



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño de un Equipo Experimental de Flujo Ascendente (Updraft)
para Gasificación Térmica de Residuos de Biomasa
Agroindustrial”.

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Mario Enrique Bohórquez Tutivén

Guayaquil – Ecuador

2015

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que
de uno u otro modo
colaboraron en la
realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A mi familia.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Jorge Duque R.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Ernesto Martínez L.
DIRECTOR DEL TFG

Ing. Mario Patiño A.
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Mario Enrique Bohórquez Tutivén.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación es un aporte a uno de los proyectos del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) por motivo del cambio de matriz energética impulsados por el gobierno central.

Para la cual se pretende usar nuevas fuentes energéticas enfocadas en sustituir el excesivo uso de los combustibles fósiles, así como la implementación de uso racional y eficiente de la energía con el único fin de contribuir con la mitigación a los impactos ambientales generados con las energías convencionales.

La gasificación es un proceso termoquímico mediante el cual se logra cambiar el estado de un combustible de estado sólido a gaseoso pasando por una serie de etapas dadas a ciertas temperaturas. Dichas etapas son: secado, pirolisis, combustión y reducción. Dependiendo del tipo de reactor, de la atmósfera de gasificación y del tipo de biomasa se pueden obtener diversos productos, pasando desde gas de baja energía obtenido a partir gasificación con aire hasta gas de energía media obtenido a partir de oxígeno e hidrógeno (agua).

El gas de síntesis (Syngas) es una mezcla de gases en la que principalmente están presente Monóxido de Carbono (CO) e Hidrógeno (H_2) considerados

como vectores energéticos, y en menor proporción CO_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , vapor de agua, alquitrán, y cenizas.

En la realización del proyecto se dan varias alternativas de modelos de gasificadores de lecho fijo como son: flujo ascendente, flujo descendente y el de flujo cruzado a los que se les analizaron sus ventajas y desventajas.

Para la selección del modelo del gasificador a construir se presenta una detallada matriz de decisión, tomando como consideración aspectos económicos, operacionales, facilidad y factibilidad de construcción así como la disponibilidad a ciertos cambios a futuro que lleven ya sea a mejorar la calidad del gas obtenido o aumentar su capacidad de producción, todo esto con el único objetivo de seleccionar el termogasificador que mejor se ajuste a los requerimientos planteados para el proyecto.

El proyecto cuenta con la definición del problema que fue realizada en base a la información obtenida a través de entidades estatales como el INER y el MEER, las cuales destinaron talento humano, información y recurso económico para la realización de éste proyecto. Una vez planteado el problema, los factores determinantes en el diseño del termogasificador fueron:

- Tipo de materia prima a utilizar.
- Tipo de atmósfera de gasificación.
- Tipo gas producto esperado.

Varios aspectos importantes en la parte construccional, así como datos técnicos, de operación y mantenimiento del gasificador, que están propuestos en este proyecto de graduación son referencias tomadas de varios proyectos de investigación de gasificación de la ESPOL, que ha experimentado durante mucho tiempo en este campo de Energías Renovables.

Al final del trabajo se suministran los planos de construcción, plan y cronograma de mantenimiento respectivo, listado de materiales, equipos y presupuesto del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	ii
ÍNDICE GENERAL	v
ABREVIATURAS.....	viii
SIMBOLOGÍA.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE PLANOS.....	xiv
ANTECEDENTES.....	1

CAPÍTULO 1

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.1. Generación Eléctrica.....	4
1.2. Descripción de la situación actual.....	6
1.3. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales.....	7
1.4. Normativa Ambiental.....	9
1.5. Hipótesis.....	11

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	12
2.1. Proceso de Gasificación.....	12

2.1.1. Etapas de la Gasificación.....	20
2.1.2. Tipos de Gasificadores.....	31
2.1.3. Partes principales de un Gasificador.....	41
2.2. Gasificador de Flujo Ascendente (Updraft).	46

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE COMPONENTES DEL GASIFICADOR EXPERIMENTAL.50

3.1. Parámetros del diseño.....	50
3.2. Selección de materiales.....	61
3.3. Diseño de forma.....	62
3.4. Cálculo de componentes.....	63

CAPÍTULO 4

4. PROPUESTA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL

GASIFICADOR.....	75
4.1. Factores que influyen en la operación.....	75
4.2. Cronograma de operación.....	77
4.3. Seguimiento de operación.....	79
4.4. Plan de mantenimiento.....	82

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	86
-----------------------------------	-----------

5.1.	Costos de Materiales.....	86
5.2.	Costos de Mano de obra.....	88
5.3.	Evaluación Económica.....	89

CAPÍTULO 6

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
-----------	--	-----------

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

INER:	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables.
MEER:	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables.
Syngas:	Synthesis Gas (Gas de Síntesis).
SNG:	Synthetic Natural Gas (Gas Natural Sintético).
CFB:	Circulating Fluidized Bed (Lecho Circulante Fluidizado).
AER:	Adsorption Enhanced Reforming (Reformado Mejorado por Adsorción).
SER:	Sorption Enhanced Reforming (Reformado Mejorado por Absorción).
DFB:	Dual Fluidized Bed (Lecho Fluidizado Dual).
RDF:	Refuse-derived fuel (Combustible Sólido Recuperado).
RSU:	Residuos Sólidos Urbanos.
MBEP:	Millones de Barriles Equivalentes de Petróleo.
GMAW:	Gas Metal Arc Welding (Soldadura de Arco con protección gaseosa)
<i>M. C.:</i>	Moisture Content (Contenido de Humedad).
<i>w. t%:</i>	Percentage by Weight (Porcentaje en Peso).
<i>d. b.:</i>	Dry basis (Base Seca).
<i>w. b.:</i>	Wet basis (Base Húmeda).
<i>daf.:</i>	Dry ash-free basis (Base seca sin cenizas).
[°C]:	Grados Celsius.
[g]:	Gramo.
[kg]:	Kilogramo.
[Tm]:	Tonelada métrica.
[min]:	Minuto.
[m]:	Metro.
[cm]:	Centímetro.
[mm]:	Milímetro.
[m ²]:	Metro cuadrado.
[cm ²]:	Centímetro cuadrado.
[m ³]:	Metro cúbico.
[L]:	Litro.
[bar]:	Bares.
[kWh]:	KiloWatt hora.
[MW _{th}]:	MegaWatt Térmico.
[kJ]:	Kilo Joule.

SIMBOLOGÍA

O_2 :	Oxígeno.
H_2O :	Agua.
CO :	Monóxido de Carbono.
CO_2 :	Dióxido de Carbono.
N_2 :	Nitrógeno diatómico.
H_2 :	Hidrógeno diatómico.
CH_4 :	Metano.
t :	Espesor.
ID :	Diámetro interior.
OD :	Diámetro exterior.
D :	Diámetro nominal.
D_b :	Diámetro del interior del hogar.
D_t :	Diámetro de la garganta.
D_n :	Diámetro de la tobera.
A_b :	Área del hogar.
A_t :	Área de la garganta.
A_n :	Área de la tobera.
$\$$:	Dólares de Estados Unidos de Norteamérica.
A/F :	Relación Aire – Combustible.
λ :	Relación de Equivalencia Aire - Combustible.
$\eta_{gasificador}$:	Eficiencia del Gasificador.
$\eta_{ventilador}$:	Eficiencia del Ventilador.
η_{cg} :	Cold-gas Efficiency (Eficiencia de gas-frío).
Q_g :	Poder Calorífico Inferior del gas producido de la gasificación.
$\dot{m}_g$:	Flujo másico del gas producido.
LHV_{fuel} :	Poder Calorífico Inferior.
$\dot{m}_{fuel}$:	Flujo másico de combustible.
$P_{indicada}$:	Potencia Indicada del soplador.
P_{real} :	Potencia Real del soplador.
U :	Coeficiente de Transferencia de Calor Total.
q_r :	Rapidez de Flujo de Calor.
k :	Coeficiente de Conductividad Térmica.
h :	Coeficiente Local de Transferencia de Calor por Convección.

Δh_{agua} :	Caída de presión en columna de agua.
ρ_{agua} :	Densidad del agua.
g :	Gravedad estándar.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Generación eléctrica del Ecuador (Año 2012)..... 6
Figura 1.2	Demanda de derivados de petróleo para generación eléctrica en el Ecuador (Año 2012)..... 7
Figura 2.1	Posibles Caminos para la Gasificación..... 21
Figura 2.2	Diagrama Ternario C-H-O para el proceso de gasificación... 26
Figura 2.3	Reactividad de biomasa versus conversión en carbón residual usando vapor de agua como agente de gasificación. 28
Figura 2.4	Composición del gas producto en diferentes atmósferas de gasificación..... 29
Figura 2.5	Esquema de un gasificador de flujo ascendente..... 34
Figura 2.6	Esquema de un gasificador de flujo descendente..... 35
Figura 2.7	Esquema de un gasificador de flujo cruzado..... 35
Figura 2.8	Esquema de un gasificador de dos etapas..... 37
Figura 2.9	Esquema de gasificadores de lecho fluidizado..... 39
Figura 2.10	Esquema de un gasificador tipo Entrained-Flow..... 41
Figura 2.11	Contenedor o tolva de material de un gasificador de lecho fijo..... 42
Figura 2.12	Hogar de un gasificador de lecho fijo de flujo descendente..... 46
Figura 2.13	Esquema de un gasificador de lecho fijo de flujo Ascendente 47
Figura 3.1	Diseño de forma del gasificador de lecho fijo de flujo ascendente..... 62
Figura 3.2	Datos de placa del analizador de gases usado para el muestreo del gas producto durante la operación de gasificador..... 68
Figura 3.3	Analizador de gases durante la operación de toma de muestras..... 68
Figura 4.1	Preparación de la biomasa para ser cargada en el gasificador.....85
Figura 4.2	Operación, cargado del material, y monitoreo del gas producto.....85

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Residuos agrícolas del Ecuador.....	8
Tabla 2 Precios referentes para generación eléctrica mediante el uso de energías renovables.....	11
Tabla 3 Principales constituyentes del gas producto resultante de la gasificación de biomasa.....	14
Tabla 4 Contenido de humedad, poder calorífico superior, poder calorífico inferior, densidad aparente y densidad de energía de combustibles de biomasa.....	19
Tabla 5 Contenido de humedad de algunas biomazas sólidas.....	23
Tabla 6 Reacciones de gasificación típicas a 25°C.....	29
Tabla 7 Comparación del efecto de difusión de poros en la gasificación de carbón y las velocidades de combustión.....	31
Tabla 8 Ponderación de los factores a evaluar en la matriz de decisión..	51
Tabla 9 Matriz de decisión.....	52
Tabla 10 Especificaciones del agente de gasificación.....	53
Tabla 11 Análisis proximal y elemental en base húmeda de biomasas seleccionadas como combustibles para el proyecto	53
Tabla 12 Análisis elemental en base seca de biomazas seleccionadas como combustibles para el proyecto.....	54
Tabla 13 Análisis elemental en base seca libre de cenizas de biomasas seleccionadas como combustibles para el proyecto...	55
Tabla 14 Poderes caloríficos de biomazas seleccionadas para el proyecto.....	59
Tabla 15 Rango del LHV del gas producto según el agente de gasificación seleccionado.....	60
Tabla 16 Datos preliminares del Diseño de Proceso.....	65

Tabla 17	Promedio de lecturas de la composición volumétrica del gas producto obtenido.....	67
Tabla 18	Datos de placa del analizador de gases portátil.....	67
Tabla 19	Propiedades de los materiales seleccionados para la construcción del gasificador.....	73
Tabla 20	Propiedades del aire y dimensiones del gasificador (estimados).....	74
Tabla 21	Problemas iniciales.....	80
Tabla 22	Problemas generales durante la operación.....	81
Tabla 23	Costos de materiales y equipos.....	87
Tabla 24	Costos de mano de obra.....	88
Tabla 25	Inversión inicial.....	88
Tabla 26	Composición de aire estándar a presión atmosférica.....	94
Tabla 27	Calor específico de gases.....	94
Tabla 28	Poderes caloríficos de los constituyentes del gas producto típico de la gasificación de biomasa sólida.....	95
Tabla 29	Resultados de las diferentes muestras de gas producto analizadas.....	96

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Vista General del Gasificador

Plano 2 Corte frontal del Gasificador

Plano 3 Vistas de la base del Gasificador

Plano 4 Vistas del tramo inferior del Gasificador

Plano 5 Vistas del tramo intermedio del Gasificador

Plano 6 Vistas del tramo superior del Gasificador

Plano 7 Vistas de la tapa tipo domo del Gasificador

Plano 8 Vistas del refractario del hogar del Gasificador

ANTECEDENTES

La Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción con más de 30 años de historia en proyectos de termogasificación, y cooperando con otros centros de investigación nacionales y extranjeros ha adquirido vasta experiencia en este campo de energías renovables.

