales, estos límites siempre van aumentando. [30]

Existen también turbinas de gas con varias etapas de combustión y expansión y otras con interenfriador y regenerador en el mismo ciclo

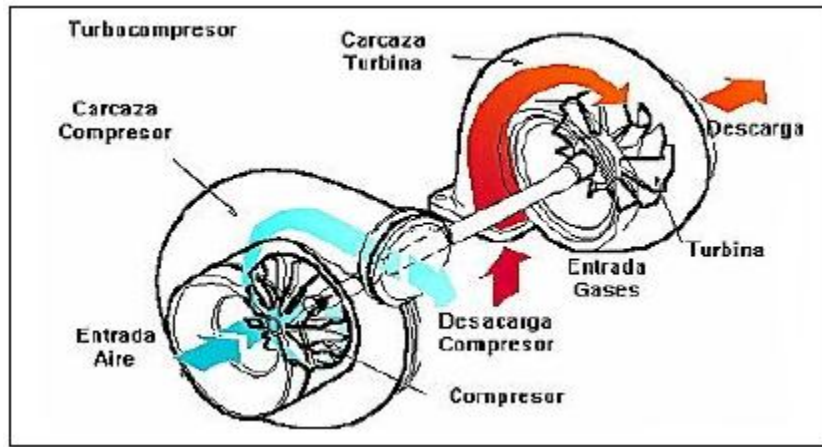


Fig 8. Turbina de gas

4.2.1.3 Clasificación

4.2.1. 3.1 Según el flujo de gases en relación con el eje central:

Axiales: Cuando los gases fluyen coaxialmente al eje de la máquina. Las máquinas axiales, ya sean compresores o turbinas, tienen mejores que las radiales, debido a las menores deflexiones de las corrientes que atraviesan la máquina.[30]

Radiales: Los gases fluyen radialmente en relación con el eje, son más sencillas y de menor costo, son competitivas en la gama de pequeñas potencias.

4.2.1.3.2 Según la forma de montaje del generador de gas y de la turbina de potencia

4.2.1.3.2.1 MONOEJE:

Cuando están montados sobre el mismo eje. Por su propia configuración, en las turbinas monoeje, compresor y turbina marchan a la misma

velocidad de giro. Cuando se precisa una disminución de la velocidad de giro del eje de salida disminuirá paralelamente el caudal de aire, la presión de salida del compresor y, en consecuencia, la potencia y su par de giro. Cuando se trata de accionar un alternador, para lo que se requiere una velocidad de giro en el eje constante, se mantendrá constante el caudal de aire y se podrá regular la potencia desarrollada modificando únicamente la inyección de combustible en la cámara de combustión in que varíe la velocidad de giro del rotor. La variación de la cantidad de combustible inyectado con caudal de aire sensiblemente constante, modifica la temperatura de entrada a la turbina y consecuentemente el rendimiento de la máquina.[30]

4.2.1.3.2.2 De dos ejes: cuando están montados sobre ejes distintos. Los generadores de gas., a su vez pueden tener más de un eje. En las turbinas de dos ejes, la velocidad de giro del generador de gas es independiente de la turbina de potencia. Cuando se necesita la velocidad de giro del generador de gas es independiente de la turbina de potencia. Cuando se necesita una velocidad de giro del eje de salida menor, el generador de gas podrá seguir girando a alta velocidad poniéndose a disposición de la turbina de potencia, un caudal de gases, incluso a presión creciente. Este tipo de máquinas es especialmente apto para aquellos casos en que se requiera un aumento del par motor a reducido número de revoluciones.[30]

4.2.1.3.3 De acuerdo al número escalonamiento:

4.2.1.3.3.1 Turbinas de acción:

Los componentes esenciales de una turbina de este tipo consisten en una tobera, para engendrar una gran velocidad en el gas, y un anillo de

álabes de forma apropiada unidos a una rueda o rodete de acción como escalonamiento, para transformar la energía cinética del chorro, muy veloz. Utilizan únicamente un chorro de gran velocidad, sin que tenga lugar alguna de presión en la misma corona de álabes.

Generalmente poses un escalonamiento pero también es posible dividirse la caída de presión en una serie de escalonamientos.[9]

4.2.13.3.2 Turbina de reacción:

El número total de escalonamientos son considerable y la caída de presión en cada uno es pequeña, comparada con la que se presenta en el único escalonamiento de una turbina de acción, que funciona entre los mismos límites de presión.

4.2.1.3.4 De acuerdo a la clase de circuito:

Se hace una distinción entre las turbinas de gas de circuito abierto en las que los gases de escape de la turbina se envían a la atmósfera y las turbinas de gas en circuito cerrado en las que circula siempre el mismo gas, en general aire, la turbina impulsado por un compresor y que atraviesa sucesivamente un recalentador de aire, la turbina y un refrigerador aguas abajo. En los dos tipos la combustión se efectúa a presión constante.[9]

4.2.1.3.4.1 Turbina con un escalonamiento, sin recuperación, con circuito abierto o turbina de gas simple:

En su forma más sencilla la turbina de combustión costa de tres elementos: el compresor; la cámara de combustión; turbina de gas.

Evidentemente la potencia disponible es la diferencia entre la potencia producida por la expansión en la turbina y la potencia absorbida por el compresor.

El ciclo termodinámico se puede dividir en tres fases, encargándose la atmósfera de la cuarta. La primera fase es la compresión, la segunda corresponde a la aportación de calor a la cámara de combustión. Una parte del aire comprimido (del orden del 30%) se utiliza para la combustión del combustible gaseoso o líquido, el resto permite enfriar las paredes de la cámara de combustión y mezclado con los gases caliente lleva la temperatura a un valor admisible para la turbina de gas. La tercera fase la constituye la expansión de los gases calientes.[30]

A pesar de un rendimiento pequeño (15% a 20%) muy inferior al de las turbinas de vapor y del motor diesel (35% a 38%) la turbina de gas simple presenta cierto número de ventajas y que se justifica para potencias inferiores a 12MW, tales como:

- La construcción es sencilla debido a las presiones utilizadas (5 a 15 bar) y la ausencia de cambiador.
- Puesta en servicio es muy rápida y paso del estado frío al de carga en un tiempo muy corto.
- Consumo de agua nulo o moderado(refrigeración de cojinetes)
- Sencillez de maniobra.
- Revisión rápida y fácil.

4.2.1.3.4.2 Turbina de gas en circuito cerrado:

El aire calentado en la caldera se expande en la turbina, pasa al cambiador, después se enfría en el prerefrigerador antes de introducirlo

en el compresor; el prerrefrigerador es un elemento que no existen en la turbina de circuito abierto pues es la atmósfera la que se ocupa de su lugar. El fluido que circula en la maquina de circuito cerrado no se mezcla con el gas de combustión y se puede utilizar indefinidamente, salvo las pérdidas por fugas que conviene compensar de igual manera que el agua en la turbina de vapor.[9]

Debido al prerrefrigerador se consume un caudal sensible de agua, el calentador de aires es una caldera más complicada que la simple cámara de combustión. Sin embargo presenta ventajas propias tales como:

Pureza del gas transportado que no se mezcla con los productos de la combustión, por lo que se puede aumentar la temperatura y que mar cualquier tipo de de combustible.

La potencia obtenida es igual al producto del trabajo útil función del ciclo por el caudal de la masa.

Es fácil hace variar la potencia suministrada con rendimiento y velocidad constantes, actuando sobre la cantidad de fluido contenido en el circuito.

4.2.1.3.5 De acuerdo al campo de aplicación:

4.2.1.3.5.1 Turbosobrealimentador (de los motores alternativos de combustión interna), es una turbina de gas sin cámara de combustión ni compresor propio, que es accionada por los gases de escape de un motor de explosión o diesel. La potencia útil de la turbota se emplea en

accionar un compresor que eleva la presión del aire que entra en el motor, de ahí el nombre con que se le conoce.[30]

4.2.1.3.5.2 Propulsión aeronáutica: Conocidas por el motor turbohélice y el turborreactor; su funcionamiento se basa en la teoría de la propulsión a chorro..

La producción de energía eléctrica: las turbogas como unidades de base en esta aplicación son bastantes costosas, pero como unidades de emergencia o de punta tienen mucha aplicación.

Propulsión marina, locomotoras, motores de automóvil, refinerías de petróleo entre otras

4.2.1.4 Rendimiento de las turbinas de combustión a gas:

Se define como la relación existente entre su producción de energía mecánica y su consumo de combustible, independientemente de que se pueda o no aprovechar parte de la energía calorífica contenida en los gases de escape de la misma. Los rendimientos de las turbinas de gas son bastante sensibles a la relación de presión en el compresor y a la temperatura misma del aire a la entrada de la turbina.[20]

En general, están comprendidos entre el 18% y 35% y se incrementan considerablemente a medida que aumenta la potencia de la turbina. Una turbina de gran potencia tendrá un rendimiento térmico superior al de una turbina de pequeña potencia, pero al mismo tiempo disminuirá su caudal de gases de escape por Kw/h

Generado y se incrementará la temperatura de emisión de los mismos, debido a una mayor temperatura de combustión.

Algunos factores importantes en el rendimiento de la turbina:

La temperatura de aire de aspiración en la turbina: A mayor temperatura de aspiración, es mayor la energía necesaria para mover el compresor del aire, en consecuencia disminuye el rendimiento y la potencia generada en el eje. Por tanto, conviene situar la toma de aire en aquel punto en que la temperatura de admisión vaya a ser más baja. Un incremento de admisión de 15°C puede llegar a suponer una disminución de potencia del eje comprendida entre el 7 al 10%. [20]

La altitud: La disminución de la presión atmosférica hace que la potencia disminuya a medida que aumenta la altitud, aproximadamente una diferencia de altitud de 1000ft supone un 3-5% de disminución de potencia, aunque el consumo de combustible disminuirá en la misma proporción, resultando el rendimiento poco afectado.

Las pérdidas de carga en la admisión del aire y la salida de gases de gases

Estas pérdidas de carga están en función de la instalación de admisión de aire y de la aplicación que se da a los gases de escape, cada 100mm de incremento de pérdidas de cargas supone aproximadamente un 1% de pérdida de potencia de la turbina.

Los gases de escape de la turbina pueden aprovecharse como calor directo para procesos térmicos o de modo indirecto en la producción de vapor o agua caliente, utilizando una caldera de recuperación o usando los gases de combustión como comburente en los quemadores convencionales. Las temperaturas de estos gases se sitúa generalmente

entre 420°C Y 650°C con un contenido de oxígeno entre 13% y 17% y una baja concentración de de contaminantes.[20]

4.2.2 Máquinas de combustión interna

4.2.2.1 Ciclo Otto

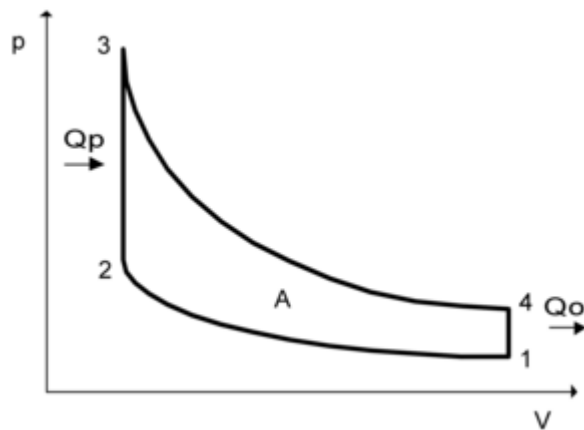


Fig 9. Ciclo Otto

Este también es llamado ciclo de encendido por chispa, en este el proceso se realiza a volumen constante.

El ciclo consta de cuatro procesos:

- 1-2: Compresión adiabática
- 2-3: Ignición, aporte de calor a volumen constante. La presión se eleva rápidamente antes de comenzar el tiempo útil
- 3-4: Expansión adiabática o parte del ciclo que entrega trabajo
- 4-1: Escape, cesión del calor residual al medio ambiente a volumen constante

En los motores ciclo Otto durante la carrera de admisión el desplazamiento del émbolo origina una succión a través del múltiple

de admisión, aspirando un volumen de mezcla aire-combustible que es comprimido dentro del cilindro durante la carrera de compresión; al final de ésta se produce el encendido de la mezcla por medio de una chispa generada por la bujía. Se inicia así la carrera de potencia o expansión de los gases hasta el punto muerto inferior, y luego se produce la carrera de barrido de los gases es producto de la combustión hasta el punto muerto superior donde termina el ciclo y se reinicia.[9]

4.2.2.2 Ciclo del diesel

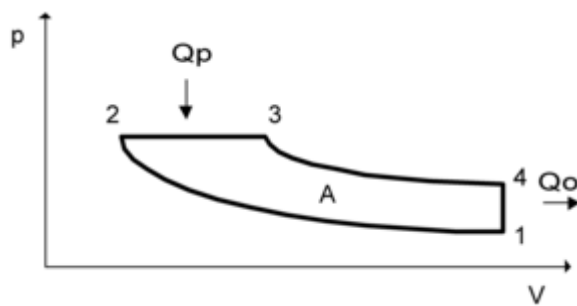


Fig10. Ciclo diesel

Ciclo termodinámico ocurre manteniéndose constante la presión, no es necesario

introducir una chispa, ya que la combustión se produce de manera espontánea.

En los motores diesel durante la admisión el motor succiona un volumen de aire que es comprimido en el cilindro hasta el PMS y allí se le inyecta directamente en la cámara de combustión el combustible que explota o autoincendia a causa de la alta temperatura generada por la compresión del aire, produciéndose luego la carrera de potencia hasta

el PMI y a continuación el barrido de los gases hasta reiniciarse nuevamente el ciclo.[2]

4.2.3 Definición

Los motores de combustión interna son un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión.

En las máquinas de combustión interna, son los gases de la combustión los que circulan por la propia máquina. En este caso, la máquina será necesariamente de ciclo abierto, y el fluido motor será el aire (no condensable) empleado como comburente en la combustión.[9]

Todos los motores de combustión interna se clasifican en dos tipos principales : de dos y cuatro tiempos. Un motor se llama de cuatro tiempos cuando tiene lugar la combustión cada cuatro carreras consecutivas, es decir, cada dos vueltas del eje cigüeñal. [32]

Un motor de dos tiempos, las cuatro operaciones o tiempos se realizan mediante dos recorridos del émbolo, originando una explosión y por consiguiente un recorrido por vuelta del cigüeñal.

4.2.4 Elementos principales de los motores de combustión interna

4.2.4.1 Cámara de combustión

La cámara de combustión es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al

interior. La posición hacia dentro y hacia fuera del pistón modifica el volumen que existe entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por un eje al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón.

En los motores de varios cilindros el cigüeñal tiene una posición de partida, llamada espiga de cigüeñal y conectada a cada eje, con lo que la energía producida por cada cilindro se aplica al cigüeñal en un punto determinado de la rotación. [9]

4.2.4.1.2 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo de combustible de un motor de combustión interna consta de un depósito, una bomba de combustible y un dispositivo que vaporiza o atomiza el combustible líquido.

4.2.4.1.3 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación es el conjunto de dispositivos que sirven para transportar el aire y el combustible, así como para mezclarlos en la medida justa. En los motores a gasolina la parte esencial es el carburador; mientras en el motor diesel las constituyen el sistema de inyección.

En el motor tipo Otto la mezcla, la cantidad de aire que entra en el cilindro es prácticamente constante para cada velocidad, y al cambiar la cantidad de combustible introducido varía la relación aire-combustible. Cuando se reduce la cantidad de combustible, el rendimiento térmico indicado se aproxima al de ciclo del aire, pero dada la pequeña cantidad de energía introducida la potencia reduce. Cuando, por el contrario, se introduce una elevada cantidad de combustible, baja

el rendimiento térmico pero la potencia aumenta a consecuencia de la mayor cantidad de calor introducido, hasta que se alcanza un valor de la relación aire-combustible próximo al estequiométrico.

En este tipo de motor la carburación está reemplazada por la inyección. Como los combustibles usados son de baja velocidad y el tiempo disponible para la vaporización es breve, el cual solo comprende el rápido intervalo que discurre desde el instante en que entran las partículas en la cámara de combustión hasta el de su encendido, se requiere una energética mezcla para llevar todas las partículas en contacto con el oxígeno del aire. Además, por lo general, es necesario introducir en la cámara de combustión una cantidad de aire mucho mayor que la correspondiente a la relación estequiométrica.[32]

4.2.3.1.4 Encendido

Todos los motores tienen que disponer de una forma de iniciar la ignición del combustible dentro del cilindro. En el sistema de ignición de los motores Otto, existe un componente llamado bobina de encendido, el cual es un auto-transformador de alto voltaje al cual se le conecta un conmutador que interrumpe la corriente del primario para que se induzca la chispa de alto voltaje en el secundario. Dichas chispas están sincronizadas con la etapa de compresión de cada uno de los cilindros; la chispa es dirigida al cilindro específico de la secuencia utilizando un distribuidor rotativo y unos cables de grafito que dirigen la descarga de alto voltaje a la bujía. El dispositivo que produce la ignición es la bujía, un conductor fijado a la pared superior de cada cilindro.