Aprovechando esa historia el presente trabajo de investigación forma parte de un proyecto del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables - INER en convenio con la FIMCP de la ESPOL, con el objetivo de generar energía a partir de fuentes renovables no tradicionales, para la cual se aprovechan residuos agroindustriales, agroforestales, RSU, entre otros tipos de biomasas, empleando la tecnología de termogasificación.

En el Capítulo 1 se define el problema, para la cual se describe la situación actual del sector energético, el objetivo general y específico de diseñar un termogasificador experimental, además de indicar las Normativas Ambientales en cuanto a proyectos de generación eléctrica a través del uso de fuentes renovables de energía no tradicionales (aprovechamiento de residuos agroindustriales).

En el Capítulo 2 se observa el marco teórico para el presente proyecto, como es el proceso de gasificación térmica, sus etapas, los tipos de gasificadores utilizados a baja escala, y las partes principales de un termogasificador de lecho fijo.

En el Capítulo 3, se presenta el diseño del gasificador experimental, mediante el cálculo de sus componentes, una vez seleccionado los principales parámetros para el diseño, la selección de los materiales a usar y el diseño de forma final. Además se presenta los resultados obtenidos inicialmente del proyecto durante su operación, las ventajas e inconvenientes que se establecen en el diseño de los puntos que estructuran el proyecto.

En el Capítulo 4 se presenta la Propuesta de Operación y Mantenimiento del Gasificador considerando los factores influyentes en la operación. Así también se menciona el cronograma de mantenimiento, el seguimiento de la operación y su plan de mantenimiento respectivo.

En el Capítulo 5 se presenta el Análisis Económico del proyecto que incluye costos de materiales, costos de mano de obra, y una evaluación económica con lo que se permite tener una idea general de la inversión inicial para el proyecto.

Finalmente en el Capítulo 6 se darán las respectivas Conclusiones y Recomendaciones del diseño del Gasificador Térmico Experimental propuesto.

CAPÍTULO 1

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

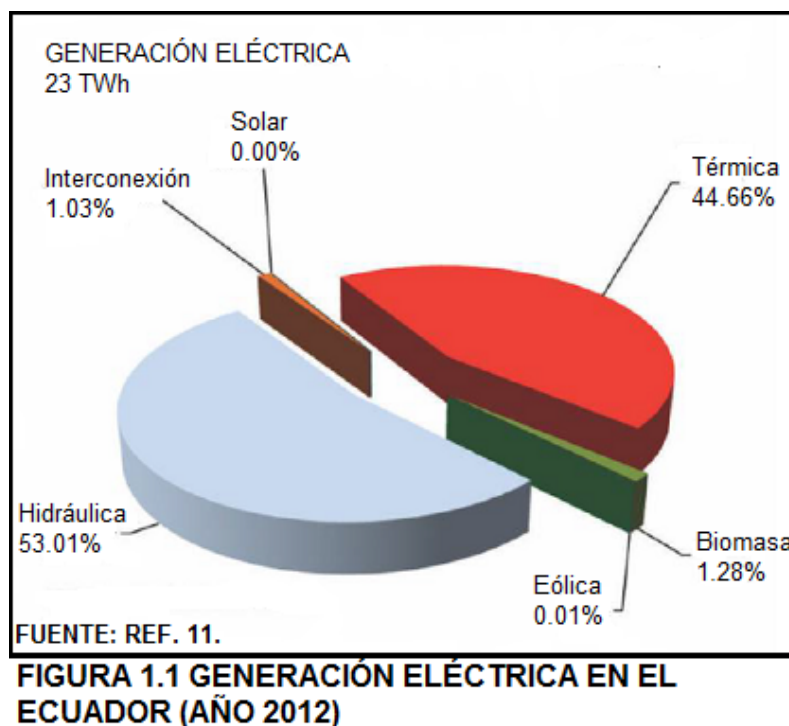
1.1. Generación Eléctrica.

Desde la invención de la bombilla, el uso de la energía eléctrica se ha convertido en uno de los pilares más firmes del desarrollo de los pueblos. Tanto así que ya en 1917, Vladimir Lenin, resumiría su importancia para la humanidad en la célebre frase, “Electrificar es hacer revolución”. Hoy en día se escucha una frase muy buena pero a con un fondo muy incierto: “No hay energía más cara que la no se tiene”, haciendo referencia precisamente a la carencia de energía eléctrica, en la época de oscuridad que vivió el país.

Desde la creación del Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) en 1961, y de la inauguración del primer proyecto hidroeléctrico (Pisayambo) en 1980 el país ha visto un lento

crecimiento de su matriz energética, y un rápido aumento de la demanda de energía.

En la actualidad la matriz energética es muy diversa tanto en el uso de fuentes renovables y no renovables, en la que destacan la generación hidroeléctrica, y la termoeléctrica a partir de biomasa y de combustibles fósiles (Figura 1.1). Cabe mencionar que el gobierno central está fomentando un cambio radical al sector eléctrico mediante el Plan de Expansión de Generación Eléctrica para un periodo comprendido desde 2012 al 2021 y que contempla un incremento muy significativo de la capacidad de generación instalada, mediante la construcción de los megaproyectos Coca Codo Sinclair, Delsitanisagua, Manduriacu, Mazar Dudas, Minas San Francisco, Quijos, Sopladora, Toachi Pilatón, y Villonaco, para una capacidad total de generación de 2,697[MW] con una inversión que supera los \$5,000 millones.



1.2. Descripción de la situación actual.

El consumo de energía a nivel mundial y particularmente en países industrializados ha tenido un crecimiento constante. Es así que la demanda mundial de energía en el período de 1973 al 2011 aumentó de 4,674 a 8,918 millones de barriles de petróleo respectivamente. Los estudios indican que del consumo total de energía en el año 2011, el 66% provienen de recursos NO RENOVABLES y solamente el 13% se originan de residuos y biocombustibles.

En el Ecuador la demanda de los energéticos para el año 2012 alcanzó los 100.7[MBEP] de lo cual el sector eléctrico utilizó

únicamente 18.7[MBEP] en combustibles para todo el parque termoeléctrico nacional. (Figura 1.2).

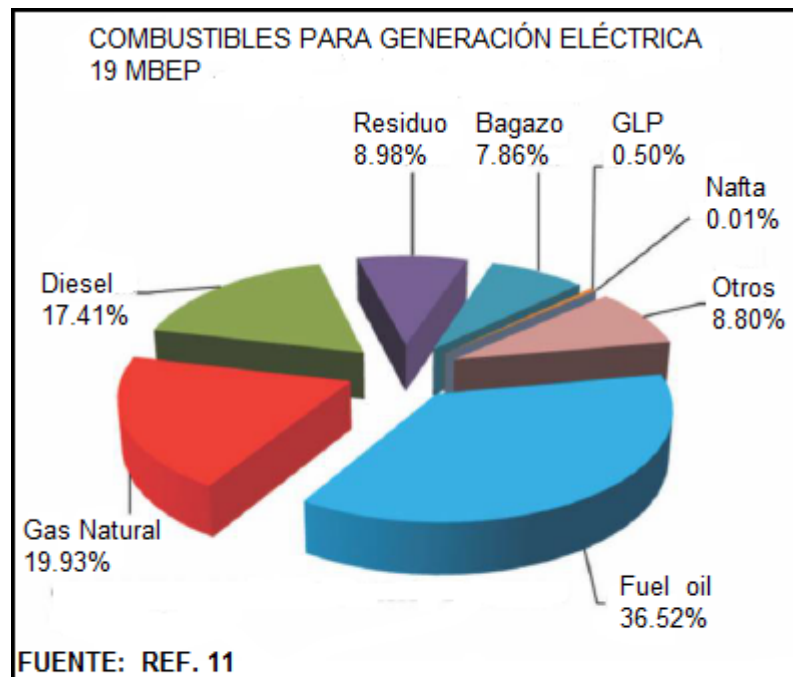


FIGURA 1.2 DEMANDA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN EL ECUADOR (AÑO 2012)

1.3. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales.

Para lograr un sistema de gestión energética sostenible es necesario maximizar la eficiencia en el uso de los recursos energéticos y el manejo preferente de fuentes renovables de energía.

La biomasa desde los orígenes de la humanidad ha sido utilizada como fuente de calor. Su componente energético se origina por la

capacidad de los organismos vivos para transformar la energía solar en materia viva mediante la fotosíntesis la que a su vez puede constituirse como combustibles. Los residuos agroindustriales, agroforestales, animales y los sólidos urbanos (RSU) también son generadores de biomasa.

En el Ecuador se generan aproximadamente 4,056,610 [*Tm/año*] de basura (RSU) a los cuales hay que adicionarles otro tipo de desechos incluidos los desechos agrícolas (Tabla 1), que manejados responsablemente pueden contribuir a la generación de electricidad, la obtención de bio petróleo y a controlar de mejor manera la emisión de contaminantes al medio ambiente.

TABLA 1
RESIDUOS AGRÍCOLAS DEL ECUADOR

<i>Origen</i>	<i>Cantidad [Tm/año]</i>
Cacao	~5,000,000
Maíz duro seco	~501,085
Palma africana	~399,840
Caña para Azúcar	~320,000
Arroz en cáscara	~265,218
Banano	~229,360
Caña para otros uso	~239,056
Papa	~222,725
Maíz suave seco	~136,101
Plátano	~82,742

Fuente: Meer, 2009

1.4. Normativa Ambiental.

En este ítem se presentan las normativas generales y particulares que promueven el uso de Energías Alternativas no convencionales para la generación de electricidad, tanto para su autoconsumo como su contribución en el sistema interconectado.

Normativa General.

Constitución de la República del Ecuador.

Artículo 15.

“El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua.

Se prohíbe el desarrollo, producción, tenencia, comercialización, importación, transporte, almacenamiento y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, de contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos, agroquímicos internacionalmente prohibidos, y las tecnologías y agentes biológicos experimentales nocivos y organismos genéticamente modificados perjudiciales para la salud humana o que atenten contra la soberanía alimentaria o los

ecosistemas, así como la introducción de residuos nucleares y desechos tóxicos al territorio nacional”.

Artículo 413

“El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua”.

Artículo 414

“El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo”.

Normativa Específica.

El Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) mediante la Regulación CONELEC 001/13 establece tarifas preferenciales para

las Generadoras Eléctricas con Energías Renovables no convencionales, al Sector Eléctrico Ecuatoriano (Tabla 2).

TABLA 2
PRECIOS PREFERENTES PARA GENERACIÓN
ELÉCTRICA MEDIANTE EL USO DE ENERGÍAS
RENOVABLES $\left[\frac{\text{c.Us.D}}{\text{kWh}} \right]$

Centrales	Territorio Continental	Territorio Insular
Biomasa	9.67	10.64
Biogás	7.32	8.05

Fuente: Conelec, 2013

1.5. Hipótesis.

Obtener Gas Pobre y Gas de Síntesis a partir de un diseño de termogasificador experimental de lecho fijo capaz de trabajar tanto bajo condiciones de ingreso de aire atmosférico o ingreso de oxígeno como agentes de gasificación utilizando residuos agroindustriales como combustible biomásico y sus posibles aplicaciones en la generación de energía.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1. Proceso de Gasificación.