En el caso del diesel, el combustible se inyecta en el cilindro en forma de chorro de rocío atomizado y la ignición ocurre debido a la elevada

temperatura del aire que hay dentro del cilindro en el cual se inyecta el combustible.

4.2.3.1.5 Sistema de arranque

Al contrario que los motores y las turbinas de vapor, los motores de combustión interna no producen un par de fuerzas cuando arrancan lo que implica que debe provocarse el movimiento del cigüeñal para que se pueda iniciar el ciclo. Los motores de automoción utilizan un motor eléctrico conectado al cigüeñal por un embrague automático que se desacopla en cuanto arranca el motor. Por otro lado, algunos motores pequeños se arrancan a mano girando el cigüeñal con una cadena o tirando de una cuerda que se enrolla alrededor del volante del cigüeñal. Otros sistemas de encendido de motores son los iniciadores de inercia, que aceleran el volante manualmente o con un motor eléctrico hasta que tiene la velocidad suficiente como para mover el cigüeñal.[9]

4.2.3.1.6 Refrigeración

Dado que la combustión produce calor, todos los motores deben disponer de algún tipo de sistema de refrigeración. Algunos motores estacionarios de automóviles y de aviones y los motores fueraborda se refrigeran con aire. Los cilindros de los motores que utilizan este sistema cuentan en el exterior con un conjunto de láminas de metal que emiten el calor producido dentro del cilindro. En otros motores se utiliza refrigeración por agua, lo que implica que los cilindros se encuentran dentro de una carcasa llena de agua que en los automóviles se hace circular mediante una bomba. El agua se refrigera al pasar por las láminas de un radiador [9]

Para finalizar con el numeral referente a los elementos principales de los MCI, se muestra una tabla comparativa con las características de los motores diesel y Otto.

CARACTERÍSTICA	MOTOR DIESEL	MOTOR OTTO
Relación de compresión	15-21	6-9.5
Presión después de la compresión sin ignición (bares)	35-60	15-20
Temperatura después de la compresión sin ignición(°C)	600-900	400-600
Relación de aire en exceso	1,3-4	0,7-1,2
Eficiencia	0,3-0,4	0,2-0,36
Consumo específico de combustible(kg/kw.h)	0,23-0,35	0,3-0,4
Eficiencia volumétrica	0,7-0,9	0,3-0,9
Temperatura gases de escape(°C)	400-600	500-700
Velocidades(r.p.m)		
Estacionarias	1300-1500	1300-2500

Tabla 2. Tabla comparativa entre un motor diesel y Otto

4.2.4 Motor de gasolina con sistema dual gas natural/gasolina

Para ello se requiere la instalación de algunos equipos con el fin de usar ambos combustibles independientemente. Los cuales son:

a- Válvula de llenado: A través de esta se realiza la carga de los cilindros con gas

b- Equipo regulador: Se encarga de reducir la presión del cilindro de almacenamiento, para que el gas pueda acceder al sistema mezclador-dosificador de manera adecuada e ingresar adecuadamente al motor.

c- Mezclador (Dosificador auto regulable) : Este componente se coloca sobre la brida del carburador del vehículo y es donde se produce la mezcla aire-gas, el mismo consta de un difusor en forma de émbolo deslizante cuya sección es variable, siendo accionado por la propia depresión o vacío que genera el motor.

El consumo de gas se regula por intermedio de una aguja cónica unida al émbolo, el cual regula el paso de aire al mismo tiempo que la aguja regula el paso de gas, para mantener siempre y en forma automática la relación correcta de mezcla, de acuerdo con la posición de la mariposa del carburador y la revoluciones y carga del motor.

d- Toma de aire adaptadora: Este elemento reemplaza el filtro de aire original del vehículo, a la vez de ser adaptador de los distintos modelos de carburadores, y ser también pieza de ensamble del dosificador, llevando este último montado en uno de sus extremos un nuevo filtro de aire.

e- Válvula de carga: Esta nos permite el abastecimiento de los cilindros y consta de una llave manual para independizar la línea de abastecimiento con el regulador y de una manómetro indicador de carga.

f- Válvula solenoide para gas: Sirve para abrir o cerrar el flujo de gas desde los cilindros hasta el regulador, utilizando el selector de combustible

g- Cañería de alta presión: Está comprendida entre el tramo que va de los cilindros de almacenamiento del gas hasta el equipo regulador

h- Cañería de baja presión: Es la manguera que conduce el gas desde regulador hasta el mezclador. La presión en esta línea es muy baja, pero esta manguera se reviste en fibra metálica para protegerla de las altas temperaturas que está sometida.

i- Selector de combustible: Es un interruptor que permite la selección del combustible a utilizar bien sea en marcha o detenido.

Este elemento contiene un circuito temporizado que garantiza el cierre de las válvulas cuando el motor está en funcionamiento, de esta manera se reducen los riesgos de fugas de gas en el sistema.

j- Cilindros de almacenamiento:

Los recipientes para almacenar gas a alta presión, son cilindros de acero en alta resistencia o aluminio revestido con fibra de vidrio para almacenar el gas natural comprimido a una presión de 3000psi.

Por lo general el gas natural, biogás y gas de síntesis poseen un poder calorífico inferior 8300kcal/m³ genera la necesidad de comprimirlo a alta presión para poder almacenar una cantidad aceptable de energía.

k- Manómetro de combustible: Indica el nivel de carga de los cilindros. Actúa a modo de medidor electrónico de presión.

l- Llave de corte de vacío: Bloquea al sistema de gas al detenerse el motor.

Se puede utilizar solo gas como combustible, una vez modificado el motor Otto.

4.2.5 Motor diesel con sistema dual gas natural/diesel

En el funcionamiento del motor en el sistema combustible dual, el dispositivo de inyección de combustible proporciona una cierta cantidad de combustible diesel. El motor succiona y comprime una mezcla de aire y gas que ha sido preparada en un dispositivo mezclador externo. La mezcla se enciende junto con el combustible rociado. Todos los otros parámetros y elementos del motor diesel como la relación de compresión, punto o ángulo de cigüeñal de inyección permanecen inalterados.

La cantidad de combustible diesel necesaria para la ignición está entre 10% y 20% de la cantidad necesaria para el funcionamiento con combustible diesel, esto dependerá de funcionamiento y parámetros de diseño del motor.[6]

La relación mezcla aire /combustible succionada variará mediante el suministro de gas al motor pero incluso una mezcla muy pobre enciende con muchas y bien distribuidas gotas de rocío combustible diesel inyectado.

4.2.5.1 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL CON COMBUSTIBLE DUAL:

El funcionamiento de motores diesel en el modo combustible dual, tiende ser igual al funcionamiento usando combustible diesel exclusivamente;, esto se cumplirá siempre y cuando el valor calorífico

del gas no sea demasiado bajo, es decir su porcentaje en volumen de metano no sea menor del 50%.[6]

El ducto de entrada y contenedor del motor diesel son dimensionado de tal manera que para una máxima velocidad y potencia de salida el motor pueda succionar suficiente aire con el objeto de obtener una mejor relación de aire/combustible, es decir una relación de aire en exceso en un rango de 1,2-1,3 . Cuando el combustible diesel reducido y una mezcla de aire/ gas se succiona en lugar de solo aire, parte del aire desplazado por el gas. Es decir que manteniendo la relación el combustible total de entrada será menor que cuando funciona con solo diesel.

El resultado de esta reducción, se refleja en que la potencia máxima de salida a una velocidad alta en el modo de combustible dual puede ser menor que en la operación con combustión diesel. Esta disminución es menos significativa que en motores de gasolina modificados.[2]

Para predecir la potencia de salida de un motor diesel convertido en un motor diesel-gas, debe observarse lo siguiente:

a- Velocidad de operación: puede asumirse que el motor funcionará en el modo combustible dual a una velocidad menor que la velocidad máxima especificada por el motor, aproximadamente 80% de la velocidad del diseño. La sustitución de combustible será del 80% por gas sin afectar la potencia de salida

b- Sustituciones combustible diesel: La relación de sustitución puede estar por debajo de lo máximo posible, es decir el 80%; la disminución en el funcionamiento es insignificante.

c- Potencia operacional: Para motores que operan en servicio continuo, la potencia operacional normal debe estar aproximadamente entre el 80-90% de la potencia máxima.

d- Temperatura de los gases de escape: La temperatura de estos gases es más alta en el modo combustible dual debido a que la velocidad de combustión es más baja es decir el proceso de combustión no puede completarse cuando el tiempo de descarga empieza. Esto se hace relevante a velocidades altas del motor y relaciones de sustitución por gas mayores.[19]

4.2.5.1.2 Dispositivos mezcladores para combustible dual:

Para el funcionamiento del motor diesel modificado es necesario un dispositivo mezclador de aire/gas, el cual debe reunir los siguientes requisitos:

- Proporcionar una mezcla homogénea.
- Permitir variar el flujo de gas según el rendimiento requerido.

Capaz de proporcionar suficiente aire y gas para operar a carga y velocidad máxima bajo condiciones reales de presión del gas y aire, manteniendo una relación de aire en exceso mayor de 1,5 porque se necesita aire en exceso para la combustión del combustible.

4.2.5.1.2.1 Cámaras de mezclado simple; Una cámara de mezclado simple consiste en un recipiente o un tubo en unión T con una entrada para el aire, otra para el gas y una salida para la mezcla de ambos. La salida se conduce al colector del motor. Para el control de la potencia del motor (carga parcial) el suministro de gas combustible se controla por una válvula.

Las cámaras de mezclado con volúmenes más grandes que simplemente una tubería con unión t, proporcionan un tiempo de retención mayor y una mezcla más homogénea del aire y gas dentro de la cámara, esto es esencial cuando la distancia entre el dispositivo de mezclado y la entrada del colector es corta, proporcionando de esta forma un tiempo de mezclado.

4.2.5.2. Motor diesel convertido en motor a gas

Debido que con el sistema de alimentación Diesel no opera el combustible gaseoso, esto nos permite pensar en la adaptación de un sistema como el utilizado en los motores tipo Otto dispuesto sobre el múltiple de admisión.

Respecto al sistema de encendido, generalmente el sistema de inyección ha sido suspendido y para evitar daños en la culata se coloca una bujía en el alojamiento del inyector mediante una cápsula diseñada para tal fin. [6]

4.2.6 Motor a gas

El motor de combustión interna a gas es relativamente nuevo, En 1860 Lenoir propuso y construyó un motor sin combustión, el cual aspiraba una carga de gas y aire a la presión atmosférica aproximadamente

durante media carrera, en este momento se quemaba la mezcla. La elevación de presión resultante proporcionaba la fuerza motriz necesaria para terminar esa carrera, retornar el pistón hasta el extremo de la siguiente carrera para expulsar los gases quemados y llevarlo nuevamente hasta el punto de combustión de la nueva carga.

Aunque este motor se utilizó durante cierto tiempo, su rendimiento era tan bajo para ser una fuente económica de energía[.6]

El conjunto cilindro-pistón y el mecanismo biela-manivela son los componentes esenciales de los motores alternativos. En la cámara de combustión, formada por la culata y el pistón, en las proximidades del punto muerto superior, tiene lugar el proceso de combustión produciéndose a continuación la expansión de los gases que acciona el pistón. [9]

La eficiencia de los motores de combustión interna a gas, depende directamente de la relación de compresión, siempre se busca alcanzar el más alto nivel , pero esto genera una aparición de pre-ignición o ignición espontánea del gas por elevada presión acarreado una pérdida de eficiencia y capacidad de generación de potencia, incrementando los intervalos de mantenimiento y costo.

Rendimiento: El rendimiento global de un motor a gas en función del rendimiento termodinámico teórico, de las pérdidas y el rendimiento mecánico, el rendimiento termodinámico aumenta con la relación de compresión, especialmente en los motores de explosión

Las pérdidas significativas son las pérdidas de calor en los gases de escape, las pérdidas en el aceite y el agua o el aire de enfriamiento y las pérdidas a través de la superficie del motor.[19]

Mantenimiento: Los motores a gas requieren revisiones menores respecto a los motores reciprocantes.

4.3 MAQUINAS ELECTRICAS

4.3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

4.3.1.1 CLASIFICACIÓN POR USOS

Las máquinas eléctricas de acuerdo a sus usos se dividen en:

- Generadores: Transforman la energía mecánica en eléctrica. automáticos, de medición, etc.
- Motores: Son equipos eléctricos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica
- Convertidores electromecánicos: Transforman la c.a. en c.c. y viceversa, variando la magnitud de tensión (V), tanto de c.a como c.c, frecuencia (f), número de fases y otros.
- Compensadores electromecánicos: Generan o absorben potencia reactiva

(Q) en los sistemas eléctricos de potencia para mejorar los índices energéticos (el factor de potencia, niveles de tensión).

- Amplificadores electromecánicos.: Se usan para el control de equipos de gran potencia, mediante señales eléctricas de pequeña potencia, que son transmitidos a los devanados de excitación (control).
- Convertidores electromecánicos de señales.- Generan, transforman y amplifican diferentes señales

4.3.1.2 CLASIFICACIÓN POR TIPO DE CORRIENTE Y POR SU FUNCIONAMIENTO

Por el tipo de corriente se dividen en máquinas de c.a. y de c.c. Las máquinas en dependencia de su funcionamiento y de su sistema magnético (núcleo) se dividen en transformadores, máquinas de inducción, máquinas síncronas y máquinas colectoras.[10]

- Transformadores.- Se usan ampliamente para la variación de tensión. En los sistemas de transmisión, distribución y en los rectificadores de corriente,
- Máquina de inducción.- Se usan como motores trifásicos, habiendo también

monofásicos. La simpleza de su diseño y su alta confiabilidad permiten su uso en diferentes campos de la ingeniería..

- Máquinas síncronas.- Se usan como generadores de c.a. de frecuencia industrial (50 ó 60 Hz) , así como generadores de alta frecuencia (en los barcos, aviones, etc.). En los sistemas de mando eléctrico de gran potencia se usan motores síncronos.
- Máquinas colectoras.- Se usan muy rara vez y sólo como motores. Tienen un diseño complejo y exigen muy buen mantenimiento.
- Máquina de C.C..- Se usan como generadores y motores en los sistemas de mando eléctrico que requieran flexibilidad en la regulación de velocidad.
- Los generadores de c.c. frecuentemente se usan para el suministro de energía a dispositivos de comunicaciones, el transporte (aviones, trenes, buques), para
- cargar baterías. Sin embargo ahora son reemplazados por generadores de c.a. que funcionan conjuntamente con rectificadores de estado sólido.[26]

4.3.1.3 CLASIFICACIÓN POR NIVEL DE POTENCIA

En función a la potencia que absorben o generan las máquinas, se dividen en micro máquinas, motores de pequeña, media y gran potencia.

Micro máquinas.- Cuya potencia varía de décimas de watt hasta 500 w. Estas máquinas trabajan tanto en C.A. como en C.C., así como a altas frecuencias (400 - 200 Hz).[18]

- Pequeña potencia.- 0.5 - 10 kW. funcionan tanto en c.a. como en c.c. y, en Frecuencia normal (50 - 60 Hz ó más).
- Potencia media.- 10 kW hasta varios cientos de kW.
- Gran potencia.- Mayor de 100 kW. Por lo general las máquinas de media y
- Gran potencia funcionan a frecuencia industrial.

4.3.1.4 CLASIFICACIÓN POR FRECUENCIA DE GIRO (VELOCIDAD)

Se dividen en :

- Baja velocidad : con velocidad menor de 300 r.p.m
- Velocidad media : 300 - 1500 r.p.m
- Altas velocidades : 1500 - 6000 r.p.m
- Extra altas velocidades: mayor de 6000 r.p.m

5. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta está compuesta principalmente por:

- 1 Gasificador de lecho fijo tipo gas 5 - WGA 6, marca ANKUR TECHNOLOGY.
- 2 Filtros: 1 filtro fino de aserrín y 1 filtro de seguridad.
- Sistema de enfriamiento.
- Motor de combustión interna: Motor diesel de 10 hp, marca SIGIL modelo JAF1, modificado a 100% gas. Volumen: 662c.c. Relación de compresión 17/1. Diámetro :102mm.
- Generador síncrono de 5kW/60Hz.
- Tablero de medición analógica de variables eléctricas.
- Un sistema de respaldo con biogás.