El Proceso de Gasificación es una de las tecnologías disponibles de conversión termoquímica y tiene como objetivo maximizar la conversión de una materia prima sólida en gases útiles (vectores energéticos). Para lo cual, la materia prima es expuesta a una atmósfera de altas temperaturas y partículas calientes dentro de un reactor, que calientan el combustible conduciéndolo a la descomposición térmica. Adicionalmente, y en contraste con la pirólisis, la biomasa se pone en contacto con un agente de gasificación.

La cual a temperaturas razonablemente altas, entre aproximadamente 800°C y 1400°C, toman lugar las reacciones entre el agente de gasificación y la estructura de carbono sólido

procedente la materia prima suministrada (biomasa), formando óxidos de carbono, hidrocarburos, y agua.

De manera general el término “gas producto” se refiere al producto de las reacciones termoquímicas, mientras que el término “gas pobre” es usado para gases generados en un reactor de gasificación con aire como principal agente de gasificación. Cabe mencionar, que cuando se usa oxígeno o vapor de agua como principal agente de gasificación, el gas producto del reactor de gasificación es llamado “Syngas o Gas de Síntesis” (Ver Ref. 10).

Dependiendo del tipo de reactor, la naturaleza de la biomasa sólida, la composición del agente de gasificación, las temperaturas de reacción y tiempos de residencia, además del flujo de gas a través del gasificador, algo de carbono de la materia prima podría permanecer sin reaccionar y salir del reactor como hollín junto con un residuo carbonizado incompletamente oxidado, además de los minerales oxidados que forman lo que se denominan cenizas sueltas, mientras que las sales minerales fundibles y re-solidificadas forman la escoria de fondo (slag). La tabla 3 enlista los principales constituyentes del gas producto resultante de la gasificación de biomasa.

TABLA 3
PRINCIPALES CONSTITUYENTES DEL GAS PRODUCTO
RESULTANTE DE LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA

Compuestos de interés	$CO, H_2, CH_4, C_2H_x, C_3H_x$
Compuestos inertes (no-combustibles)	CO_2, H_2O, N_2
Contaminantes	NH_3, HCN , y otros compuestos orgánicos de nitrógeno.
	H_2S, COS, CS_2 , y otros compuestos orgánicos de azufre.
	$HCl, NaCl$, y partículas de KCl
Fracción Condensable	Benceno, Tolueno, y Xileno (BTX), alquitrán, hetero-orgánicos, agua.
Partículas	Cenizas, sales minerales, carbonilla, material particulado.

Fuente: Ref.9

Por otra parte, dependiendo de la composición del gas producto deseado es que se puede elegir el agente de gasificación, entre los cuales se tiene: aire, oxígeno puro, vapor de agua, y una mezcla de aire-oxígeno-vapor de agua. Además de éstos también es posible el uso de dióxido de carbono pero éste es muy poco aplicable. En principio, la conversión del carbono en gases también es posible a través de la reacción de los sólidos con el hidrógeno (hidrogasificación) o mezclas de vapor de agua e hidrógeno (hidrogasificación y vapor de agua). Éste último podría ser de

interés si se quiere producir Gas Natural Sintético (SNG) y no hay oxígeno disponible.

El aire es el más común de los agentes de gasificación porque éste es “casi gratis” y está fácilmente disponible. Sin embargo, el uso de aire como agente de gasificación causa la dilución del gas producto con el nitrógeno del aire y potenciar la formación de óxidos de nitrógeno, resultando un gas producto con bajo poder calorífico.

Desde un punto de vista netamente químico las variables más importantes a considerar en el proceso de gasificación como tal son:

- **Contenido de Humedad de la materia prima (M.C.),** éste varía considerablemente dependiendo tanto del tipo de biomasa a utilizar como de su almacenamiento. En algunos casos será necesario secar la biomasa previamente a la combustión y así poder mantenerla. Ya que el incremento del contenido de humedad (M.C.) reducirá la temperatura máxima posible de combustión (Temperatura de Combustión Adiabática), aumentando el tiempo de residencia necesario en la cámara de combustión, dando así menos espacio para la prevención de las emisiones como resultado de la combustión incompleta.

- **Poder Calorífico de la materia prima**, es una característica intrínseca de cada material y relaciona la cantidad de energía que puede ser liberada en forma de calor cuando ésta se somete a una combustión completa. Puede expresarse con dos cantidades:
 - **Poder Calorífico Superior o Bruto (HHV)**: se define como el calor liberado durante la combustión por unidad de masa o volumen de combustible bajo las restricciones que el agua formada durante la combustión está en fase líquida y que el agua y el gas de combustión tienen las mismas temperaturas como la temperatura del combustible antes de la combustión. El poder calorífico superior toma en cuenta el calor latente de vaporización del agua en los productos de combustión, y es útil en el cálculo de los poderes caloríficos para combustibles donde la condensación de los productos de reacción es práctica.

El HHV de combustibles de biomasa usualmente varía entre 18 y 22[MJ/kg(d.b.)] y éste puede ser calculado razonablemente bien, usando la siguiente fórmula empírica (Ver Ref. 8):

$$HHV = 0.3491 \cdot X_C + 1.1783 \cdot X_H + 0.1005 \cdot X_S \\ - 0.0151 \cdot X_N - 0.1034 \cdot X_O - 0.0211 \cdot X_{cenizas} \left[\frac{MJ}{kg(d.b.)} \right]$$

Donde:

X_i = contenido wt%(d.b.) de cada elemento.

Ésta correlación es válida dentro del rango de:

$$0\% < C < 92\%$$

$$0.43\% < H < 25\%$$

$$0\% < O < 50\%$$

$$0\% < N < 5.6\%$$

$$0\% < Cenizas < 71\%$$

$$4.75 \left[\frac{MJ}{kg(d.b.)} \right] < HHV < 55.35 \left[\frac{MJ}{kg(d.b.)} \right]$$

Para una determinación exacta del HHV, se utiliza una bomba calorimétrica y procedimientos estandarizados en la norma ASTM D-2015.

- **Poder Calórico Inferior o Neto (LHV):** se define como el calor liberado durante la combustión por unidad de masa o de volumen de combustible bajo las restricciones que el agua formada durante la combustión se encuentra en una fase gaseosa y que el agua y el gas de combustión tienen la

misma temperatura que el combustible antes de la combustión.

El LHV puede ser calculado a partir del HHV tomando en cuenta el contenido de humedad y de hidrógeno del combustible para aplicar la ecuación (Ver Ref. 8):

$$LHV = HHV \left(1 - \frac{M.C.}{100} \right) - 2.444 \left(\frac{M.C.}{100} \right) - 2.444 \left(\frac{X_H}{100} \right) 8.936 \left(1 - \frac{M.C.}{100} \right) \left[\frac{MJ}{kg(w.b.)} \right]$$

Donde:

$$h_{fg}@25^{\circ}C = 2.444 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

$$\frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} = \frac{18.01534}{2.01594} = 8.936$$

$M.C.$ = Contenido de humedad del combustible en $wt\%(d.b.)$

X_H = Concentración de hidrógeno en $wt\%(d.b.)$

Los valores rectores son (Ver Ref. 8):

- 6.0wt%(d.b.), para combustibles de biomasa leñosa.
- 5.5wt%(d.b.) para combustibles de biomasa herbácea.

A continuación se muestra las características de biomosas seleccionadas (Tabla 4).

TABLA 4

CONTENIDO DE HUMEDAD, PODER CALORÍFICO SUPERIOR (HHV), PODER CALORÍFICO INFERIOR (LHV), DENSIDAD APARENTE Y DENSIDAD DE ENERGÍA DE COMBUSTIBLES DE BIOMASA

<i>Biomasa</i>	<i>M. C.</i> [wt% w. b.]	<i>HHV</i> [$\frac{MJ}{kg d. b.}$]	<i>LHV</i> [$\frac{MJ}{kg w. b.}$]	<i>Densidad Aparente</i> [$\frac{kg w. b.}{m^3}$]	<i>Densidad de energía</i> [MJ/m ³]
Madera peletizada	10.0	19.8	16.4	600	9840
Astillas de madera dura (pre secada)	30.0	19.8	12.2	320	3900
Astillas de madera dura	50.0	19.8	8.0	450	3600
Astillas de madera suave (pre secada)	30.0	19.8	12.2	250	3050
Astillas de madera suave	50.0	19.8	8.0	350	2800
Pasto	18.0	18.4	13.7	200	2740
Corteza de árbol	50.0	20.2	8.2	320	2620
Triticale (cereal)	15.0	18.7	14.5	175	2540
Aserrín	50.0	19.8	8.0	240	1920
Paja (trigo)	15.0	18.7	14.5	120	1740
Residuos de oliva (2 fase de producción)	63.0	21.5	6.1	1130	6890
Residuos de oliva (3 fase de producción)	53.0	22.6	8.5	650	5530

Fuente: Ref. 8

- **Generación de Altas Temperaturas**, ya que los procesos de ruptura de los compuestos orgánicos ocurren a temperaturas superiores a los 900°C .

- **Tiempo de Residencia del gas**, que deben ser menor a 1[S] para que no haya conversión de los vectores energéticos:
 - H_2 en H_2O , ni
 - CO en CO_2 .

2.1.1. Etapas de Gasificación.

Como se mencionó anteriormente, la gasificación es la degradación térmica de combustible sólido (biomasa) en presencia de un agente de gasificación.

Tanto la Gasificación como la Combustión son dos procesos termoquímicos estrechamente relacionados, pero con una importante diferencia entre ellos. La Gasificación guarda energía en los enlaces químicos del gas producto; y la Combustión rompe esos enlaces para liberar esa energía. El proceso de gasificación incrementa el hidrógeno y descompone el carbono de la materia prima para producir gases con una tasa más alta de hidrógeno-carbono, mientras que la combustión oxida el hidrógeno y el carbono, en agua y dióxido de carbono, respectivamente.

Un típico proceso de gasificación de biomasa generalmente sigue la secuencia mostrada en la figura 2.1.

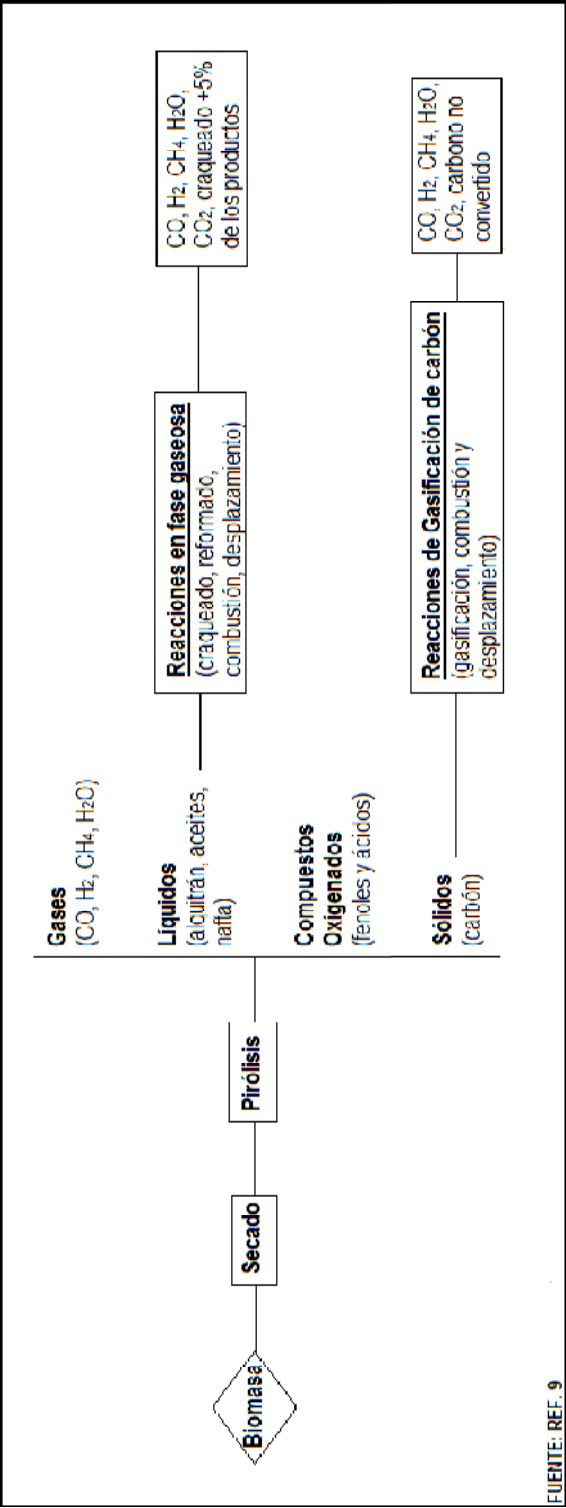


FIGURA 2.1 POSIBLES CAMINOS DE LA TERMOGASIFICACIÓN

- Precalentamiento y Secado.
- Pirólisis.
- Gasificación de residuos carbonizados y reacciones entre sí de algunos de los productos de esta gasificación (Reacciones Primarias y Reacciones Secundarias).
- Combustión.

Aunque estos pasos se modelan con frecuencia en serie, no hay límite claro entre ellos, y se superponen.

Los siguientes párrafos discuten estas fases de la gasificación de biomasa.

Secado

Debido a que el contenido de humedad típico de la madera recién cortada oscila entre 30 y 60%, y para algunas biomásas puede exceder el 90% (véase la tabla 4 y tabla 5)

TABLA 5

CONTENIDO DE HUMEDAD (M.C.) REFERENCIALES DE ALGUNAS BIOMÁSAS SÓLIDAS

Biomosas	Tallos de maíz	Paja de trigo	Paja de arroz	Cáscara de arroz (secada)	Corteza de madera	Aserrín	Residuos de alimentos	RDF aglomerado	Jacinto de agua
M.C. (<i>wt%</i> <i>w. b.</i>)	~40% al ~60%	~8% al ~20%	~50% al ~80%	~7% al ~10%	~30% al ~60%	~25% al ~55%	~70%	~25% al ~35%	~95.3%

Fuente: Ref. 9

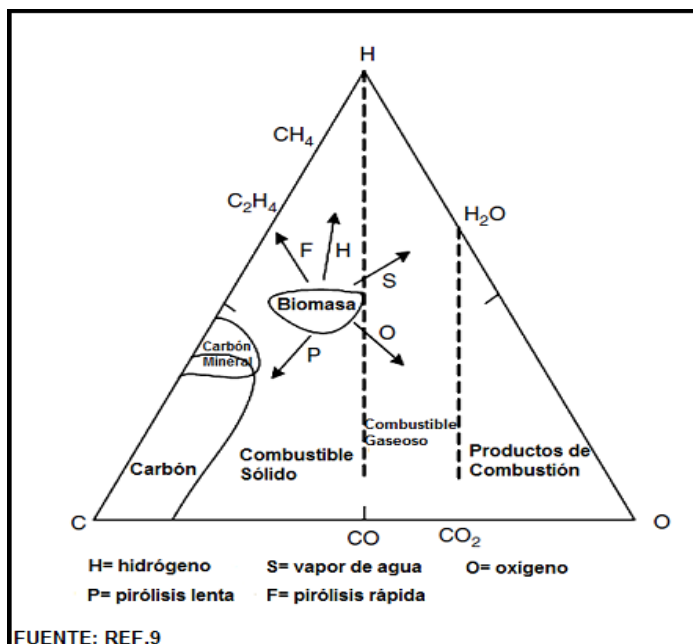
Cada kilogramo de humedad en la biomasa quita un mínimo de $2260[kJ]$ de energía extra del gasificador para evaporar el agua, y esa energía no es recuperable (Ver Ref. 8). Para un nivel alto de humedad esta pérdida es una preocupación, especialmente para aplicaciones energéticas. Si bien no se puede hacer mucho acerca de la humedad inherente que reside dentro de la estructura de la célula, se pueden hacer esfuerzos para alejar la humedad externa o de superficie. Una cierta cantidad de pre secado es por lo tanto necesaria para eliminar la mayor cantidad de humedad de la biomasa como sea posible antes de que se alimente al gasificador. Para la producción de un gas combustible con un poder calorífico “razonablemente alto”, la mayoría de los sistemas de gasificación usan biomasa seca con un contenido de humedad del 10 al 20%.

El secado final se lleva a cabo después que la materia prima entra en el gasificador, donde recibe calor de la zona a mayor temperatura límite. Este calor seca la biomasa, la cual libera agua. Por encima de 100°C , el agua unida débilmente que está en la biomasa se elimina de forma irreversible. A medida que la temperatura aumenta, los extractos de bajo peso molecular comienzan a volatilizarse. Este proceso continúa hasta una temperatura aproximadamente de 200°C .

Pirólisis

La pirólisis es la etapa que precede a la gasificación y que involucra una degradación térmica del combustible en ausencia de un agente de oxidación suministrado externamente. Sus principales productos son: alquitrán, residuos carbonaceos, y gases de bajo peso molecular (condensables y no condensables). Adicionalmente, el monóxido y dióxido de carbono pueden ser formados en cantidades considerables, especialmente de materia prima rica en oxígeno, como la biomasa. El tipo de combustible, temperatura, presión, tasa de calentamiento y tiempo de reacción son todas las variables que afectan la cantidad y las propiedades de los productos formados.

En un proceso de pirólisis lenta, el producto sólido se mueve hacia la esquina de carbono del diagrama ternario, y se forma más material carbonizado (carbón). En la pirólisis rápida, el proceso se mueve hacia el eje C-H opuesto a la esquina de oxígeno (Figura 2.2). El oxígeno se reduce en gran medida, y por lo tanto se espera mayor hidrocarburo líquido.



FUENTE: REF.9

FIGURA 2.2 DIAGRAMA TERNARIO C-H-O PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN

Un producto importante de la pirólisis es el alquitrán (tar) siendo esta una mezcla negra de hidrocarburos y otras materias orgánicas formadas de la condensación del vapor producido durante el proceso. Al ser un líquido pegajoso, el alquitrán crea una gran cantidad de dificultades en el uso industrial del producto de la gasificación. Siendo inclusive considerado una sustancia carcinogénica (puede inducir cáncer en humanos y animales).

Reacciones de Gasificación de material carbonizado.

La etapa que sigue a la pirólisis implica reacciones químicas entre los hidrocarburos del combustible, vapor de agua, dióxido de

carbono, oxígeno, e hidrógeno, así como de las reacciones químicas entre los gases desprendidos. De éstos, la gasificación del material residual carbonizado es la más importante. Y consiste básicamente en reacciones de oxidación del carbón producido a través de la pirólisis que no necesariamente es carbono puro. Ya que contiene una cierta cantidad de hidrocarburos que comprenden hidrógeno y oxígeno. Éstas reacciones se llevan a cabo en un rango de temperatura que van desde los $\sim 800^{\circ}\text{C}$ a $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ con los agentes de gasificación.

Una característica del carbón de biomasa es que generalmente éste es más poroso y reactivo que el coque. Su porosidad está en el intervalo de 40% al 50% mientras que la del carbón mineral es de 2% al 18%. Los poros del carbón de biomasa son mucho más grandes ($20 - 30[\mu\text{m}]$) que las de carbón mineral ($\sim 5[\text{\AA}]$). Por lo tanto, su comportamiento de reacción es diferente de la del material residual carbonizado derivado del carbón mineral, lignito (carbón producido a partir de la turba) o de turba (primera etapa de transformación del carbón mineral). Por ejemplo, la reactividad del carbón de turba disminuye con la conversión a carbón residual o el tiempo, mientras que la reactividad del carbón de biomasa aumenta con la conversión a carbón residual (Figura 2.3).

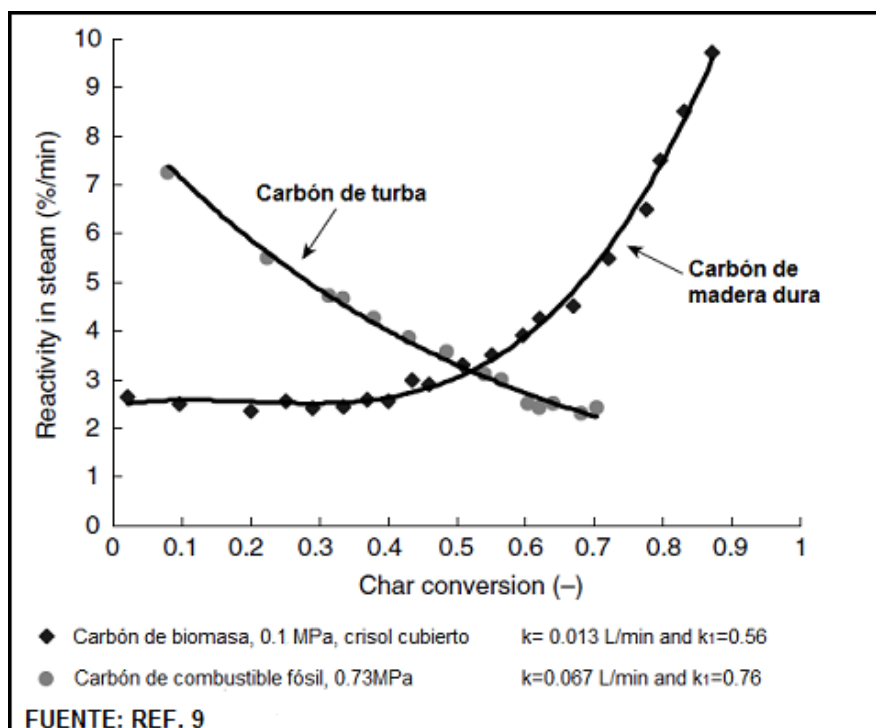


FIGURA 2.3 REACTIVIDAD DE BIOMASA VERSUS CONVERSIÓN EN CARBÓN RESIDUAL USANDO VAPOR DE AGUA COMO AGENTE DE GASIFICACIÓN

Esta tendencia inversa se puede atribuir al aumento de la actividad catalítica de los compuestos alcalinos de la biomasa carbonizada. Por otra parte, dependiendo del principio de gasificación aplicado (Figura 2.4), las reacciones de gasificación pueden ser generalmente de tipo endotérmicas, y algunas de ellas pueden ser también exotérmicas (Tabla 6). Y de éstas a la vez dependerá en gran manera la composición del gas producto obtenido al final del proceso.

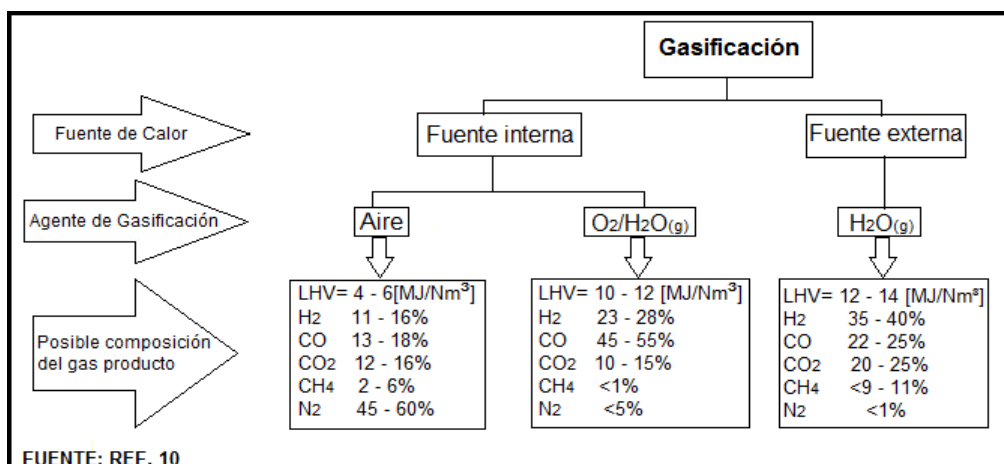


FIGURA 2.4 COMPOSICIÓN DEL GAS PRODUCTO EN DIFERENTES ATMÓSFERAS DE GASIFICACIÓN

TABLA 6
REACCIONES DE GASIFICACIÓN TÍPICAS A 25°C

Tipo de Reacción	Reacción
Reacciones del Carbono	
R_1 (Boudourd)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172[kJ/mol]$
R_2 (agua – gas o vapor)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131[kJ/mol]$
R_3 (hidrogasificación)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8[kJ/mol]$
R_4	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO - 111[kJ/mol]$
Reacciones de Oxidación	
R_5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394[kJ/mol]$
R_6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284[kJ/mol]$
R_7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803[kJ/mol]$
R_8	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O - 242[kJ/mol]$
Reacción de Desplazamiento	
R_9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2[kJ/mol]$
Reacciones de Metanización	
R_{10}	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247[kJ/mol]$

R_{11}	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206[kJ/mol]$
R_{14}	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165[kJ/mol]$
Reacciones de Reformado con vapor	
R_{12}	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206[kJ/mol]$
R_{13}	$CH_4 + 0.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36[kJ/mol]$

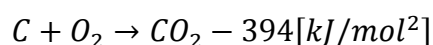
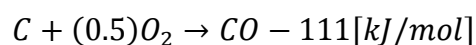
Fuente: Ref. 9

Reacciones de Combustión de material residual carbonizado.