El sistema de gasificación, el sistema de filtración y refrigeración y el sistema de generación eléctrica reúnen los diferentes elementos mencionados. (Ver figura 13 y figura 14).

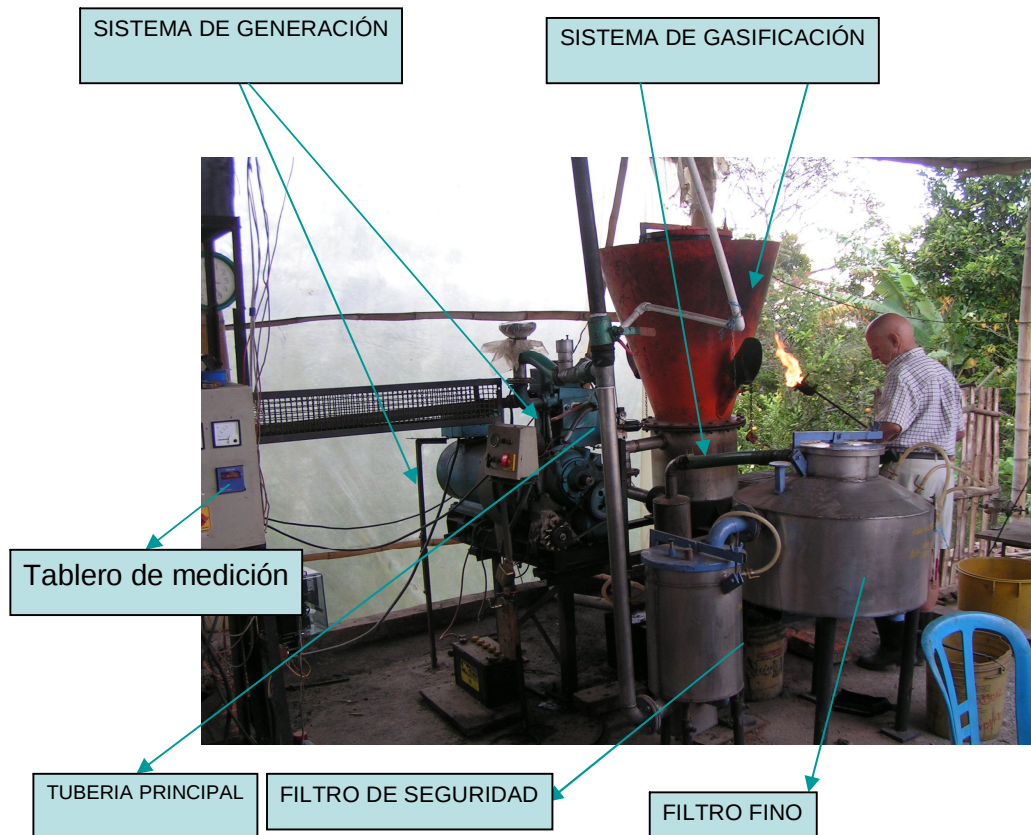


Fig 12. Vista general de la planta.

5.1 DESCRIPCION DE EQUIPOS

5.1.1 GASIFICADOR DE LECHO FIJO

El gasificador de lecho fijo en paralelo que existe en la finca tosoly, es tipo WGA -5 , marca ANKUR technology. La serie WGA-5 se utiliza para residuos de diferentes tipos de maderas y materiales con características similares.

El gasificador consta de una tolva de alimentación y un reactor cilíndrico.

5.1.1.1 Tolva de alimentación

La tolva de alimentación tiene una capacidad nominal de 270 litros. Posee dos boquillas laterales, por donde se introduce la llama que inicia el proceso de gasificación, y una garganta ubicada entre ellas (ver fig 14y 15)

La parte superior interior está recubierta con caucho y tiene una tapa de cierre rápido, que se ajusta con tornillos mariposa.

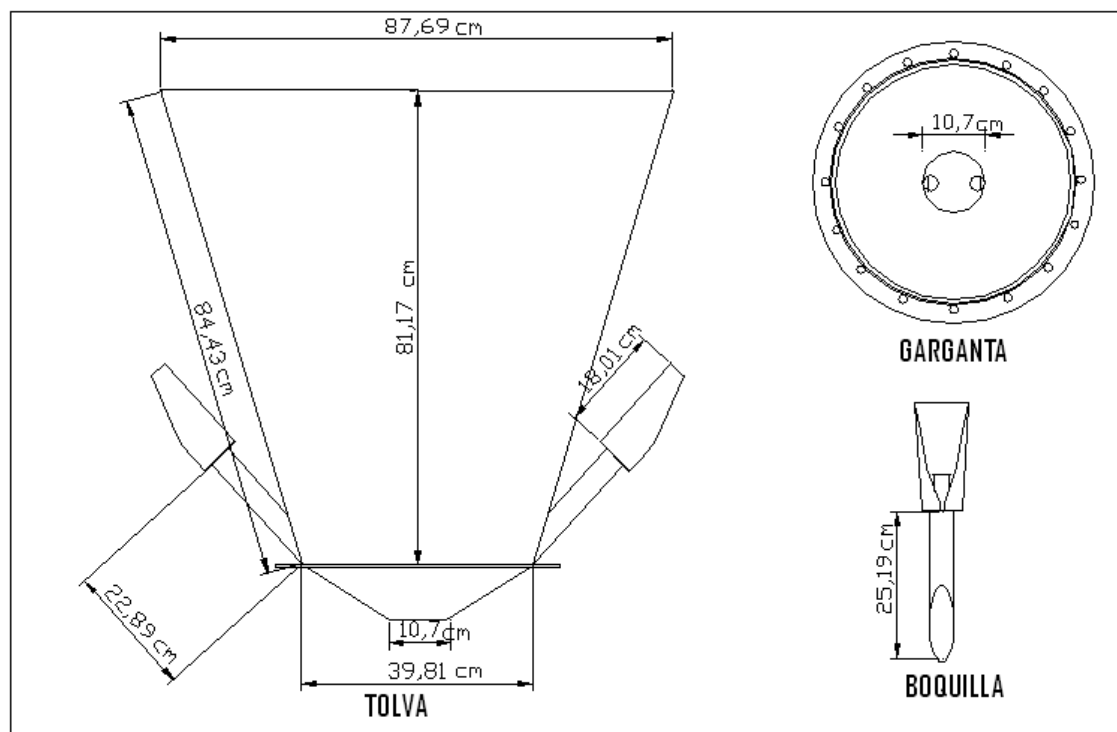


Fig 13.Tolva de alimentación y sus partes



Fig 14. Foto del Gasificador y boquillas

5.1.1.2 Reactor

El reactor cilíndrico se encuentra en la parte inferior de la tolva de alimentación, sosteniendo la garganta de esta. Posee una chaqueta interior, en donde están los orificios, por donde sale el gas pobre obtenido de la biomasa gasificada, hacia la chaqueta exterior, y además tiene una cuchilla que se mueve gracias a la acción de un motor síncrono reversible, para evitar el taponamiento de los orificios.(fig 7 y 8)

En la parte inferior, se puede observar una boquilla en donde se acumula las cenizas y un motor síncrono reversible.

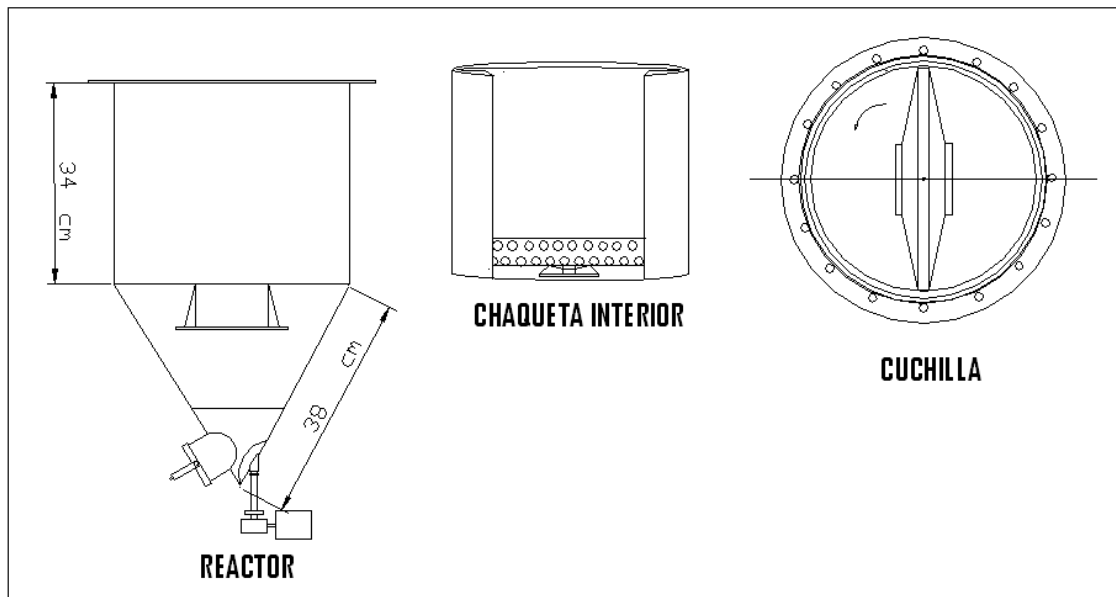


Fig 15. Reactor y sus partes



Fig 16. Foto del Reactor y sus componentes

5.1.2 SISTEMA DE REFRIGERACION

La refrigeración se realiza por diferencia de temperaturas, y el agente refrigerante, es el agua a 25°C. Los componentes de este sistema son: tubo venturí, tanque acumulador, motobomba de 110V o motobomba de 12V y desagüe.

5.1.2.1 Tubo venturí

Consiste en un disco pequeño (6.5cm), ubicado entre la tubería de salida del reactor y la entrada del hidrociclón.

La cara posterior del disco está constituida por una hélice y la cara frontal por un pequeño agujero por donde pasa el agua que entra al sistema de refrigeración.(fig 18 y fig 19).

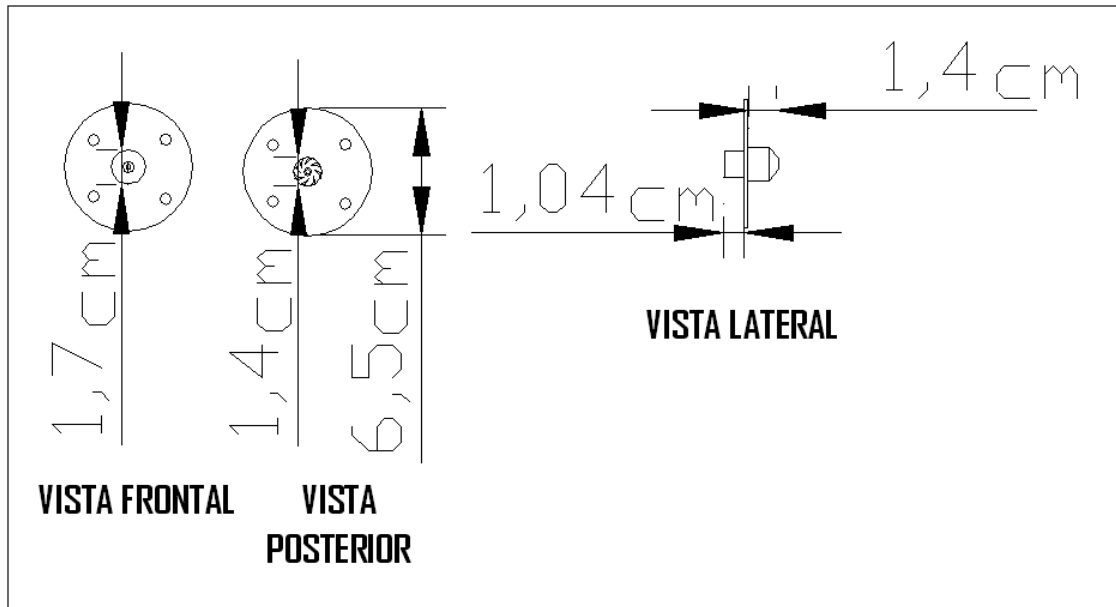


Fig 17 .Tubo Venturí

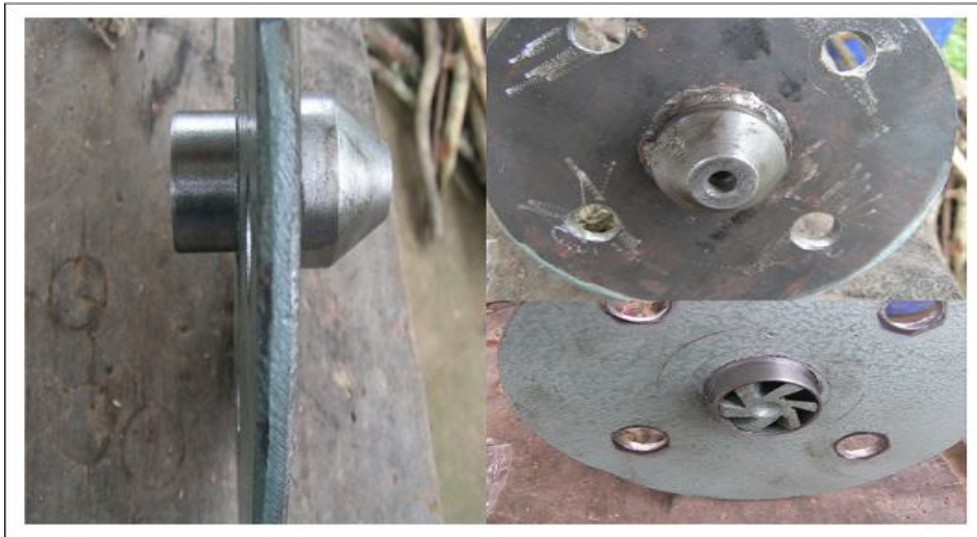


Fig18. Foto del Venturi

5.1.2.2 Tanque acumulador

El tanque (fig 20) acumulador almacena agua lluvia no tratada química ni biológicamente.

Las especificaciones técnicas son: marca Ajovert; tipo de material, polietileno; capacidad volumétrica de 500 lt; resistente a la exposición solar, a los impactos y a los diferentes químicos que puedan maltratar los componentes del mismo.



Fig 19. Hidrociclón y acumulador de agua.

5.1.2.3 Motobomba

Existen dos tipos de motobombas dentro del sistema, las cuales funcionan dependiendo del circuito eléctrico del que se alimenten, es decir con corriente continua o corriente alterna.

5.1.2.3.1 Motobomba AC

Motor asíncrono marca KTC modelo IDB-35 con Voltaje nominal 110/220, Potencia de 370 W, caudal máx. 35 l/min, altura 35m y 60Hz de frecuencia.

5.1.2.3.2 Motobomba DC

Motor de corriente continua, marca GHR, con voltaje nominal de 12V, caudal máx 10 l/min. y altura de 10 m.

5.1.2.4 Desagüe

Consiste en una caja metálica con capacidad de 37m^3 , dividida en dos partes iguales. La parte donde llega el agua proveniente del hidrociclón retiene las partículas sólidas y deja pasar el agua hacia la otra mitad, la cual se conecta al tanque acumulador.