La combustión puede idealmente ser definida como una oxidación completa del combustible, en el que el secado y la pirólisis/gasificación siempre serán los primeros pasos en los procesos de combustión de combustibles sólidos.

Para proporcionar el calor necesario para las reacciones, así como, el requerido para el calentamiento, el secado, y el pirolizado, una cierta cantidad de reacciones exotérmicas son permitidas dentro del gasificador.

Teniendo en cuenta que cuando el carbono entra en contacto con el oxígeno, las principales reacciones que pueden tener lugar son:



Las reacciones de combustión son generalmente más rápidas que las reacciones de gasificación bajo condiciones similares. La Tabla

7 compara la velocidad de combustión y gasificación para carbón a una temperatura típica del gasificador de 900°C. Las tasas (rapidez) de combustión son al menos de orden de magnitud uno más rápido que la velocidad de reacción de gasificación. Debido a la resistencia a la difusión de poros, las partículas de carbonilla más finas tienen una velocidad de reacción mucho mayor.

TABLA 7
COMPARACIÓN DEL EFECTO DE DIFUSIÓN DE POROS EN LA
GASIFICACIÓN DE CARBÓN Y LAS VELOCIDADES DE
COMBUSTIÓN

Tamaño de Partículas [μm]	Velocidad de Combustión [min^{-1}]	Velocidad de Gasificación [min^{-1}]	Velocidad de Combustión/Velocidad de Gasificación (-)
6350	0.648	0.042	15.4
841	5.04	0.317	15.9
74	55.9	0.975	57.3

Fuente: Ref. 9

2.1.2. Tipos de Gasificadores.

Desde un punto de vista técnico el gasificador es un equipo en el cual un combustible sólido es transformado en un combustible gaseoso, usualmente sin la utilización de una fuente de calor artificial externa.

Es deseable que esta transformación tenga lugar con la menor pérdida del contenido energético del combustible como sea posible.

Por otro lado, desde el punto de vista de su uso, el gasificador ideal debe ser adecuado para todos los combustibles y por lo tanto sea de uso universal. Se han hecho intentos para diseñar tales gasificadores, pero los resultados no han sido satisfactorios para los combustibles específicamente distintos unos de otros.

Esto es debido al hecho de que el combustible usado para la gasificación puede ser clasificado en dos categorías principales:

- **Combustibles “libre de alquitrán”**, por ejemplo: carbón vegetal y coque.
- **Combustibles emisores de alquitrán**, por ejemplo: madera, turba, y en cierta medida, el carbón vegetal incompletamente carbonizado.

Un gasificador que va a operar con combustible (biomasa) “libre de alquitrán” es principalmente sólo un espacio en el que se la quema hasta CO_2 con una inmediata reducción de CO_2 a CO por acción de la biomasa incandescente. Por otra parte, un gasificador que va a operar con combustible (biomasa) emisor de alquitrán debe contener no sólo el espacio de combustión-reducción que se acaba de mencionar, sino, además, un espacio en el que el combustible básico se seca y se piroliza a través del calentamiento de la

biomasa que se alimenta continuamente y es adecuado para combustión. Además, la combustión debe tener lugar bajo condiciones tales que los alquitranes volátiles creados en el contenedor del combustible (biomasa) pueden ser utilizados al ser neutralizados durante su paso por la zona de combustión.

Los equipos que más suelen aplicarse para la combustión y gasificación de biomasa sólida son:

- De Lecho fijo;
- De Lecho fluidizado;
- De Flujo arrastrado.

Gasificadores de Lecho Fijo.

Los Gasificadores de Lecho Fijo fueron el primer tipo de gasificador utilizado. Se originaron a principios de 1800. En esa época la biomasa era la principal fuente de energía. Los primeros usos del gas obtenido eran para la iluminación. Las primeras fábricas de gas utilizaban la biomasa como materia prima combustible antes de que la cambiaran al carbón mineral. A partir de finales de 1930, por cerca de una década los gasificadores fueron utilizados en la producción de gas para alimentar automóviles, sobre todo con la escasez de petróleo durante la guerra, haciendo que muchos

fabricantes desarrollarán gasificadores de lecho fijo para aplicaciones de transporte.

Los tipos básicos de gasificadores de lecho fijo, incluyen:

- De corriente o tiro ascendente - updraft (Figura 2.5).

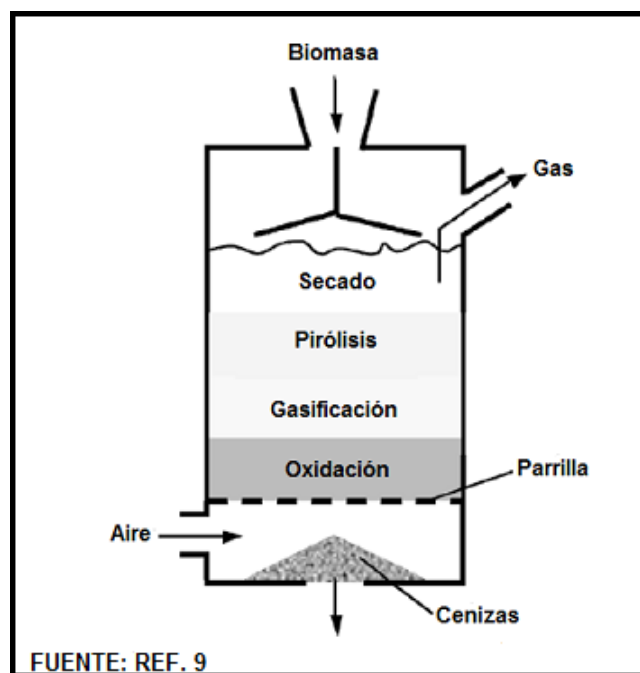


FIGURA 2.5 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE FLUJO ASCENDENTE

- De corriente o tiro descendente – downdraft (Figura 2.6).

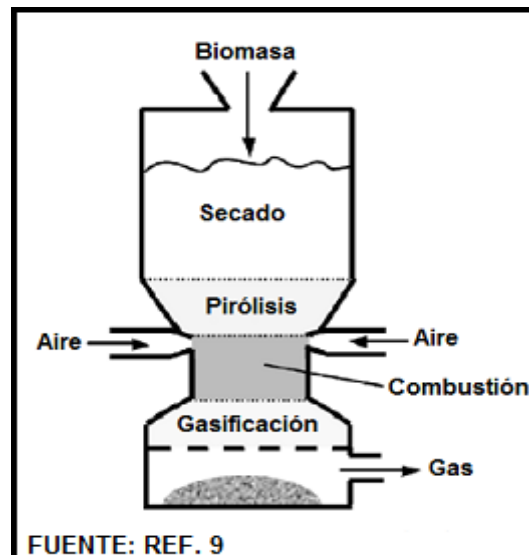


FIGURA 2.6 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE FLUJO DESCENDENTE

- De corriente o tiro cruzado – crossdraft (Figura 2.7).

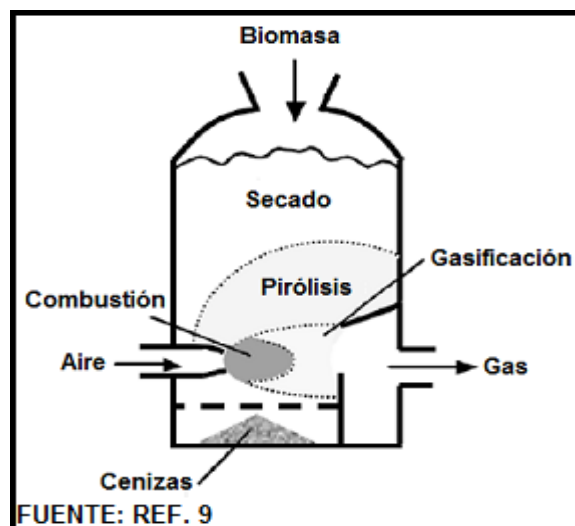


FIGURA 2.7 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE FLUJO CRUZADO

En un gasificador de lecho fijo, el lecho de combustible sólido se mueve lentamente hacia abajo. Una característica de este tipo de gasificador es la formación de cuatro zonas (secado, pirolisis, oxidación, y reducción). Los reactores pueden ser operados como gasificador de corriente ascendente o descendente en función de la ubicación del punto de alimentación del agente de gasificación.

Entre las principales diferencias entre uno y otro gasificador de lecho fijo están: las limitadas posibilidades de expansión de los gasificadores de corriente descendente y el alto contenido de alquitrán del gas producto de los gasificadores de corriente ascendente. Un gasificador de flujo cruzado combina ambos principios mientras que los nuevos sistemas de gasificación por etapas (Figura 2.8) separan la zona de pirolisis (donde se forman los precursores de alquitrán), de la zona de combustión parcial y la zona de reducción en caliente, lo que lleva a la notable reducción del contenido de alquitrán en el gas producto.

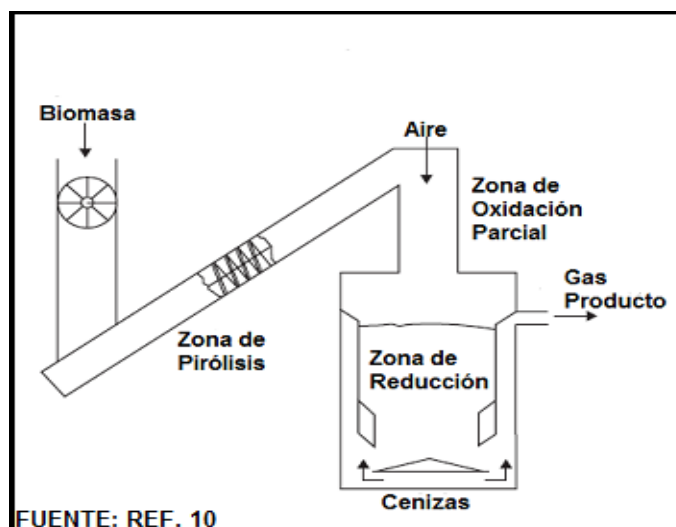


FIGURA 2.8 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE DOS ETAPAS

Gasificadores de Lecho Fluidizado (Fluidized-Bed Reactor).

El principio de la fluidificación fue reportada por primera vez a principios de 1920 por Winkler y se ha utilizado para la gasificación desde entonces.

Los lechos fluidizados tienen las ventajas de una buena distribución de la temperatura, y las altas tasas de transferencia de masa y calor. Los Sistemas de Gasificación de Lecho Fluidizado se usan comúnmente a partir de media a gran escala.

El desgaste del lecho de los materiales, junto con el arrastre del producto de carbonización sin reaccionar y compuestos de minerales de la materia prima (ceniza) a menudo conduce a altas concentraciones de diversas partículas sólidas en el gas producto, que necesitan ser tomadas en cuenta para utilización del gas en

procesos posteriores a la gasificación. Los grandes reactores de lecho fluidizado pueden funcionar como reactores de lecho fluidizado circulante (Circulating Fluidized-Bed Gasifier) aumentando así la conversión de los sólidos.