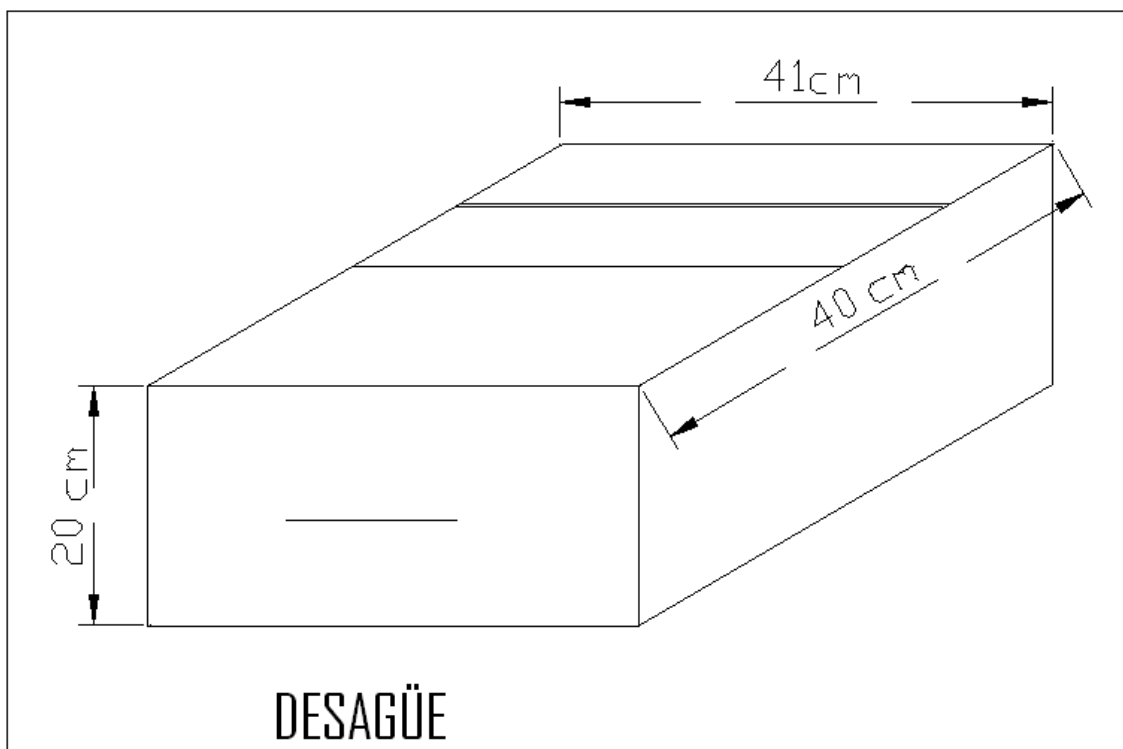


Fig 20.Desagüe

5.1.3 SISTEMA DE FILTRACION

El sistema de filtración está constituido por un filtro fino, un filtro de seguridad., y un hidrociclón.

5.1.3.1 Filtro fino

Posee un cilindro con doble chaqueta, por donde pasa el gas, a través de los orificios que se encuentran en la parte inferior interior hacia la parte exterior.(fig 11 y 12)

Contiene aserrín, el cual ocupa aproximadamente $\frac{3}{4}$ del volumen total del filtro.

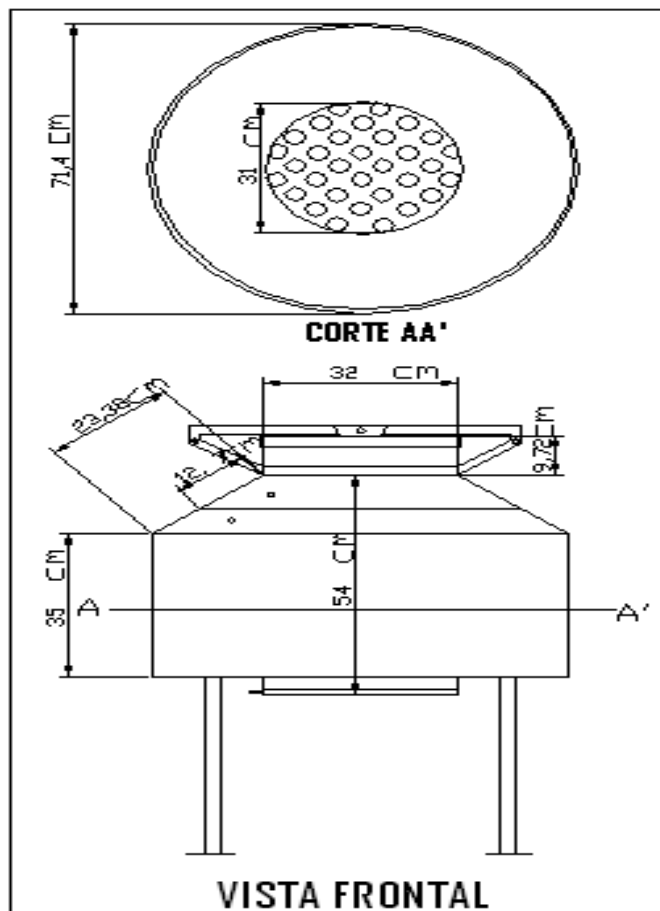


Fig 21. Filtro Fino



Fig 22. Foto del Filtro fino de aserrín

5.1.3.2 Filtro de seguridad

El filtro de seguridad tiene dos chaqueta y una manga de tela en donde se condensa el agua que queda.(fig.24 y 25)

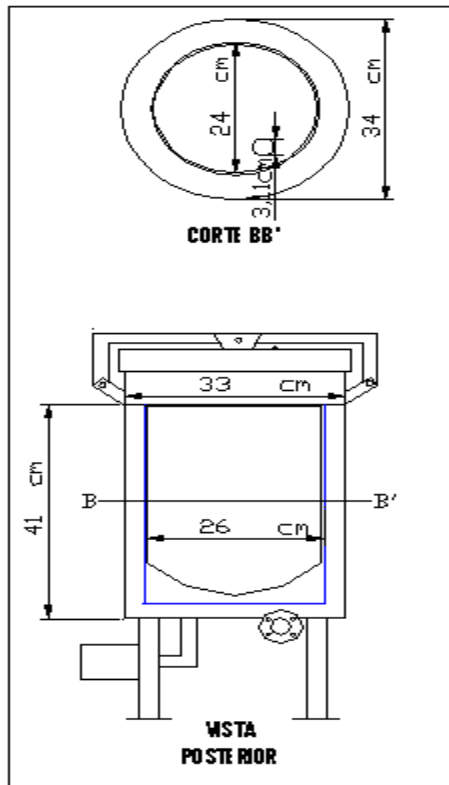


Fig 23.. Filtro de seguridad



Fig 24.Foto del Filtro de seguridad

5.1.4 SISTEMA DE GENERACION DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El sistema de generación está constituido principalmente por un par primo-motor, un sistema de medición de las principales variables eléctricas y una batería recargable.

5.1.4.1 Motor Diesel modificado

Motor de combustión interna: Motor diesel de 10 Hp, marca SIGIL modelo JAF1, modificado a 100% gas. Volumen: 662c.c. Relación de compresión 17/1.

Diámetro :102mm.

Al motor diesel se le ha modificado el sistema de inyección por una bujía.

5.1.4.2 Generador

Generador síncrono de 5kW/60Hz conectado fijamente al motor de combustión interna.

5.1.4.3 Tablero de medición eléctrica

El tablero de medición eléctrica es análogo y permite visualizar el comportamiento de tres variables, Tensión en bornes, frecuencia del generador y la corriente eléctrica de las tres fases en caso de que exista carga.

5.1.4.4 Batería

Es una batería recargable, marca DUNCAN, de 700 A a 12 V, es alimentada por el generador, a través de un inversor de AC/DC.

Esta batería se utiliza como respaldo para el encendido del motor diesel, la motobomba y la iluminación de la casa durante algunas horas en la noche.

5.1.5 SISTEMA DE BIOGÁS

Consiste en un biodigestor plástico de flujo continuo, de Tecnología Híbrida con control Automático de capa sobrenadante. Esta clase de biodigestor permite mejorar la durabilidad de la cámara de biodigestión mediante su construcción con ladrillo y cemento. También se puede decir que es una combinación entre el modelo domo fijo subterráneo y el modelo de bolsa plástica. La cámara principal de digestión es un tanque de cemento rectangular y plano, de baja profundidad. No existe una cámara de mezcla pre-digestión sino una entrada tipo sifón con acción continua de rompimiento de la capa sobrenadante. Por acción de la gravedad del efluente pasa a una cámara secundaria doméstica con el bloque biodigestor, ahorrando espacio y reduciendo costos.

El biodigestor plástico está construido con una bolsa de polietileno tubular calibre 8 con protección contra rayos ultravioleta. El plástico se usa doble para darle mayor resistencia y duración.

Debido a que la producción del gas en el biodigestor es constante, pero el consumo del biogás se hace durante unas pocas horas al día, se utiliza una bolsa que almacena el gas y esta se encuentra cerca al

motor diesel. Esta bolsa está en posición horizontal con la entrada de biogás por un extremo y salida por el otro haciendo una derivación en T como la válvula de seguridad.

5.2 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS

En la tolva se realiza la alimentación inicial del sistema en forma discontinua, una vez se tiene la cantidad adecuada (aproximadamente 6kg/hr), se procede a cerrar la tapa de cierre rápido, ajustándola con dos tornillos mariposa. Luego se abren las dos boquillas por donde entra el aire que actúa como agente oxidante y se inicia la combustión, la cual se lleva a cabo entre la garganta de la tolva y la parte superior del reactor; mientras el secado y el pirolizado de la biomasa en la parte superior y media de la tolva (fig 26).

Una vez se cierran las boquillas laterales de la tolva, se conecta la motobomba de 110V a la red eléctrica de la ESSA, por lo tanto empieza el proceso de refrigeración.

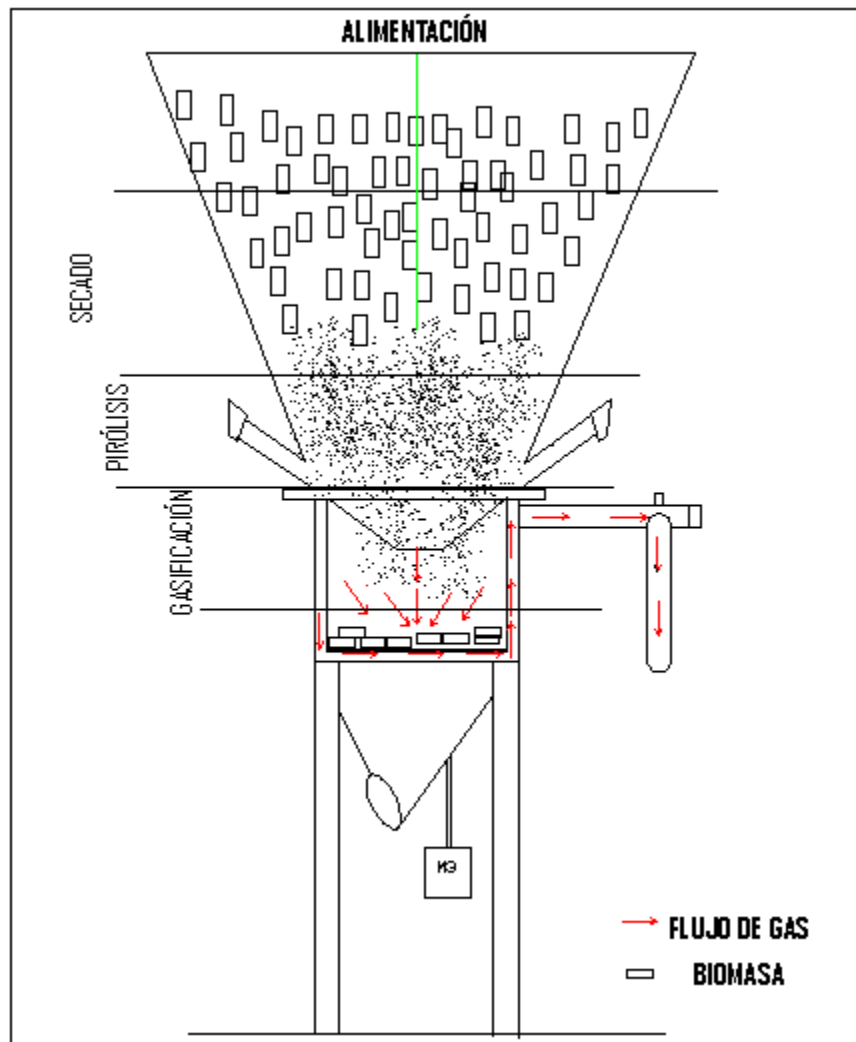


Fig.25. Flujo inicial del gas de síntesis.

El flujo de gas inicia su recorrido en la chaqueta interior del reactor hacia la chaqueta exterior a través de los orificios, de allí sale de la parte superior hacia el tubo venturí, que me permite aumentar la velocidad y disminuir la presión, generando vacío.

Después se dirige al hidrociclón con el objetivo de limpiar el gas de los alquitranes y de otras impurezas.

Al tiempo que pasa por el sistema de filtración se realiza la refrigeración por diferencia de temperaturas, que consiste en agua que pasa por el venturi y el hidrociclón, la cual se obtiene de un tanque que acumula el agua lluvia y pasa por una motobomba de 110 V o una motobomba de 12V .Finalmente el agua pasa por un desagüe y este a su vez esta conectado al tanque acumulador.

Se debe tener en cuenta que la motobomba se conecta a la red eléctrica al inicio de la gasificación pero al cabo de cierto tiempo (10-20min) se desconecta y empieza a funcionar la motobomba de 12V, la cual se alimenta de una batería recargable.

Una vez refrigerado el gas, pasa por un filtro, y luego en donde por un filtro de seguridad condensa el agua que queda, finalmente sale hacia la tubería principal fig(26)

Antes de que el gas de síntesis se dirija a la tubería principal, se enciende el motor diesel convertido a 100%gas, empleando una batería de 12V . Para el arranque del motor se abre la válvula que permite la entrada de biogás que proviene de las bolsas de almacenamiento y por ultimo se tiene un mezclador manual de gas/aire.

Una vez se considera que se tiene la mezcla adecuada entra al motor de combustión interna para generar un torque que permite generar potencia mecánica y dar inicio al generador. Al cabo de unos 20 minutos se cierra la válvula del biodigestor y se abre la válvula de la tubería principal para que el gas pobre sea el combustible del motor.(En algunas ocasiones solo funciona el sistema con el biogás).

Referente al biogás, es generado por biodigestores de flujo continuo plásticos que emplean estiércol de cerdo orgánicos y almacenado en 7 bolsas plásticas, para se empleando en cocinas y el gasificador.

Para observar las características eléctricas existe un tablero de medición análoga en donde se puede observar si hay tensión en bornes, la frecuencia del generador, y la corriente eléctrica de las tres fases en caso de que exista carga. La potencia nominal es de 5 kW, está sirve para alimentar una batería , el consumo de la casa y herramientas de corte.

Para comprobar el funcionamiento del gasificador se utiliza una llama de combustión en un tubo ubicado entre la salida del filtro de seguridad y la tubería principal, en muchos de los casos no funciona y sin embargo el tablero indica que el generador esta operando lo que indica que el biogás es el único combustible en el motor de combustión.(fig. 26)

6. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Para determinar el comportamiento energético de la biomasa utilizada dentro del proceso de gasificación, es necesario realizar diferentes pruebas de caracterización, tales como análisis próximo y análisis elemental, teniendo en cuenta los procedimientos establecidos por las normas existentes.

Se debe considerar que aunque la mayorías son residuos de madera (exceptuando la cáscara de cacao), no presentan composición constante sino que varía dependiendo de la especie, además se realizo de manera homogénea y no una mezcla de ellas.

Las muestras a analizar son:

Muestra 1 Balso

Muestra 2 Caucho

Muestra 3 Naranja

Muestra 4 Limón

Muestra 5 Balso grande

Muestra 6 Cáscara de café

Se debe tener en cuenta que la época de invierno en Socorro se caracteriza por fuertes lluvias, comenzando desde mayo hasta agosto y con menos intensidad en noviembre y diciembre.

6.1 Análisis Próximo

6.1.1 Poder Calorífico

Definición

El poder calorífico de un combustible es un indicador de la energía de enlace químico en el combustible con referencia a unas condiciones estándar, que involucran la temperatura, el estado del agua y los productos de la combustión.[5]

El poder calorífico H_o se define como el cociente entre el cambio energético sufrido por el material durante una combustión completa y la masa usada en la prueba. Para esta prueba se sigue la norma ISO 1928-1995 con bases en la cual se determina el poder calorífico superior utilizando una bomba calorimétrica con un baño de agua. Para su determinación se quema una muestra del material bajo condiciones fijas. Durante esta combustión el cambio energético aumenta la temperatura del calorímetro respecto a su temperatura inicial. Con esta temperatura se puede calcular el poder calorífico, conocido la constante calorimétrica.[18]

6.1.1.2 Parte experimental

La parte experimental fue realizada en el laboratorio de carbones de la escuela de metalurgia y materiales de la universidad industrial de Santander.

Equipos utilizados y características

- Balanza de Precisión (6 cifras significativas)
- Horno para secar crisoles (temp. 220° C)
- Pinzas
- Bomba Calorimétrica Estática
 - Calibrada con ácido benzoico
 - Agitador eléctrico
 - Termómetro líquido (3 cifras significativas)
 - Recipiente contenedor de la muestra
 - Bomba
 - Camisa adiabática
 - Tapas de seguridad
 - Recipiente que contiene la bomba (2.25l)
- Alambre fusible Ni-Cr (10cm)

2,3 cal/cm o 1400cal/g

6.1.1.2.1Desarrollo

- 1.) Se pulverizan las muestras de madera hasta 1 mm aproximadamente.(fig 1)



Fig 27.Muestras pulverizadas

2) Se calibra la balanza y luego se procede a medir un crisol pequeño vacío (capacidad aprox 1gramo) y después se agrega la masa.(fig 2 y 3)



Fig 30.Balanza de precisión (6 cifras significativas)



Fig 31.Muestra de biomasa residual

3) Se pone el crisol con masa en el recipiente para la muestra, luego se coloca el alambre que permitirá la combustión, finalmente se cierra la bomba y se llena con 36 de oxígeno para ponerla en el recipiente de reacción, junto con el agitador y el termómetro.(fig



Fig 32. Vista de la bomba calorimétrica estática

.4) Por ultimo se sella el sistema, luego se agita para homogenizar la temperatura y se toma un valor inicial de temperatura T_0 . Después pulsamos el botón de encendido hasta que la temperatura ascienda, se espera hasta que la temperatura sea estable y denominamos este punto temperatura final.