Debido a las propiedades de líquidos de los lechos fluidizados, los materiales del lecho reactivo adicionales, los portadores de calor, u otros materiales funcionales, pueden ser mezclados con los materiales del lecho. Además, es posible combinar dos reactores de lecho fluidizado, por ejemplo, para usar y regenerar materiales de lecho activo para la transferencia de oxígeno en el gasificador (proceso de donantes de oxígeno) o para eliminar el dióxido de carbono del gasificador (captura de carbono), o en el Reformado Mejorado por Absorción o Adsorción (AER / SER). Tales combinaciones se conocen como lechos fluidizados duales (Dual Fluidized-Beds). La figura 2.9 muestra el principio de los sistemas típicos de reactores de lecho fluidizado.

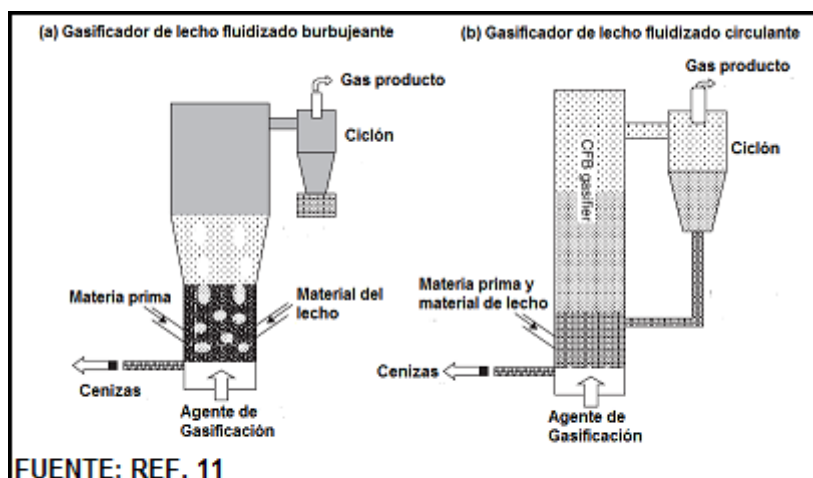


FIGURA 2.9 ESQUEMA DE GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO

Gasificadores de Flujo Arrastrado (Entrained-Flow Reactor).

El tercer tipo de reactor básico que se utiliza para la gasificación de biomasa es el reactor de flujo arrastrado. En éste las partículas de biomasa muy finas (pulverizadas) son gasificadas en un flujo de oxígeno o una mezcla de oxígeno y vapor de agua. Las finas partículas de biomasa pueden ser producidas por molienda, la cual puede ser muy demandante de energía. Una alternativa de molienda directa para producir partículas finas de biomasa es la pirolisis/torrefacción seguida de la posterior molienda, que actualmente es muy popular debido a su menor consumo de energía.

La gasificación casi completa se logra a muy altas temperaturas de 1100 – 1400°C y a altas velocidades de flujo de gas. Los compuestos minerales en el combustible se derriten y forman una capa líquida de escoria que fluye hacia abajo y que protege el material de la pared de la alta temperatura. Además de los altos índices de conversión de sólidos, otra ventaja de los gasificadores de flujo arrastrado es el alto grado de conversión de la materia prima. Los gasificadores de flujo arrastrado producen un gas producto más o menos libres de alquitrán. Para evitar pérdidas por calor excesivo y la reducción de la eficiencia, las instalaciones tienden a ser grandes. Halladas más a menudo combinadas con la utilización de gas de síntesis, ya que pueden ser operadas a elevadas presiones. La figura 2.10 muestra un ejemplo de un gasificador de tipo Entrained-Flow.

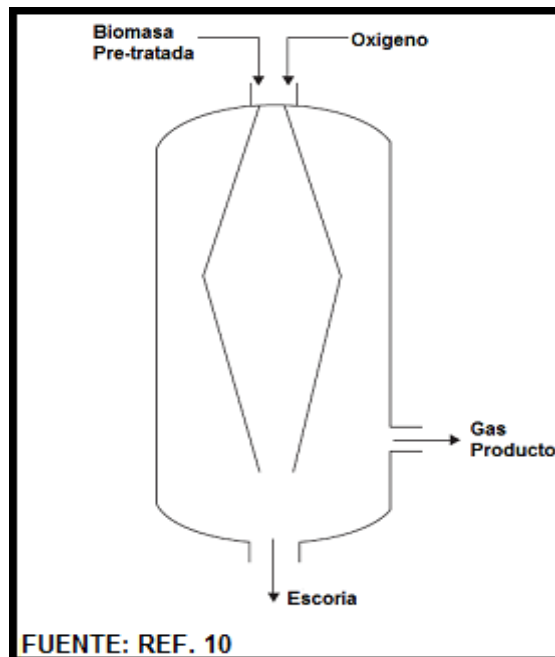


FIGURA 2.10 GASIFICADOR DE TIPO ENTRAINED-FLOW

2.1.3. Partes principales de un Gasificador.

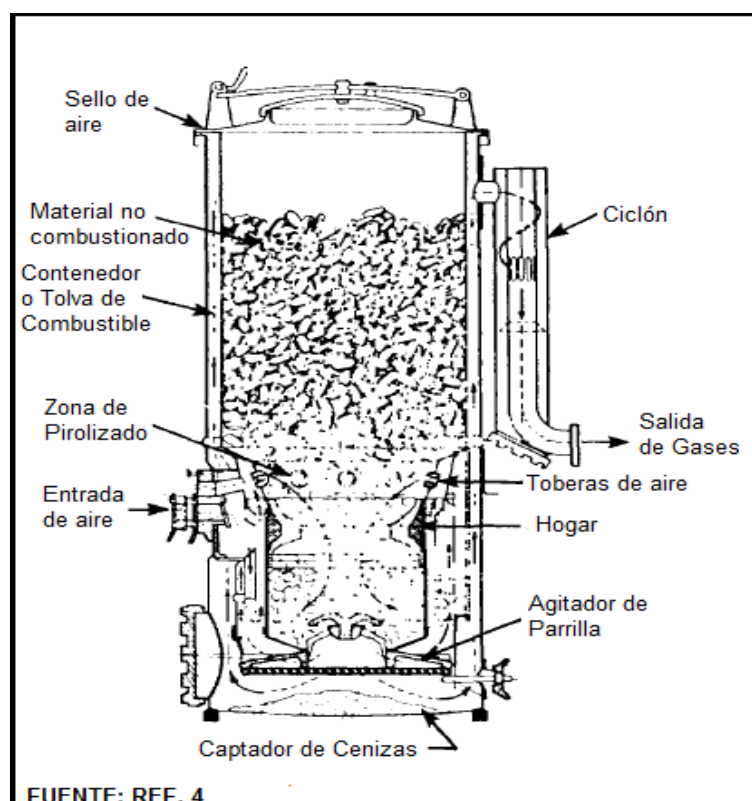
Contenedor o Tolva de Combustible (Biomasa).

Es la parte cilíndrica de mayor altura que posee un gasificador de lecho fijo (Figura 2.11) y donde está contenida la mayor parte de la materia prima que va disminuyendo a medida que se va reduciendo por efecto de la combustión en el interior del hogar. El tamaño del “contenedor o tolva de combustible” es el que usualmente determina el peso del gasificador.

El interior del contenedor o tolva de combustible, incluyendo la tapa, está en contacto con los gases generados. Estos gases contienen

ácidos, particularmente ácido acético, por lo que la superficie interior debe estar hecha de un material que no se corroa fácilmente y se destruya rápidamente por estos ácidos.

Si el contenedor de combustible está equipado con un compartimiento para condensación, la parte más baja del compartimiento no debería estar separada del interior del contenedor por paredes gruesas, así previniendo la circulación del gas entre el espacio para el combustible y el compartimiento para el condensado.



FUENTE: REF. 4

FIGURA 2.11 ESQUEMA DEL CONTENEDOR O TOLVA DE MATERIAL DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE FLUJO ASCENDENTE

Hogar.

Durante la operación, la biomasa es gradualmente secada y ésta se mueve lentamente hacia abajo desde el contenedor o tolva de combustible hacia el hogar, pasando primero a través del área de oxidación que generalmente tiene forma cilíndrica, luego hacia un área de transición cónica, donde tiene lugar la carbonización. En la zona de oxidación o combustión, varias toberas de aire son usualmente dirigidas radialmente hacia el centro desde una cámara en forma de anillo. El hogar real empieza con esta zona, la cual es reducida debajo de la toma de aire con lo que se consigue una temperatura suficientemente alta para la combustión total y el craqueado de los gases de alquitrán. Más allá de la constricción, frecuentemente hay una expansión a través de la cual la parte inferior del hogar se convierte en forma de reloj de arena.

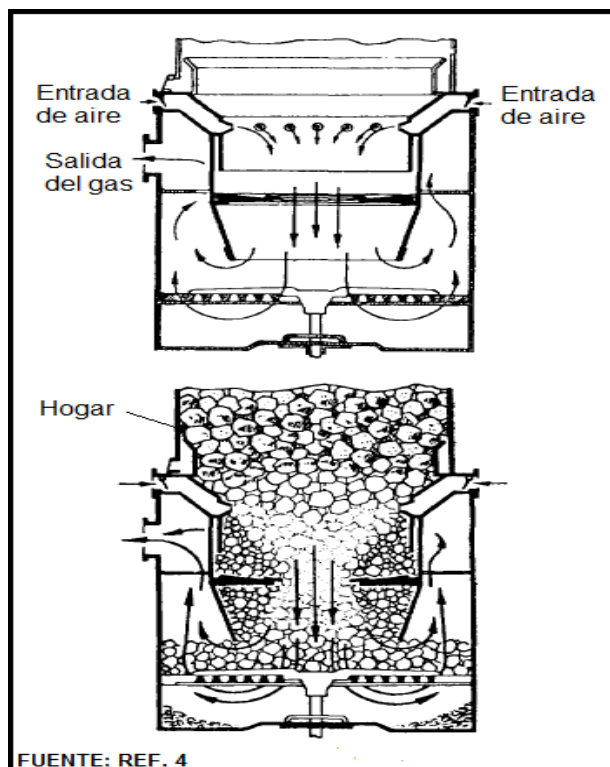
El tramo cónico para el paso de la biomasa, que se estrecha hacia abajo, es importante para el funcionamiento del gasificador, ya que aquí tiene lugar una carbonización rápida en un volumen relativamente pequeño debido a la alta temperatura cercana a la zona de oxidación. Idealmente, la carbonización debe seguir el ritmo de consumo de combustible, por lo que la cantidad de carbón preparado en el gasificador permanece “casi constante”; bajo tales

condiciones, el lecho de biomasa no necesita ser abastecido o reducido durante un funcionamiento prolongado. Mediante la selección de un ángulo de cono adecuada la reducción de la sección transversal del embudo de carbonización corresponde a la reducción de volumen durante la carbonización, y el combustible es solo carbonizado hasta cuando entra a la zona de oxidación, pero no se carboniza en una etapa demasiado temprana al paso del combustible; esto es lo más importante para la calidad del gas.

Como se mencionó anteriormente, los procesos de oxidación y reducción se realizan en el hogar. En la zona de oxidación o, como se le llama frecuentemente, la zona de combustión (Figura 2.12), los gases combustibles y parte del carbón producido se queman con el aire primario. Además, la descomposición de los gases de destilación tiene lugar en la zona de combustión y requieren de una alta temperatura, la cual es obtenida mediante la intensificación de la combustión en el tramo más reducido del hogar en la parte inferior de la zona de combustión. Lo más común de la reducción de sección transversal, es el mayor aumento de la temperatura, dentro de ciertos límites; Por lo que, la tendencia es la de hacer la abertura relativamente pequeña. Esto, por otro lado, crea una mayor resistencia al flujo en el hogar con una caída de presión posterior, lo

que disminuye la eficiencia cuando se habla de gasificadores acoplados a motores.

Por consiguiente, el problema a ser resuelto por el diseñador es hacer el área mínima de paso del hogar tan grande como sea posible sin permitir que la temperatura en cualquier parte de la abertura de paso caiga por debajo del valor necesario para la descomposición satisfactoria. Para este fin, es necesario reducir al mínimo la emisión de calor desde el hogar hacia el exterior; Por lo tanto, es desventajoso utilizar la pared del hogar como una pared interior en un anillo revestido en la cual el aire primario es precalentado, debido a que el calor necesario para esto debe ser tomado de la zona de combustión.



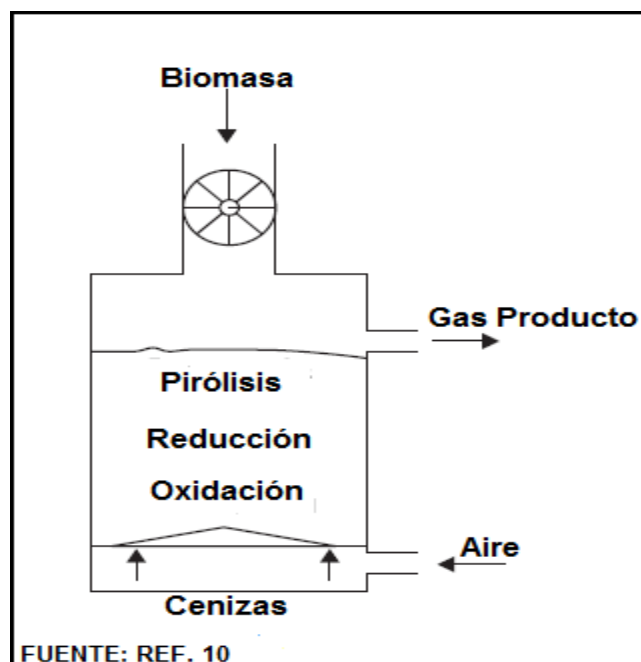
FUENTE: REF. 4

FIGURA 2.12 ESQUEMA DEL HOGAR DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE FLUJO DESCENDENTE

2.2. Gasificador de Flujo Ascendente (Updraft)

Un Gasificador de Flujo Ascendente (updraft) es uno de los diseños más antiguos, simples y comunes de todos los tipos de gasificadores para biomasa. Aquí, el agente de gasificación (aire, oxígeno, o vapor de agua) viaja hacia arriba mientras que el lecho de combustible (biomasa) se mueve hacia abajo a medida que ocurre la combustión, por lo tanto el gas generado y los sólidos están en viajando en sentidos opuestos. La temperatura máxima aumenta cuando la alimentación de aire o de oxígeno aumenta. Por

lo tanto, la cantidad de oxígeno que ingresa durante la reacción de combustión se controla cuidadosamente de tal manera que la temperatura de la zona de combustión no alcance la temperatura de formación de escoria de la ceniza, causando problemas operacionales. El gas producto sale del gasificador por la parte superior del mismo como se muestra en la figura 2.13.



FUENTE: REF. 10

FIGURA 2.13 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE FLUJO ASCENDENTE

El agente de gasificación entra al lecho a través de una parrilla o distribuidor, donde éste se encuentra con el lecho caliente de cenizas. Las cenizas caen a través de la parrilla, la cual en algunas ocasiones está hecha de tal manera que pueda moverse (por

rotación o movimiento recíprocante), especialmente en las unidades grandes para facilitar su descarga.

Los gasificadores de tiro ascendente (updraft) son adecuados cuando se tiene biomasa que genera gran cantidad de cenizas ($> 25\%$), y que contengan una alta humedad ($> 60\%$). Además también son adecuados para combustibles de baja volatilidad, tal como es el caso del carbón de madera.

Debido a que la producción de alquitrán es muy alta ($30 - 150 \left[\frac{g}{nm^3} \right]$) en un gasificador de tiro ascendente, lo hace inadecuado para combustibles con alta volatilidad. Por otra parte, como una unidad contracorriente, un gasificador de tiro ascendente utiliza el calor de combustión muy eficazmente y alcanza una alta eficiencia de gas frío. Por tal motivo, éste tipo de gasificador es muy adecuado para quema directa, donde el gas producido es quemado en un horno o un caldero sin necesidad de limpiarlo o enfriarlo.

Los gasificadores de tiro ascendente se los encuentra en pequeñas unidades de uso comercial como cocinas en aldeas y grandes unidades como la de South African Synthetic Oils (SASOL) para la producción de gasolina a partir de carbón mineral.

La carga del hogar de un gasificador de flujo ascendente está generalmente limitada a $2.8 \left[\frac{MW}{m^2} \right]$ o $150 \left[\frac{kg}{m^2 \cdot hr} \right]$ cuando se utiliza biomasa. Para carbón mineral ésta puede ser mucho mayor. Por ejemplo en un gasificador de carbón mineral con uso de oxígeno como agente de gasificación, la carga del hogar del lecho puede ser mayor de $10 \left[\frac{MW}{m^2} \right]$. Una carga del hogar mucho mayor aumenta la velocidad superficial del gas a través del hogar, fluidizando partículas mucho más finas en el lecho (Ver Ref. 9).

Para un gasificador de tiro ascendente, la altura del lecho es mayor que su diámetro. Por lo general, la relación es mayor de 3:1 entre la altura y su diámetro. Si el diámetro de un lecho es demasiado grande, puede haber problema en el flujo de material, por lo que debe limitarse de 3 a 4 m de diámetro (Ver Ref. 9).

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE COMPONENTES DEL GASIFICADOR EXPERIMENTAL.

El diseño de un gasificador implica tanto el proceso químico como tal, así como la tecnología y equipos a utilizar. El diseño del proceso da el tipo y el rendimiento del producto, las condiciones de funcionamiento, y el tamaño básico del reactor. El diseño del equipo implica componentes estructurales y mecánicos, tales como la parrilla, el cuerpo principal del reactor, aislamiento, sistemas de limpiezas y enfriamiento para gases, y otros, que son específicos para cada tipo de reactor. En este capítulo se centrará en el diseño integral del gasificador.

3.1. Parámetros de diseño.

Especificaciones del Diseño.

Para cualquier diseño, la especificación de la planta es muy importante. Los parámetros de entrada incluyen:

- a. **Especificación del agente de gasificación** (Basada en la selección de vapor de agua, oxígeno y/o aire como atmósfera para la gasificación así como también sus propiedades).
- b. **Especificación del combustible** (Incluirá Análisis Proximal y Elemental, Temperatura de operación, y propiedades de cenizas).
- c. **Especificación del gas producto** (Basada en la selección aproximada del poder calorífico que se desea alcanzar a través de la gasificación dependiendo directamente del tipo de atmósfera de gasificación)

a. **Especificación del Agente de Gasificación.**

TABLA 8

ESPECIFICACIONES DEL AGENTE DE GASIFICACIÓN

Agente de Gasificación:	Aire Atmosférico
Temperatura [°C]:	~28
Densidad [kg/m^3]	~1.172
Presión Atmosférica [kPa]:	~100.8
Humedad Relativa [%]:	~72
Humedad Absoluta [%]	~2

TABLA 9
ANÁLISIS PROXIMAL Y ELEMENTAL EN BASE HÚMEDA DE BIOMASAS
SELECCIONADAS COMO COMBUSTIBLES PARA EL PROYECTO

Combustibles	Análisis Proximal (<i>wt% wet basis</i>)				Análisis Elemental (<i>wt% wet basis</i>)				
	Humedad	Carbón Volátil	Carbón Fijo	Cenizas	C	H	O	N	S
RSU (materia orgánica pre tratada)	4.66	82.02	0.74	12.58	34.16	4.36	38.76	4.97	0.52
RSU (plástico residual pre tratada)	5.49	90.68	-	3.83	75.73	8.18	2.38	3.54	0.85
RSU (papel residual pre tratada)	1.72	79.07	1.71	17.50	31.39	4.19	40.75	4.05	0.40
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera con sal carbonizado en tierra	3.62	27.23	46.65	22.50	51.78	2.57	18.89	0.40	0.23
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera sin sal carbonizado en tierra	3.61	34.29	48.92	13.18	60.71	3.48	18.05	0.69	0.29

b. Especificación del Combustible Biomásico.

TABLA 10
ANÁLISIS ELEMENTAL EN BASE SECA DE BIOMASAS
SELECCIONADAS COMO COMBUSTIBLES PARA EL PROYECTO

Combustibles	Análisis Elemental (<i>wt% dry</i>)				
	C	H	O	N	S
RSU (materia orgánica pre tratada)	36.09	4.60	40.94	5.24	0.55
RSU (plástico residual pre tratado)	80.31	8.67	2.53	3.75	0.90
RSU (papel residual pre tratado)	32.06	4.28	41.61	4.13	0.41
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera con sal carbonizado en tierra	54.31	2.70	19.82	0.42	0.25
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera sin sal carbonizado en tierra	63.34	3.63	18.83	0.72	0.30

TABLA 11
ANÁLISIS ELEMENTAL EN BASE SECA LIBRE DE CENIZAS DE
BIOMASAS SELECCIONADAS COMO COMBUSTIBLES PARA EL
PROYECTO

Combustibles	Análisis Elemental (<i>wt% daf</i>)				
	C	H	O	N	S
RSU (materia orgánica pre tratada)	40.39	5.15	45.82	5.87	0.61
RSU (plástico residual pre tratado)	83.51	9.02	2.63	3.90	0.94
RSU (papel residual pre tratado)	38.02	5.08	49.35	4.90	0.49
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera con sal carbonizado en tierra	68.57	3.41	25.02	0.53	0.31
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera sin sal carbonizado en tierra	71.38	4.09	21.22	0.81	0.34

TABLA 12
PODERES CALORÍFICOS DE BIOMASAS SELECCIONADAS PARA
EL PROYECTO

Combustible	Fórmula empírica en Base Húmeda	$LHV_{w.b}$ [MJ/kg]	$HHV_{w.b}$ [MJ/kg]	$LHV_{d.b}$ [MJ/kg]	$HHV_{d.b}$ [MJ/kg]
RSU (Materia Orgánica pre tratada)	$CH_{1.53}O_{0.85}N_{0.13}S_{0.007}$	14.51	15.58	15.34	16.34
RSU (Plástico Residual pre tratado)	$CH_{1.30}O_{0.02}N_{0.04}S_{0.005}$	37.66	39.58	39.99	41.88
RSU (Papel Residual pre tratado)	$CH_{1.60}O_{0.97}N_{0.11}S_{0.004}$	14.99	15.95	15.30	16.23
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera con sal carbonizado en tierra	$CH_{0.59}O_{0.27}N_{0.007}S_{0.002}$	25.12	25.78	26.16	26.75
Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera sin sal carbonizado en tierra	$CH_{0.69}O_{0.22}N_{0.01}S_{0.002}$	26.15	27.00	27.22	28.01

Ver en el Apéndice B los resultados de los Análisis Elementales y Proximales de las biomasas usadas para el proyecto. Por otra parte, el pre tratamiento que se hizo a los RSU (materia orgánica, papel residual y plástico residual) incluyen clasificación, secado, y triturado según la Norma NT ENVIR 001 (Solid waste, municipal: Sampling and Characterisation), recomendada para muestrear residuos sólidos.

En resumen el combustible biomásico principal va hacer “Carbón a partir de cuesco húmedo de palma aceitera” cuyo proceso de extracción de aceite se lo realizó con sales y su proceso de carbonización se lo hizo en tierra directamente, es decir de forma artesanal.

c. Especificación del Gas Producto.

Poder Calorífico deseado del gas producto está vinculado con la elección del Agente de Gasificación. Por motivo de cálculo se va a estimar un poder calorífico inferior para el gas producto obtenido de $4[MJ/Nm^3]$ según la tabla 13. El cuál se corrobora al final del proyecto con un análisis de gases.