1.1.5) Una vez descienda la temperatura, procedemos a apagar el sistema y se limpia los recipientes utilizados para volver a realizar otra muestra.(fig 5)



Fig 33. Crisol después realizar prueba de calor calorífico

6.1.1.2.2 CALCULOS

Una vez se tienen los datos de masa y temperatura se procede a calcular poder calorífico(base húmeda), teniendo en cuenta la constante calorimétrica y despreciando el poder calorífico del alambre.

La constante calorimétrica es: 5088,366 Cal/°C

Tabla 3. Poder calorifico de las muestras

Muestra Nº		MASA			TEMPERATURA		$(C_{calori} * \Delta T)$	PODER CALORIFICO
	m.inicial (g)	m.final(g)	mf-mi(g)	T. Inicial(°C)	T.Final(°C)	Delta T		b.húmeda (kJ/kg)
1	3,73897	4,79758	1,05861	29,62	30,95	1,33	15744,6	14872
2	3,73759	4,77504	1,03745	29,7	32,81	3,11	36816,4	35487
3	3,73393	4,65876	0,92483	29,3	30,68	1,38	16336,6	17664
4	3,73499	4,68796	0,95297	29,29	30,39	1,1	13021,9	13664
5	3,73307	4,80879	1,07572	29,11	30,19	1,08	12785,1	11885

6	3,72301	4,7032	0,98019	29,36	32,15	2,79	33028,3	33695
1	3,74297	4,77758	1,03461	28,31	29,61	1,3	15389,5	14874
2	3,73567	4,79312	1,05745	27,55	30,71	3,16	37408,3	35375
3	3,74893	4,74576	0,99683	27,48	28,98	1,5	17757,1	17813
4	3,63486	4,59352	0,95866	28,79	29,91	1,12	13258,7	13830
5	3,72507	4,78934	1,06427	27,18	28,25	1,07	12666,7	11901
6	3,723012	4,76345	1,040438	27,03	29,98	2,95	34922,3	33565
1	3,73898	4,79878	1,0598	29,51	30,84	1,33	15744,7	14856
2	3,71679	4,78976	1,07297	27,98	31,19	3,21	38000,2	35415
3	3,75563	4,76539	1,00976	28,25	29,76	1,51	17875,5	17702
4	3,73499	4,67896	0,94397	29,49	30,59	1,1	13021,9	13794
5	3,77831	4,79879	1,02048	28,95	29,98	1,03	12193,2	11948
6	3,73201	4,75232	1,02031	27,08	29,97	2,89	34212,1	33531

La ecuación es:

$$H_0 = \frac{(C_{calori} * \Delta T)}{\Delta m}$$

(23)

Tabla 4.media aritmética y desviación estándar del poder calorífico calculado

	Media arit.(kJ/Kg)	Desv. Std
1	14867,333	9,8657
2	35425,667	56,756
3	17726,333	77,423
4	13762,667	87,323
5	11911,333	32,746
6	33597	86,556

Se puede observar que la madera proveniente del árbol Mulato y la cáscara de cacao, presentan el mayor poder calorífico respecto a las demás.

Respecto a comparar el poder calorífico de las muestras analizadas y el carbón, se puede decir que las normas fijan un estándar en la clasificación de carbones. Esta norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, bases húmeda sea menor a 14866.335 kJ/kg , los cuales se denominan sub bituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango es decir superior a 23000 kJ/kg , se incluyen los carbones bituminosos y antracitos. Por lo tanto las muestra 2 y 6 son comparables bajo ciertas condiciones con los carbones de mayor poder calorífico, mientras los demás se comparan con el lignito y los subbituminosos. (tabla)

Carbón	MJ/Kg
Antracita	23-33
Hulla	24-35
Subbituminoso	20-21
Lignito	10-20
Muestra	MJ/Kg
1	14,9
2	35,4
3	17,7
4	13,7
5	11,9
6	33,5

Tabla5 Comparación del poder calorífico entre las muestras y carbón

6.1.1.2.2.1 Poder calorífico de las muestras recolectadas en invierno

Para calcular el poder calorífico del numeral 6.1.1.2.2., se tomaron muestras en época de verano, en donde el período de secado fue mayor (temperatura en el secador entre 35° C y 45° C) y se pudo observar valores de humedad fueron inferiores al 4%. Sin embargo alimentar el gasificador con biomasa con características similares, por un período de 3 horas diarias con 6kg/hr por todo el año, es casi imposible, debido a que en épocas de invierno la planta no posee materia prima almacenada con humedad baja ni el secador ofrece temperaturas elevadas sino bajas entre 19-21 ° C. Además como lo veremos en los siguientes resultados el poder calorífico es afectado por el porcentaje de humedad, que es superior en algunos casos al 16%.

Media Arit(kJ/Kg)	%Humedad
9525	17%
28536	14%
125674	12%
8623	14%
7521	12%
29280	16%

Tabla 6. Poder calorífico de las muestras recolectadas en invierno

Podemos observar que disminuyó el poder calorífico al aumentar la humedad (tabla 2).

Finalmente se calcula el poder calorífico en base seca para las muestras recolectadas en las dos épocas del año.

$$H_{0wf} = \frac{H_0 * 100}{(100 - W)}$$

(24)

kJ/Kg(invierno)	kJ/Kg(verano)
11475	15580
33181	36824
142811	18923
10026	13810
8546	12103
34857	34338

Tabla 7. Comparación del poder calorífico de las muestras en verano e invierno

6.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad es la cantidad de agua en el material, expresado como un porcentaje del peso del material respecto a un estado de referencia en base seca.[23]

Existen dos tipos humedad superficial contenida en la muestra que puede ser evaporada por una corriente de aire a 30°C, y la humedad higroscópica que se puede conocer secando la muestra bajo un flujo constante a 105 °C en una mufla.

Equipos utilizados:

- Balanza digital
- Cajas petri
- Mufla
- Zona de enfriamiento

Materiales utilizados

Las misma muestras de la anterior prueba.



Fig34.Muestras



Fig 35 Balanza digital



Fig. 36 MUFLA

6.1.2.1 Desarrollo experimental

Se pesa las cajas petri sin muestra y luego con muestra. Después se pone durante 2 horas en el horno a 105°C. Luego se espera algunas horas para que se enfríe la caja se procede a medirla.

6.1.2.2 CALCULOS

Mediante la norma ISO 5068-1983 [15] se determina la humedad higroscópica de la muestra, y su valor se calcula a partir de la diferencia de pesos. El cálculo hace con la siguiente ecuación:

$$W = (m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}) \cdot 100 / m_{\text{inicial}}$$

(25)

Tabla 8. Cálculos para determinar la Humedad higroscópica

Muestra	Caja petri vacía(g)	P.muestra(g)	P.muest+cp	Peso final(g)	W%
1	21,2078	0,8721	22,0799	21,0792	4,5322
2	22,6911	1,2767	23,9678	23,0755	3,7229
3	22,5009	1,1825	23,6834	22,1876	6,3158
4	21,5836	1,0818	22,6654	22,5897	0,3340
5	20,879	1,1396	22,0186	21,798	1,0019
6	21,2345	1,0235	22,258	21,785	2,1251
1	17,34	0,8127	18,1527	17,2521	4,9613
2	21,308	1,0167	22,3247	21,4354	3,9835
3	20,7794	0,9408	21,7202	20,3244	6,4263
4	13,8825	1,0487	14,9312	14,8782	0,3550
5	18,4764	1,0284	19,5048	18,9804	2,6886
6	21,3561	0,9632	22,3193	21,869	2,0175
1	21,2368	0,85209	22,08889	21,1512	4,2451
2	22,7911	1,3762	24,1673	23,2755	3,6901
3	22,5386	1,1735	23,7121	22,2316	6,2436
4	21,5238	1,1232	22,647	22,5658	0,3585
5	20,7526	1,2387	21,9913	21,7568	1,0663
6	21,3694	1,0235	22,3929	21,869	2,3396

Tabla 9. Desviación std y media aritmética de la humedad calculada

M.aritmética	Desv.Std
4,57950	2,23065
3,79883	1,00961
6,32858	1,08864
0,34917	4,44535
1,58559	1,61498
2,16073	0,04850

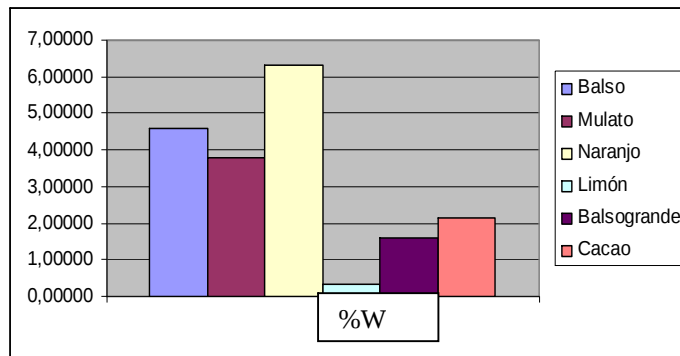


Fig 37. Humedad higroscópica

Un alto contenido de humedad reduce la eficiencia térmica porque el calor se emplea para eliminar el agua y, en consecuencia, esta energía no está disponible para las reacciones de reducción y para la transformación de la energía térmica en energía química del gas. Por lo tanto, un alto contenido de humedad se traduce en valores caloríficos bajos del gas.

En las muestras podemos observar (fig12) que todas tienen baja humedad, en especial el limón y el balso grande, quizás por mayor tiempo de secado (fig13), sin embargo se observó que en invierno el

porcentaje aumenta(fig14), como también la madera recién cortada.(Tabla 5)

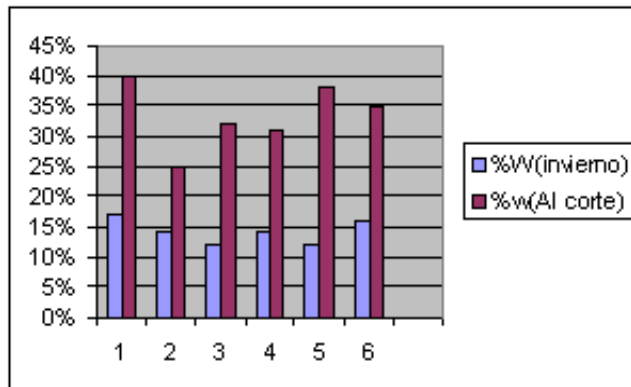


Fig.38 Humedad en invierno y sin secar (%W agua).

%W(invierno)	%W(al corte)
17%	40%
14%	25%
12%	32%
14%	31%
12%	38%
16%	35%

Tabla 10. Tabla comparativa de la humedad para muestras en invierno y al corte

6.1.3 CONTENIDO DE CENIZA

El contenido de ceniza da información sobre la cantidad de minerales en el material. La ceniza es el residuo restante cuando el combustible se quema bajo condiciones específicas, de manera que haya una combustión total.[23]

6.1.3.1 Desarrollo experimental

Para esta determinación se utiliza la norma ISO 1171 1997 [16] en la cual se especifican las condiciones de velocidad de calentamiento, temperatura y tiempo de sostenimiento para realizar la combustión controlada.

Instrumentos utilizados:

Balanza

Horno

Crisoles

Material

Las mismas muestras de las anteriores pruebas



FIG 39. Horno y crisoles

6.1.3.2 CALCULOS

El contenido de ceniza en base húmeda y base seca se calcula

Con las siguientes dos ecuaciones, respectivamente:

$$A_{BH} = m_f \cdot 100 / m_i \quad (\%)$$

(26)

$$A_{BS} = A_{BH} \cdot 100 / (100 - W) \quad (\%)$$

(27)

Tabla 11. Contenido de ceniza en BASE HÚMEDA Y BASE SECA.

Muestra	Crisol Vacío(g)	P.muestra(g)	P. final crisol(g)	P. final muestra	Cont.ce bh%		Cont.cenbs%
1	16,6077	0,9405	16,6281	0,0204	2,17	4,58	2,27
2	16,1497	0,965	16,1797	0,03	3,11	2,23	3,18
3	18,0755	1,1489	18,0955	0,02	1,74	1,01	1,76
4	16,495	1,0388	16,5119	0,0169	1,63	1,09	1,64
5	16,457	1,0743	16,4809	0,0239	2,22	4,45	2,33
6	17,235	1,0256	17,248	0,013	1,27	16,07	1,51
1	16,8187	1	16,842	0,0233	2,21	4,58	2,32
2	16,1487	1,0231	16,1797	0,031	3,03	2,23	3,10
3	17,8376	1,3528	17,8613	0,0237	1,75	1,01	1,77
4	16,378	1,0876	16,396	0,018	1,66	1,09	1,67
5	16,259	1,0143	16,2821	0,0231	2,28	4,45	2,38
6	16,432	1,0562	16,447	0,015	1,42	4,45	1,49

Tabla 12. Contenido de ceniza promedio

Media aritmética%	Conct.cenbs%
2,19	2,29
3,07	3,14
1,75	1,76
1,64	1,66
2,25	2,36
1,34	1,50

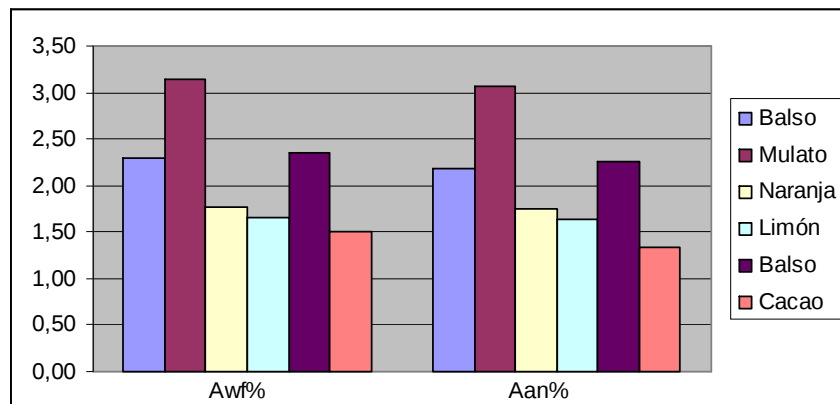


Fig 40. Humedad en base humedad y base seca

La ceniza es la materia inerte del carbón, cuyo exceso rebaja el poder calorífico, además tienden a formarse escorias, ensuciarse y corroerse los diferentes componentes de la planta. Podemos observar que el mulato presenta mayor porcentaje de ceniza, después el balso y finalmente en menor proporción la cáscara de cacao, sin embargo la diferencia no es muy alta entre ellos(fig 15). Referente a la ceniza de la biomasa en invierno(base húmeda) disminuye un poco.

6.1.4 MATERIAL VÓLATIL

La materia volátil es la parte de la biomasa que se libera cuando ésta es calentada a altas temperaturas. Esta prueba de determinación de materia volátil se realiza de acuerdo a la norma ISO 562-1996.[17]

Materiales utilizados:

Las mismas muestras de las anteriores pruebas

Instrumentos utilizados:

Balanza

Horno

Crisoles con tapa

6.1.4.1 CALCULOS

La materia volátil es la parte de la biomasa que se libera cuando ésta es calentada a altas temperaturas. Esta prueba de determinación materia volátil se realiza de acuerdo con la norma ISO 562-1996.

Se calcula de acuerdo a las siguientes fórmulas teniendo en cuenta el peso inicial como final y la humedad.

Base húmeda

$$F_{an} = [(m_{ti} - m_{tf}) * 100 / m_{ti}] - W(\%) \dots\dots\dots(28)$$

Base seca

$$F_{wf} = F_{an} * 100 / (100 - W) \quad (\%) \dots\dots\dots (29)$$

Base seca libre de cenizas $F_{waf} = F_{wf} * 100 / (100 - A_{wf})$ (%)

(30)

TABLA 13 Cálculos para material volátil en base húmeda, base seca y base libre de cenizas

Muestra	P.crisol+muestra(g)	Peso final(g)	W%	Awf%	Fan/%	Fwf %	Fwaf%
1	11,9132	11,0851	4,58	2,29	78,230	81,985	83,906
2	11,9156	11,0942	3,80	3,14	78,341	81,435	84,075
3	11,8563	10,9685	6,33	1,76	82,451	88,022	89,599
4	11,742	11,0524	0,35	1,66	68,611	68,851	70,013
5	11,5623	10,7827	1,59	2,36	76,374	77,605	79,481
6	11,4275	10,5775	2,16	1,5	82,839	84,669	85,958
1	11,9432	11,2275	4,58	2,29	66,991	70,206	71,851
2	11,8756	11,1583	3,80	3,14	67,931	70,614	72,903
3	11,6463	11,0231	6,33	1,76	55,991	59,774	60,845
4	11,942	11,1237	0,35	1,66	81,481	81,766	83,147
5	11,4523	10,7756	1,59	2,36	66,084	67,149	68,772
6	11,47523	10,6527	2,16	1,5	80,092	81,861	83,108

Tabla 14 Materia volátil promedio

Fanprom%	Fwfprm %	Fwafprom%
73,14	76,02	78,49
69,22	73,90	75,22
75,05	75,31	76,58
71,23	72,38	74,13
81,47	83,26	84,53
80,09	81,86	83,11

6.2 ANALISIS ELEMENTAL

El análisis elemental es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presente en un amplio abanico de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas.

El análisis elemental se basa en la combustión en ambiente de oxígeno puro de la muestra a analizar, a una temperatura aproximada de 1000°C. Con esta combustión se consigue convertir las moléculas orgánicas de la muestra en gases simples (CO₂, H₂O, N₂, etc).

Una vez producidos, los gases se presurizan y se separan mediante una columna cromatográfica. Finalmente, se mide la cantidad de cada uno de ellos gracias a sus diferentes conductividades térmicas

6.2.1 Composición elemental

.La composición elemental de las diferentes muestras se calculo en los laboratorios de química en Bogotá. Para poder ser analizadas se secaron y se paso por un tamiz 80.

La siguiente tabla muestras los resultados obtenidos:

Tabla 15. Análisis Elemental

C	H	N	O
43.47	5.17	0.17	51.19
63.92	8.98	1.6	25.5
45.95	6,36	0.54	47.15
40.48	5.02	0,91	53.99
39.25	4.83	0.3	59.01

En los siguientes diagrama circular se representa el contenido de nitrógeno, carbono, hidrógeno y oxígeno (libre de cenizas y en base seca) de las materia prima empleada y residuos sólidos. Se debe tener en cuenta que el oxígeno fue calculado por diferencia.

Referente al diagrama de barras nos muestra comparativamente la composición elemental de a biomasa empleada.

Se puede observar que la composición de oxígeno es superior a los demás elementos en tres muestras, en las cuales la composición del carbono es inferior. En la muestra 2 podemos observar que la cantidad de carbono e Hidrogeno es mayor.al carbón es superior en la muestra 2, y , aunque todas tiene casi las misma cantidad de oxígeno e hidrógeno.

La composición de nitrógeno es mínima en las muestras y nula en las

6.2.1.1 DIAGRAMA DE VAN-KREVELEN

Este diagrama que aparece en la figura muestra una forma simple y comprensible la comprensible la composición de un material orgánico. En él la relación atómica de hidrógeno a carbono (nH/nC) se grafica contra la relación atómica de oxígeno a carbono (nO/nC)(tabla 7)

En este diagrama se puede representar el proceso de aumento del contenido de carbón (o carbonización), el cual comienza, por ejemplo, con la celulosa o con la madera y continúa con la disminución de los elementos de hidrógeno y oxígeno a turba, lignito, hulla, carbón mineral y antracita. Para efectos de comparación el diagrama muestra también

otras sustancias como petróleo y bitumen, las cuales prácticamente no contienen oxígeno.

El diagrama puede ser usado como una forma de caracterizar los materiales cualitativamente. Los diferentes tipos de biomas se encuentran ubicados en la esquina superior derecha, lo que indica un alto contenido de oxígeno e hidrógeno. Cuando la biomasa es sometida a los diferentes procesos de transformación termoquímica se libera gran cantidad de estos elementos, aumentando así la proporción de carbono en el material, dando lugar a la desplazamiento de los productos hacia la parte inferior izquierda del diagrama y aumentando su poder calorífico respecto al que tiene su biomasa inicial.

Para determinar la relación de $\frac{n_H}{n_C}$ y $\frac{n_O}{n_C}$ de las materias primas y residuos utilizados en la planta de gasificación Tosoly, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{n_H}{n_C} = \frac{h}{c} * \frac{M_C}{M_H} \quad \frac{n_O}{n_C} = \frac{o}{c} * \frac{M_C}{M_O} \quad (31)$$

n_H, n_O, n_C : Número de moles de hidrógeno, oxígeno y carbono respectivamente.

M_H, M_C, M_O : Masa molar de hidrógeno, carbono y oxígeno respectivamente.

h, o, c : Porcentajes de hidrógeno, oxígeno y carbono respectivamente.

Tabla 7. relación de $\frac{n_H}{n_C}$ y $\frac{n_O}{n_C}$

c	h	o	Mc	Mh	Mo	nH / nC	nO / nC
43.47	5.17	47,79	12,011	1,009	15,999	1,750	0,791
63.92	8.98	53,66	12,011	1,009	15,999	1,736	0,999
45.95	6,36	50,05	12,011	1,009	15,999	1,828	0,868
40.48	5.02	49,12	12,011	1,009	15,999	1,745	0,833
39.25	4.83	49,56	12,011	1,009	15,999	1,973	0,860

Tabla 16. Datos y cálculos para el diagrama de VAN-KREVELEN

Las muestras analizadas se encuentran ubicadas en su mayoría cerca de la celulosa y una en la madera, sin embargo si se hubiese obtenido material pirolizado y su respectiva composición el comportamiento sería cercano a la Hulla y al carbón mineral.

6.2.1.2 Calculo de Formula elemental de los diferentes muestras

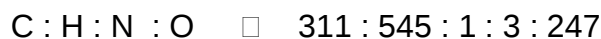
Tabla 17. Calculo de las relaciones atómicas

Elemento	Datos analíticos (%)	Pesos atómicos (g/mol)	Proporciones atómicas relativas (mol/g)	Relaciones atómicas
C	45,37	12,011	3,77737074	311
H	6,67	1,009	6,61050545	545

N	0,17	14,005	0,01213852	1
O	47,99	15,999	2,99956247	247

Los valores de la columna 2 representan los porcentajes en peso de los distintos elementos. Como éstos poseen diferentes pesos atómicos (columna 2) para obtener las proporciones atómicas relativas de cada elemento (columna 3) se divide su porcentaje en peso entre su peso atómico. A partir de estas proporciones atómicas relativas pueden deducirse las relaciones atómicas (columna 4) dividiendo cada uno de los valores entre el menor (en este caso 0.0121385 correspondiente al nitrógeno).

Con este sencillo procedimiento podemos deducir las relaciones entre los diferentes átomos presentes en nuestro compuesto:



Por lo tanto, la fórmula elemental más probable de nuestro compuesto problema es:



6.2.1.3 Cálculo del poder calorífico

Se han desarrollado algunas relaciones empíricas que permiten calcular el poder calorífico de las sustancias a partir de la composición elemental del material; una de las más usadas es la correlación de Boie,[12] la cual es:

$$\frac{H_{OWAF}}{\frac{MJ}{kg}} = 34,83C_{waf} + 115,84H_{awf} + 6.28N_{awf} - 10,28O_{awf}$$

(32)

Cálculos para cada muestra analizada:

Muestra 1:

$$H_{owaf} = 83 \cdot 43.47 + 115.84 \cdot 5.17 + 6.28 \cdot 0.17 - 10.80 \cdot 51.19 = 15612 \text{ MJ/kg}$$

Muestra 2

$$H_{owaf} = 63.92 \cdot 40.31 + 115.84 \cdot 8.98 + 6.28 \cdot 1.6 - 10.80 \cdot 25.5 = 33515 \text{ MJ/kg}$$

Muestra 3

$$H_{owaf} = 45.95 \cdot 34.83 + 115.84 \cdot 6.36 + 6.28 \cdot 0.54 - 10.80 \cdot 47.15 \text{ MJ/kg}$$

Muestra 4

$$H_{owaf} = 0.48 \cdot 34.83 + 115.84 \cdot 5.02 + 6.28 \cdot 0.91 - 10.80 \cdot 53.59 = 14184 \text{ MJ/kg}$$

Muestra 5

$$H_{owaf} = 39.25 \cdot 34.83 + 115.64 \cdot 4.83 + 6.28 \cdot 0.3 - 10.80 \cdot 59.01 = 12902 \text{ MJ/kg}$$

7. DESARROLLO EXPERIMENTAL

7.1 Temperatura de ignición: Es la temperatura mínima para que un producto entre en combustión de forma espontánea. Se utilizó la norma ASTM D3466-76 para establecer la temperatura de ignición de los diferentes tipos de madera. Se realizaron tres pruebas utilizando los siguientes instrumentos: mechero Fisher, soporte universal, pinza con nuez, aro metálico, crisol, pinzas para crisol y un termómetro de mercurio.

Los resultados obtenidos fueron:

Muestra	T.promedio(°C)
Balso	210
Caucho	230
Naranja	195
Limón	205
Balso grande	213
Cáscara de café	198

Tabla 18. Temperatura de ignición medida en las muestras

Podemos observar que todas las muestras presentan temperaturas cercanas a los 200 °C.

7.2 Medición de la temperatura:

Se empleo una termocupla tipo k utilizada en fundición de metales y un termómetro digital en donde se acondiciona la señal y se registra la temperatura medida.

Los diferentes puntos medidos se muestran en la siguiente figura:

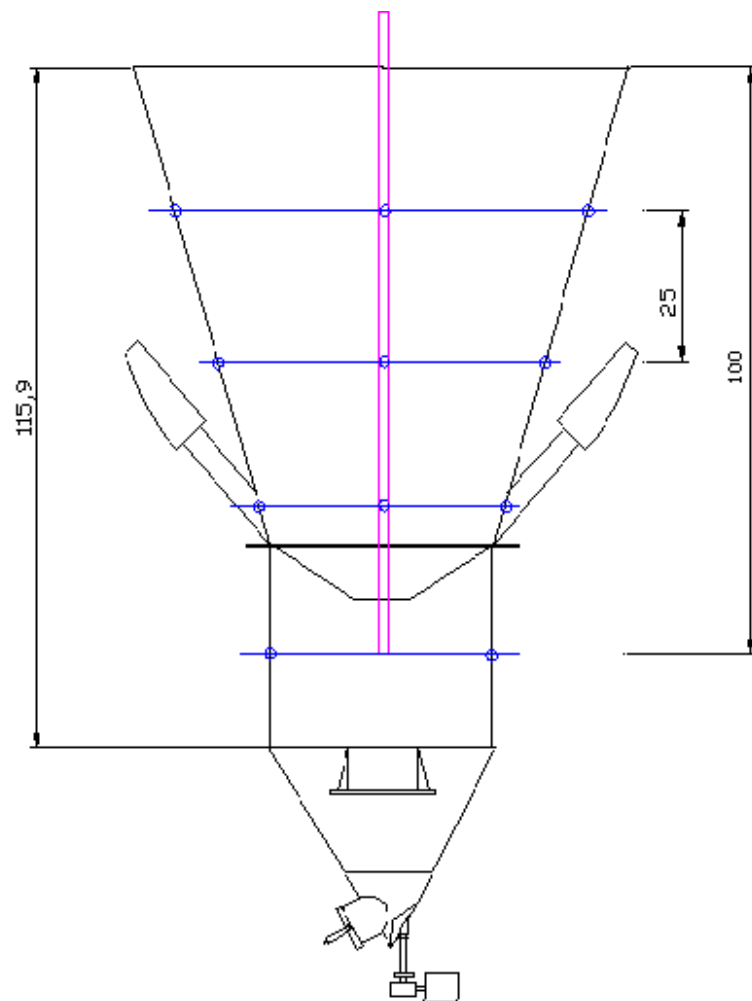


Figura 43. Medición de la temperatura en el gasificador

En la grafica se puede observar que se realizaron medidas de temperatura en el gasificador cada 25cm (en el centro y los extremos) hasta completar 1m.

También se midió la temperatura en el secador solar tipo efecto invernadero.

7.2.1 Resultados Obtenidos

1. El perfil de temperatura del gasificador de lecho fijo es el siguiente:

Zona de secado: 35°C- 225°C (0-40m)

Zona de Pirolisis: 225°C- 510°C (40-80m)

Zona de Gasificación: 510°C- 950°C (80-125m)

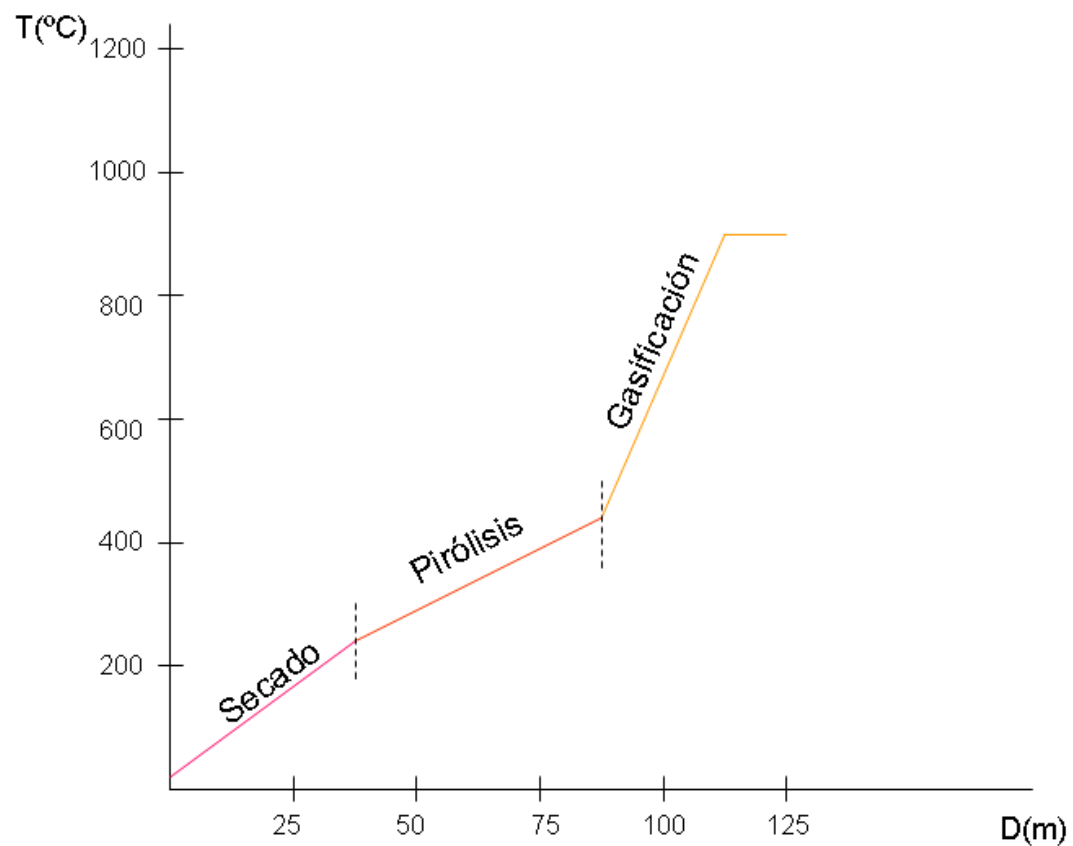


Fig 44. Perfil de temperatura

2. Temperaturas en otros puntos del sistema

Salida del Hidrociclón: 80°C

Salida del biogás: 30°C
Entrada al diesel: 65°C
Exhosto: 60°C
Secador:

7.3 Medición de presión y flujo

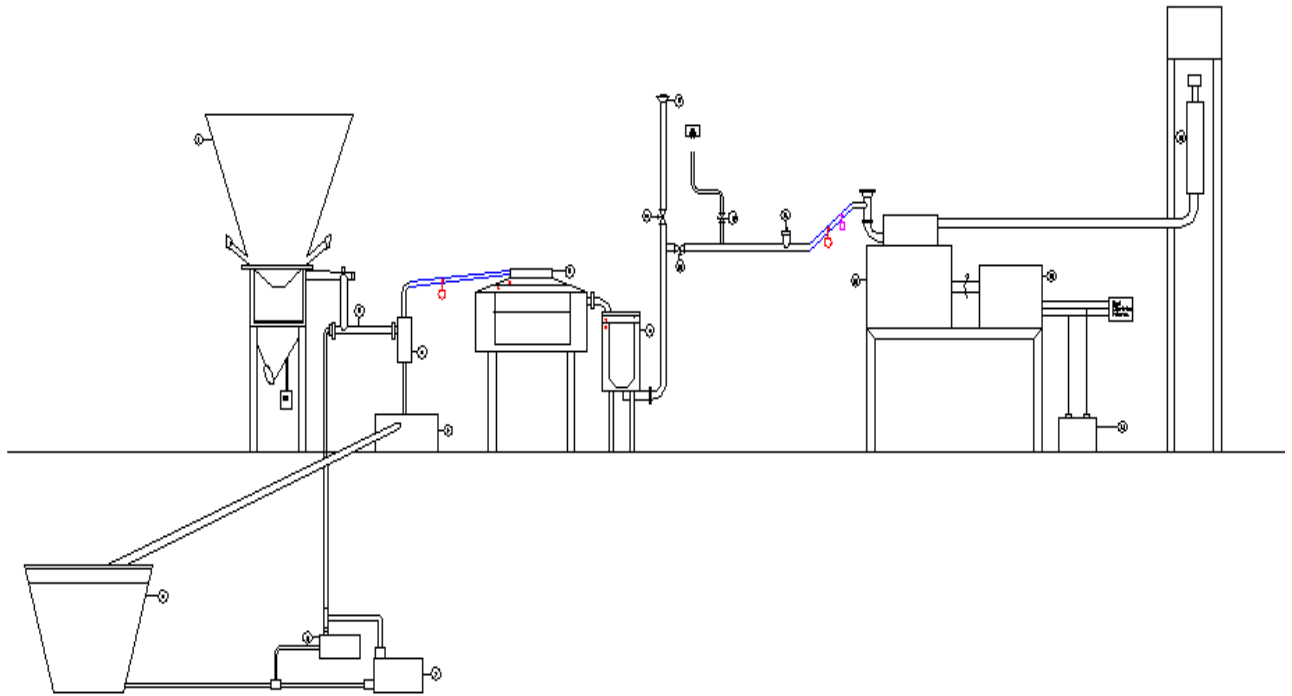


Fig 45 Medición de flujo y presión

Se realizaron mediciones de presión relativa empleando manómetros, a la salida del ciclón y a la entrada del motor de combustión interna. Medición diferencial en los dos filtros para evitar sobrepresión. Finalmente medición de la cantidad de flujo de gas utilizando un medidor de gas.

7.3.1 Resultados

Flujo de gas: 0.5m³/hr

Presión relativa entrada al filtro fino: 45mm/Hg

Presión relativa entrada al motor diesel: 60mm/Hg

7.4 Composición del gas producido.

Este se analizó de dos formas: in situ con sensor de infrarrojo no dispersivo marca Horiba, y solo una muestra tomada de una prueba fue analizada en el laboratorio de cromatografía del ICP. Se utilizó el procedimiento de análisis de gas de refinería, que sigue la norma UOP 539, en un cromatógrafo AGILENT 8890. La muestra del gas fue recogida en un cilindro DOT proporcionada por el laboratorio. El cilindro cuenta con una válvula tipo cheque para evitar escapes de hidrógeno.

Referente al biogás producido se utilizaron medidores portátiles marca T-COM y se tomó una muestra que fue analizada en los laboratorios de la universidad industrial de Santander.

7.4.1 Resultados

La composición volumétrica del gas de síntesis es:

Componente	Concentración
CO ₂	12%
CO	20%
CH ₄	4%
N ₂	55%
H ₂	9%

Tabla 19. Composición del gas de síntesis

La composición volumétrica del biogás es:

Metano 65% Dióxido de carbono: 30 % Otros gases 5%

7.5 Medición de Variables eléctricas

7.5.1 Potencia y Torque

Las revoluciones por minuto se miden con un fototacómetro digital en el eje de acople entre el motor de combustión interna y el generador síncrono, que es donde se genera el torque mecánico y torque eléctrico. Al mismo tiempo se mide la potencia generada. Finalmente se gráfica Potencia vs. Torque.

Se debe tener en cuenta que el generador síncrono fue conectado en paralelo con la red eléctrica, que es considerada como un generador infinito.

7.5.1.1 Resultados

La siguiente curva muestra el comportamiento del Torque eléctrico y mecánico en función de la potencia, teniendo en cuenta que la velocidad angular se mantuvo constante. ($\omega=1800\text{r.p.m}$)

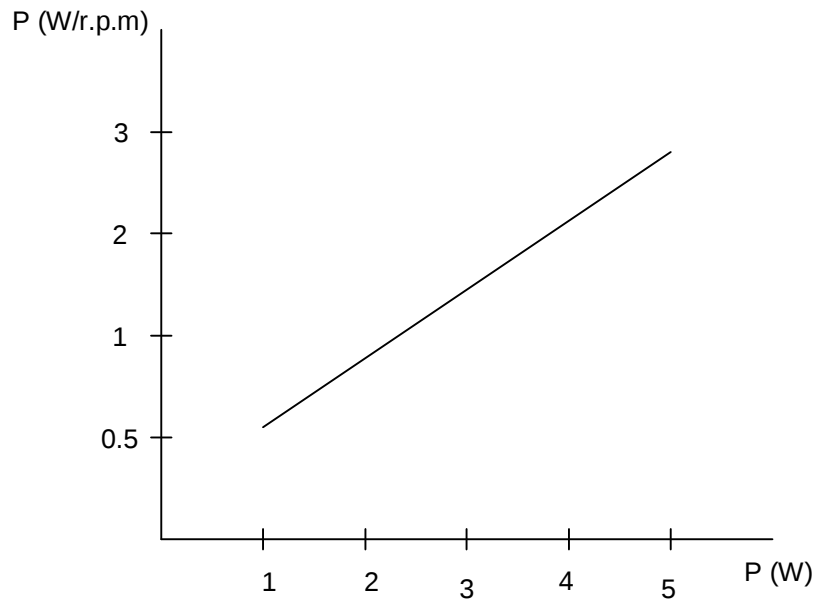


Fig 46. Gráfica Torque vs Potencia

Se puede observar que el comportamiento es lineal y creciente, por lo tanto tendremos mayor torque cuando la potencia activa sea la máxima permitida por el generador.

La anterior gráfica confirma las siguientes ecuaciones de Torque:

$T_{\text{eléctrico}} = T_{\text{mecánico}}$; $T_{\text{eléctrico}} = P/W$ cuando $W = \text{cte.}$

Sin embargo cuando conectamos el motor diesel modificado al generador, observamos el siguiente comportamiento:

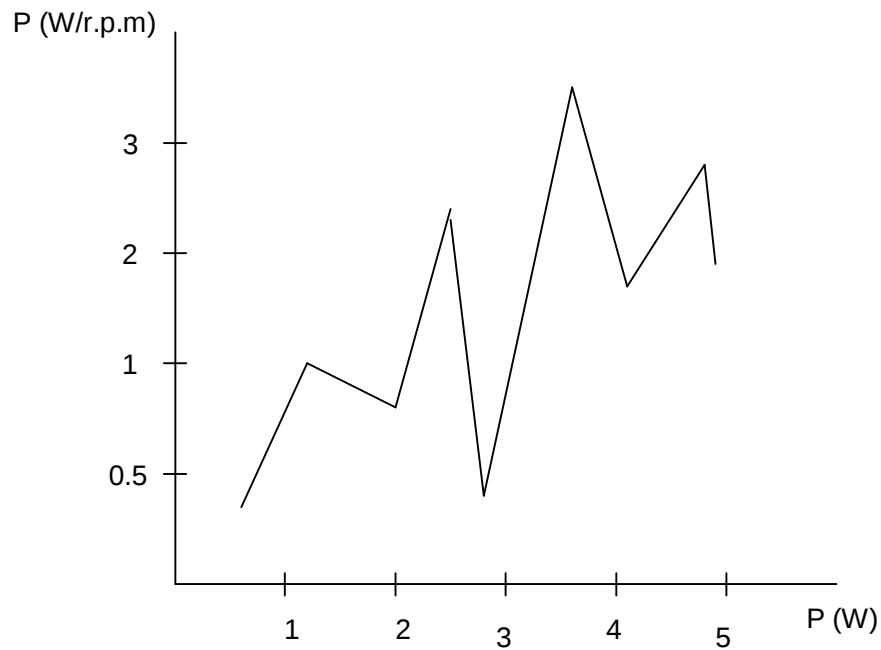


Fig 47. Gráfica Torque vs Potencia (Generador primo-motor)

Lo que nos muestra que existen transitorios con picos muy altos, que hacen que la máquina salga de su velocidad síncrono, mostrando un comportamiento de una máquina asíncrona, cuya frecuencia nominal, es variable todo el tiempo.

7.5.2 Levantamiento de la red de distribución eléctrica

Se realiza inspección de la red de distribución eléctrica para realizar un inventario de los elementos del sistema de alimentación y de las acometidas.

A continuación tres planos

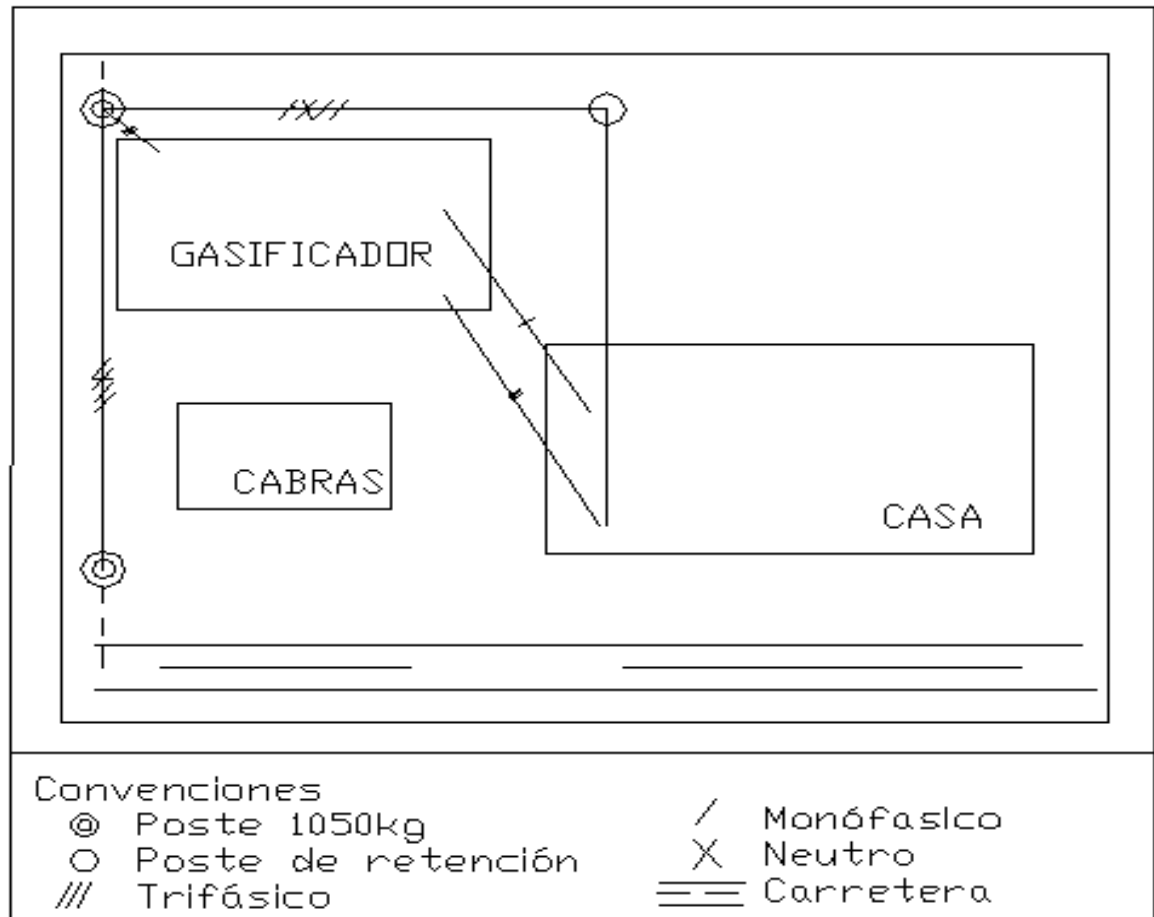


Fig 48. Plano de la red de distribución de media y baja tensión

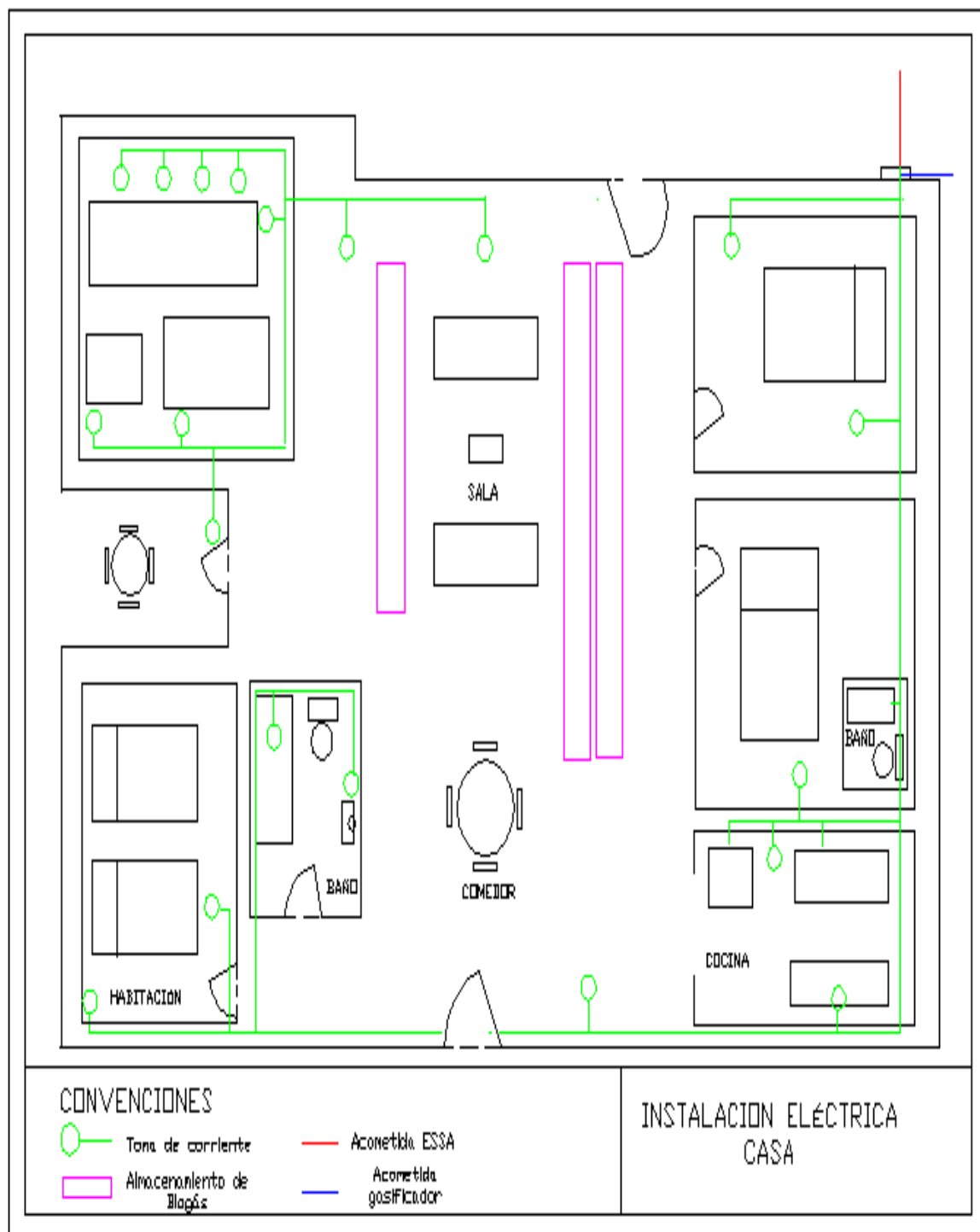


Fig 49. Plano de la instalación eléctrica de la casa

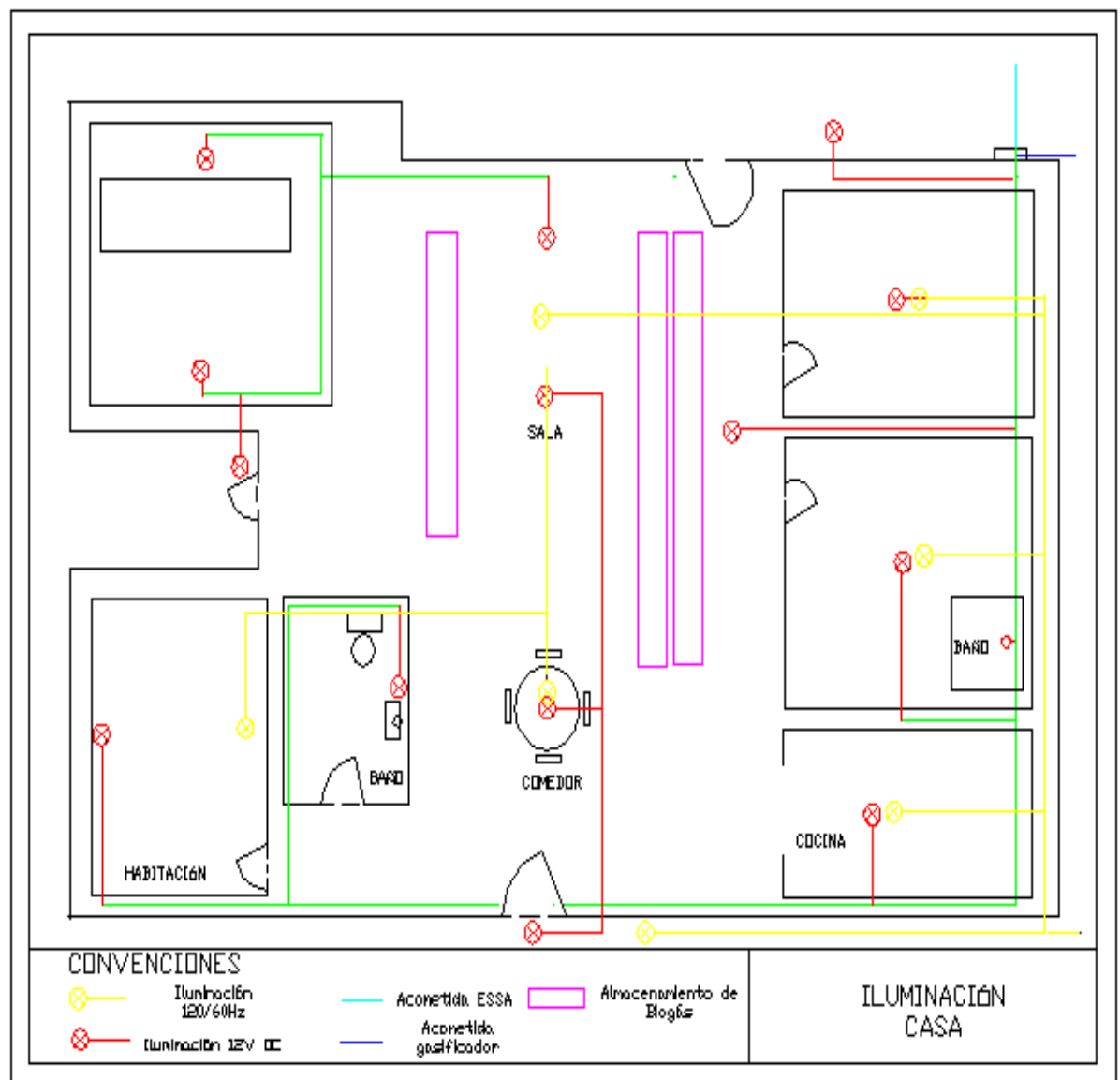


Fig 50. Plano de iluminación de la casa

8. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

*Se puede concluir que para determinar el comportamiento energético de la biomasa utilizada dentro del proceso de gasificación, es necesario realizar diferentes pruebas de caracterización, tales como análisis próximo y análisis elemental, teniendo en cuenta los procedimientos establecidos por las normas existentes. Se pudo observar que la madera proveniente del árbol Mulato y la cáscara de cacao, presentaron mayor poder calorífico respecto a las demás.

*Respecto al análisis elemental, las muestras se encuentran ubicadas en su mayoría cerca de la celulosa y una en la madera, sin embargo si se hubiese obtenido material pirolizado y su respectiva composición el comportamiento sería cercano a la Hulla y al carbón mineral. Además se observó que el mulato tiene un alto contenido de carbono.

*Debido a la heterogeneidad de la materia prima y biomasa residual utilizada en el gasificador de lecho fijo en la finca Tosoly, es imposible asociar los análisis realizados con la eficiencia del sistema y de esta manera determinar si el combustible es el adecuado o no, por lo tanto se recomienda realizar experimentos con un solo tipo de biomasa y comparar los resultados obtenidos.

*Referente al contenido de humedad de la materia prima utilizada, se puede concluir que varía de acuerdo a la época del año (verano/invierno), ya que sólo depende del sol en forma directa y no existe un mecanismo de recolección de energía solar. Se recomienda implementar un secador solar con colectores solares para tener la

mayor cantidad de biomasa posible en época de invierno y evitar el uso de biomasa residual con porcentaje de humedad muy alto.

*La composición de metano obtenida en el biogás fue del 68% mientras el gas de síntesis fue del 4%. A pesar de analizar bajo ciertas condiciones la composición del gas de síntesis, a la salida del gasificador y del biogás en los biodigestores plásticos de flujo continuo, se requeriría para un estudio más completo un analizador de gases o cromatógrafo ubicado a la salida del gasificador (a la entrada del motor de combustión) para conocer la composición de los gases presentes en el sistema. Podemos encontrar diversas clases de analizadores, desde un analizador por gas, dos gases por analizador, tres hasta 6 gases por analizador.

Debido a que en la planta no se tiene una alimentación homogénea y el gas del motor de combustión es una mezcla del biogás y gas de síntesis, se recomienda analizar bajo diferentes condiciones la composición de los gases.

*El sistema de biodigestión de la finca, está conformado por biodigestores plásticos de flujo continuo, cuya materia prima son los excrementos porcícolas y humanos. Estos biodigestores están contruidos con una bolsa de polietileno tubular calibre 8 con protección contra rayos ultravioleta. El plástico se usa doble para darle mayor resistencia y duración. Esta bolsa es instalada en una fosa cuyas dimensiones dependen del diámetro del plástico. Además se tienen bolsas sencillas para el almacenamiento del biogás, instaladas en posición horizontal, y tubería PVC que conducen el gas hasta el sitio de consumo (cocina o motor diesel modificado).

En algunas ocasiones se observó que los reservorios de biogás no almacenaban o mantenían el nivel de llenado, sino por el contrario este disminuía, (a pesar de existir la misma cantidad de excrementos). Y además ciertos olores característicos se acentuaban en la planta y la casa ubicada en la finca, por lo tanto se concluía que existía una fuga, pero el problema es que no se sabía en donde, por lo tanto se necesita sensores de gases portátiles para fugas o contratar a empresas encargadas de revisión de instalaciones de gas (como gasán, ecogás. etc.) para conocer con exactitud en donde se genera la fuga. Sin embargo se pueden realizar algunos ajustes que son importantes para evitar posibles escapes, tales como:

- La tubería debe soportar condiciones de temperatura y presión
- Las uniones deben estar en buenas condiciones y además utilizar un adhesivo adecuado.
- Evitar parches en las tuberías.

Además tener en cuenta la normatividad del consejo colombiano de seguridad industrial (Decreto 1281 de junio 22 de 1994), referente al uso y manipulación de gas y sustancias inflamables, para evitar incendios e intoxicaciones.

*La operación de la planta de gasificación se realiza de manera manual, desde la alimentación en la tolva hasta la mezcla de aire/gas en el motor diesel modificado, por lo que depende de la agilidad del operario. Además se debe tener en cuenta que no existen instrumentos de medida que permitan visualizar el comportamiento de la planta; por lo tanto es necesario implementar medidores teniendo en cuenta las

diferentes variables a medir en el sistema de gasificación, las cuales son: Presión, temperatura y flujo de gas y agua. (A pesar de que se realizaron mediciones de estas variables, se recomienda realizar bajo otras condiciones de operación y durante más tiempo, para obtener una base de datos robusta).

Una vez se identifiquen los transductores adecuados se procede a elegir un sistema de adquisición de datos que puede incluir acondicionamiento de señal o no. En el caso que no lo incluya entonces buscar el acondicionamiento de señal adecuado y luego utilizar una tarjeta de adquisición o un microcontrolador. Finalmente conectar a un computador para visualizar el registro.

Referente al control se puede implementar una vez este el sistema de medición y se puedan establecer las condiciones reales en las cuales el sistema trabaja óptimamente y el producto final es de calidad. El sistema de control me permite comparar el valor de la variable o condición con un valor deseado y toma la acción de corrección, puede ser de bucle cerrado o abierto.

* Almacenamiento de gas

El gas de síntesis obtenido del gasificador de lecho fijo, se emplea directamente en el motor diesel modificado, sin embargo el volumen del gas no está regulado a la entrada del sistema de generación, por lo tanto se recomienda un regulador de caudal, el cual podría estar conectado a un cilindro que contenga el gas. Para almacenar el gas se haría uso de un compresor que aumente la presión del mismo y de un cilindro, de esta manera se podría tener más control del gas producido y además mejora la eficiencia del sistema.

*El proceso de refrigeración de la planta, utiliza diferencia de temperaturas y como agente refrigerante agua a temperatura ambiente en un ciclo cerrado.

Se observó que uso irracional del agua reciclada, uso de energía eléctrica de la red, refrigeración variante e impurezas en el hidrociclón.

Para mejorar se podría:

Aumentar el tamaño del recipiente en donde se descarga el agua con impurezas, disminuir el tamaño del tanque alimentador con el fin de almacenar y reutilizar la mayor cantidad de agua. Implementar una malla de filtrado en el tanque alimentador para que el agua

*Respecto al generador eléctrico síncrono se pudo observar que los niveles de tensión y frecuencia estuvieron entre un 6% hasta un 30% respecto al valor nominal, lo cual es una irregularidad en el sistema de generación, de acuerdo a la norma NEMA 18678 y la RETIE, ya que sólo puede presentar valores de 3 respecto al valor de placa. De acuerdo a lo anterior se debería implementar un sistema de control de velocidad entre el gobernador y la salida del torque para obtener la velocidad angular deseada y evitar los armónicos indeseados. Además un controlador de tensión entre la excitatriz y la salida del generador. Finalmente utilizar recortadores de onda o filtros a la entrada de las instalaciones eléctricas alimentadas por la planta de generación térmica.

*Se requiere instalar un sistema de protección integral contra rayos, para evitar sobretensiones y sobrecorrientes dentro del sistema de generación y distribución; por lo tanto se debe realizar un estudio de la

resistencia y resistividad de la tierra, analizar los equipos sensibles y comparar todos los parámetros eléctricos con la norma NTC 4552.

*Existen tres sistemas (gasificador / Electrificadora/Batería DC) que alimentan la instalación eléctrica de la casa, la selección de uno de los tres, se realiza de manera manual, de acuerdo a la demanda y la capacidad de suministro. En el caso de la batería DC, se puede decir, que se utiliza para la iluminación de la casa durante la noche, teniendo en cuenta que está recargada y los bombillos empleados poseen un inversor DC/AC de 12/110V. Referente al gasificador, suministra energía eléctrica por un período aproximado de 4 horas diarias o en algunas ocasiones no se emplea, debido a fallas en el gasificador. Finalmente la red de distribución eléctrica de la electrificadora de Santander, se puede considerar como el sistema central porque la oferta es mayor y además confiable, mientras las dos anteriores se podrían considerar como respaldo de este.

Se podría tener un sistema auto sostenible y eficiente, si se realizará una alimentación continua en el gasificador de lecho fluidizado y además se automatizará la planta o por lo menos existieran algunos elementos de control a la entrada de la planta de generación, además aprovechando el biogás generado como respaldo.

*No existe un filtro de aire a la entrada del motor diesel modificado, por lo que el aire de combustión aspirado está sucio y además no se amortiguan los fuertes ruidos de la aspiración. Se debe seleccionar y colocar un filtro ya que la vida del motor depende en gran parte de la limpieza del aire de combustión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALBRIGHT, LYLE F PYROLYSIS: Theory and Industrial practice. New york: Academia Press, 1983; pág 35
- [2] ADAMS, ORVILLE. Motor diesel moderno: funcionamiento y conservación. Barcelona Labor, 1985; Pág. 23-32 1985
- [3] BEAGLE, E.C. RICEHUSK. Conversion to energy, FAO Agricultural Service Bulletin No. 31, Rome, Italy.
- [4] BOTERO BOTERO SERGIO. FUENTES NO CONVENCIONALES DE GENERACION DE ELECTRICIDAD 2005 ISAGEN
- [5] BURRIEL MARTÍ, FERNANDO; ARRIBAS JIMENO, SIRO. Química analítica cualitativa Madrid Thompson Ed. Paraninfo, Madrid, 1995; Pág 15-17
- [6] CÁRDENAS GÓMEZ HUMBERTO. Utilización de biogás como combustible para motores de combustión interna. Editorial UIS 1991; PÁG 34-45
- [7] FRANCIA WILFRID. Los combustibles y su tecnología, Ediciones Urmo, Bilbao España. 1985; Pág. 45-48
- [8] FOCER OSWALD. Fortalecimiento de la capacidad de energía renovable para América central. Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomasa.-1 ed. -San José, .2002. Pág 26-39
- [9] FERGUSON COLIN R. Internal combustión engines. Applied thermosciences 1986 New york Jhon Wiley. Pág 56-67
- [10] FITZGERALD A.E. Máquinas Eléctricas Sexta edición Mc Graw Hill
- [11] GERHARD EGGELING. Instrucciones para la construcción de una planta de Biogás- Borda Biogasteam, Bremen. 1986 pág 5-35
- [12] GÓMEZ ADRIANA. Investigación del proceso de gasificación de biomasa en un gasificador en paralelo. 2002. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad

[13] HARRY SZMANT H, Industrial utilization of renewable resources: An introduction. Lancaster denn technomic. 1986. pág 65-73

[14] HARRIS, DANIEL C. Análisis químico cuantitativo. Ed. Reverté, Barcelona, 2001pág 75-81

[15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), Brown coals and lignites -- Determination of moisture content -- Indirect gravimetric method. ISO 5068-1983. (CONTENIDO DE HUMEDAD)

[16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION , Solid mineral fuels -- Determination of ash. ISO 1171-1996.CONTENIDO DE CENIZA

[17] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION , Hard coal and coke -- Determination of volatile matter ISO 562-1996 materia volatile

[18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION Solid mineral fuels -- Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method, and calculation of net calorific value ISO 1928-1995 PODER CALORIFICO

[19] KOSTENKO, M MÁQUINAS ELÉCTRICAS BARCELONA MONTANER Y SIMON 1978

[20] MATAIX CLAUDIO, TURBOMAQUINAS TERMICAS : TURBINAS DE VAPOR, TURBINAS DE GAS, TURBOCOMPRESORES LIMUSA: EL DOSSAT 2000

[21]ORTEGA RODRIGUEZ MARIO ENERGIAS RENOVABLES MADRID THOMPSON, PARANINFO 2003

[22] ROJAS ANDRÉS EDUARDO. Investigación del procesamiento termoquímico de biomasa en termobalanza. 2003 Trabajo de grado

(Ingeniero Mecánico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería mecánica.

[23] RUBINSON, KENNETH A. Análisis instrumental, Prentice Hall D.L., Madrid, 2000.

[24] SKOOG, DOUGLAS A..Principios de análisis instrumental. Mc Graw-Hill/Interamericana de España ., Madrid, 2000. pág 67

[25] STEPHEN J. CHAPMAN. Máquinas eléctricas .Mc Graw Hill 2000. pág 75-100

[26] TOJO BARREIRO. GABRIEL. Ingeniería de las reacciones químicas. 2ed. México: Reverté ediciones. 1998 p.638

[27] TILLMAN DAVID A PROGRESS IN BIOMASS CONVERSION NEW YORK, ACADEMIC PRESS 1979

[28] VALLEJO RUBÉN CARLOS ANDREO. Fotosíntesis. Secretaria general de la OEA programa regional de desarrollo científico y tecnológico ed1 año 1988. Pág 15

[29] VALENCIA V.B. Balance de materia en procesos de combustión. Elementos de gasificación y carbonización. Universidad Nacional de Colombia, seccional Manizales. 1986

[30] VIVIER, LUCIEN. Turbinas de vapor y de gas Bilbao; Urno 1968.

[31] WHITE JACK W. Clean fuels from coal 1979 INSTITUTE OF GAS TECHNOLOGY.

[32] WASDYKE RAYMOND Experimentos con motores de combustión interna motor diesel operación, prueba y evaluación. 1984 .Pág. 45-65