TABLA 13
RANGO DEL LHV DEL GAS PRODUCTO SEGÚN EL
AGENTE DE GASIFICACIÓN SELECCIONADO

Agente de Gasificación	Rango del LHV $[MJ/Nm^3]$
Gasificación con aire	4 – 7
Gasificación con vapor de agua	10 – 18
Gasificación con oxígeno	12 – 28

Fuente: Ref. 9

Selección del diseño del gasificador.

Para seleccionar el tipo de gasificador a diseñar, se realiza primero una preselección de los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo que existen y luego con esto se elabora una matriz de decisión para seleccionar el equipo más factible para el diseño, construcción, operación, etc.

PRESELECCIÓN:

En capítulos previos se describieron tanto el proceso de gasificación así como las tecnologías usadas. De las cuales por ser un proyecto experimental se optó por los “Gasificadores de Lecho Fijo”, ya que este tipo de gasificador se acopla de mejor manera a los requerimientos planteados. Cabe mencionar que dentro de los Gasificadores de Lecho Fijo se pueden usar tres equipos básicos, que son:

- Gasificador de Flujo Ascendente (updraft)
- Gasificador de Flujo Descendente (downdraft)
- Gasificador de Flujo Cruzado (crossdraft)

MATRIZ DE DECISIÓN:

Con la matriz de decisión se selecciona el equipo de gasificación que mejor se acople a las condiciones de trabajo y a los requerimientos del proyecto.

Definición de los ítems considerados en la matriz de decisión:**a. Tipo de materia prima:**

Este ítem se refiere al tipo de biomasa con que trabajan los diferentes gasificadores.

b. Vida útil:

Este concepto responde a la interrogante sobre cuánto tiempo durará operando un gasificador.

c. Disponibilidad a Modificaciones:

En este ítem se considera cualquier tipo de modificaciones que se requieran hacer ya sea para aumentar la capacidad de operación del equipo o mejorar el rendimiento del mismo haciendo de uso algún catalizador.

d. Costos:

Este ítem se podría considerar el factor más importante en el diseño de un gasificador porque es aquí donde realmente se consideran los costos de inversión, operación y mantenimiento.

e. Construcción:

Este ítem se refiere a la disponibilidad de materiales y al grado de complejidad en la construcción del gasificador, así como la manera de transportarlo desde el sitio de construcción al sitio final de instalación.

f. Operación y Mantenimiento:

Bajo este ítem se agrupan conceptos que están relacionados con el funcionamiento y el mantenimiento del gasificador para garantizar la producción del gas deseado, como son la flexibilidad de operación, confiabilidad del proceso y complejidad de su operación.

g. Rendimiento:

En este ítem se pone énfasis en la productividad y en la eficiencia del gasificador.

A continuación se presenta una tabla de la ponderación de los factores a evaluar, la cual después se evaluará.

TABLA 14
PONDERACIÓN DE LOS FACTORES A EVALUAR EN LA MATRIZ DE DECISIÓN

Factor Evaluado	Comentarios	Ponderación
a. Tipo de materia prima (biomasa)	El residuo de biomasa agroindustrial disponible para propósitos experimentales es el carbón de cuesco de palma africana.	15%
b. Vida útil.	Se desea que el gasificador posea una vida útil lo más larga posible (20 años) pues será difícil contar con recursos para reemplazar el gasificador en corto y mediano plazo.	10%
c. Disponibilidad a modificaciones.	En este aspecto se considera cualquier tipo de variación que se quiera hacer en el equipo sin necesidad de una gran inversión o de construir un nuevo equipo.	10%
d. Costos.	Es importante considerar aquella tecnología que sea eficaz y eficiente en la generación de gas a partir de la termogasificación, es decir que haga lo que tenga que hacer al menor costo posible para obtener un ahorro de recursos tanto en la inversión inicial, operación y mantenimiento.	15%
e. Construcción	La construcción del gasificador no debe ser compleja.	10%
f. Operación y Mantenimiento	Se desea que la operación sea simple, flexible y confiable, además de que una persona con poca capacitación pueda hacer la función de operador, y que el mantenimiento sea de lo más simple.	20%
g. Rendimiento	El gasificador que sea diseñado y posteriormente instalado tiene que producir la mayor cantidad de gas posible.	25%
Calificación: 0= No aplica 1= Suficiente 2= Regular 3= Adecuado 4= Bueno 5= Muy Bueno		100%

TABLA 15
MATRIZ DE DECISIÓN

Proceso Evaluado: Selección de Gasificador de Lecho Fijo						
<i>Flujo Ascendente</i>			<i>Flujo Descendente</i>		<i>Flujo Cruzado</i>	
Ítem	Calificación	Aceptación	Calificación	Aceptación	Calificación	Aceptación
a	5	15%	5	15%	5	15%
b	5	10%	5	10%	5	10%
c	4	8%	3	6%	3	6%
d	4	12%	2	6%	3	6%
e	3	6%	3	6%	3	6%
f	3	12%	4	16%	4	16%
g	3	12%	3	12%	3	12%
Total:		75%	71%		71%	

Los resultados de la matriz de decisión indican que la opción del diseño de “Tiro o Flujo Ascendente” es la que más se ajusta al proyecto, por lo tanto este tipo de Gasificador es el seleccionado para el proyecto.

3.2. Selección de materiales.

Debido a que se trabaja con altas temperaturas, se debe hacer una cuidadosa selección de los materiales, tomando en consideración de que es un proyecto experimental, y por lo tanto sus dimensiones y recursos son limitados.

El interior del termogasificador que está más expuesto a altas temperatura es el hogar y parcialmente la tolva contenedora de material, por lo tanto toda ésta parte está construida de una mezcla de mortero refractario y ladrillo refractario.

La parte estructural exterior está construida con plancha de acero ASTM A-36, y unidas entre sí por medio de pernos, bridas, y soldadura. Todas las uniones soldadas deben ser hechas con proceso *GMAW* evitando las deformaciones térmicas por soldadura y las que están unidas por bridas deben tener su respectivo empaque.

Las tuberías de ingreso y salida de gases son tuberías para vapor al igual que las patas que soportan al equipo una vez armado.

3.3. Diseño de forma.

Con la finalidad de cumplir con los objetivos del proyecto se diseñará un Gasificador de lecho fijo de “tipo updraft” que fue previamente seleccionado.

La figura 3.1 muestra la forma del termogasificador que será construido.

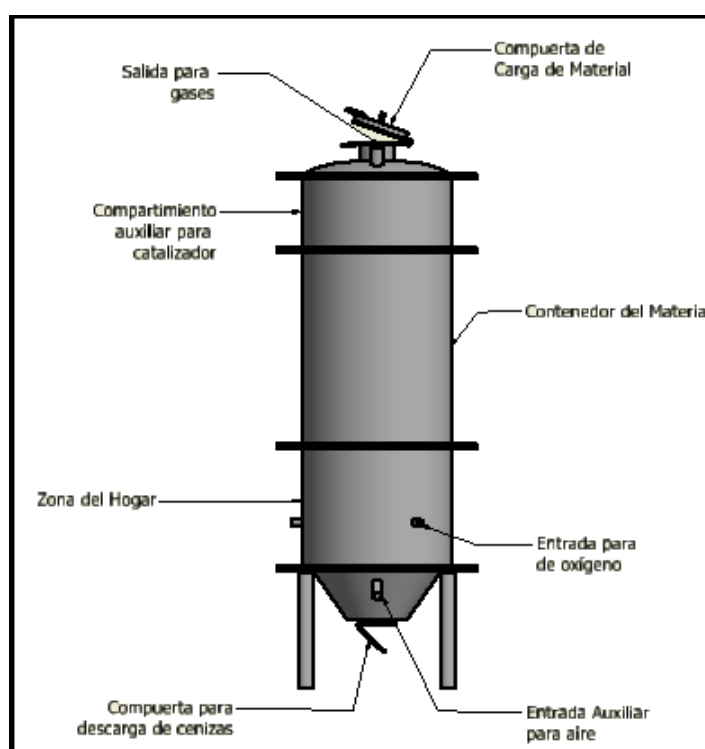


FIGURA 3.1 DISEÑO DE FORMA DEL GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE FLUJO ASCENDENTE

3.4. Cálculo de componentes.

Como ya se mencionó las unidades de termogasificación son equipos de pequeña capacidad. Y es ésta capacidad la que se asume para este diseño.

Diseño de Proceso.

- Potencia térmica estimada :

$$P_{out} = 0.06[MW_{th}]$$

- Flujo volumétrico estimado para el gas producto:

$$Q_{out} = (LHV_g)(\dot{V}_g)$$

$$\dot{V}_g = \frac{Q_{out}}{LHV_g} = \frac{0.06[MW]}{4[MJ/Nm^3]} \times \frac{3600[S]}{1[hr]} \cong 54 \left[\frac{Nm^3}{hr} \right]$$

$$\dot{V}_g \cong 54 \left[\frac{Nm^3}{hr} \right]$$

- Cálculo del flujo másico del combustible

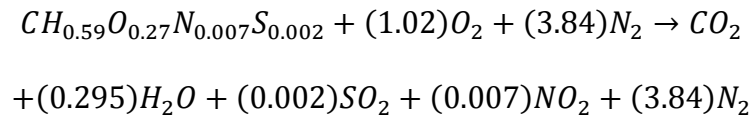
$$P_{out} = \dot{m}_f \times LHV_{biomasa} \eta_{gasificador}$$

$$\dot{m}_f = \frac{P_{out}}{LHV_{biomasa} \eta_{gasificador}} = \frac{0.06[MW]}{\left(25 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \right) (0.8)} \times \frac{3600[S]}{1[hr]}$$

$$\dot{m}_f \cong 10.80 \left[\frac{kg}{hr} \right]$$

- Cálculo de la relación aire-combustible estequiométrica

(A/F_{esteq}) :



$$A/F_{esteq} = \frac{4.86 \text{ moles de aire} \times \frac{28.97[kg]}{1 \text{ mol de aire}}}{1 \text{ mol de biomasa} \times \frac{17.07[kg]}{1 \text{ mol de biomasa}}} \cong 8.25$$

$$A/F_{estq} \cong 8.25 \left[\frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

- Estimación del flujo de aire a través de la relación de equivalencia aire combustible (λ):

Para que exista gasificación en vez de combustión $\lambda < 1.0$. Y para gasificadores tipo flujo ascendente $0.20 < \lambda < 0.25$

Asumiendo $\lambda = 0.25$.

$$\lambda = \frac{(A/F)_{real}}{(A/F)_{esteq}}$$

$$(A/F)_{real} = \lambda \times (A/F)_{esteq} = (0.25)(8.25) \cong 2.06$$

$$(A/F)_{real} \cong 2.06 \left[\frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

$$(A/F)_{real} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_f \times (A/F)_{real}$$

$$\dot{m}_a = \left(10.80 \left[\frac{\text{kg de biomasa}}{\text{hr}} \right] \right) \left(2.06 \left[\frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de biomasa}} \right] \right)$$

$$\dot{m}_a \cong 22.28 \left[\frac{kg}{hr} \right]$$

TABLA 16
DATOS PRELIMINARES DEL
DISEÑO DE PROCESO

$P_{out}[MW_{th}]$	~0.06
$\dot{m}_{biomasa}[kg/hr]$	~10.80
$\dot{m}_{aire}[Nm^3/hr]$	~19
$\dot{m}_{gas}[Nm^3/hr]$	~54

Diseño y Selección de Equipo.

Carga del Hogar.

Para gasificadores de Flujo Ascendente, la carga del hogar oscila entre 100 y 200 $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot hr} \right]$. (Ver Ref. 9)

$$\frac{\dot{m}_f}{A_b} = 190 \left[\frac{kg}{m^2 \cdot hr} \right]$$

$$\frac{11 \left[\frac{kg}{hr} \right]}{A_b} = 190 \left[\frac{kg}{m^2 \cdot hr} \right] \rightarrow A_b \approx 578.95 [cm^2]$$

$$D_b \approx 27.15 [cm]$$

Altura del Contenedor o tolva de material.

$$h_{min} = \frac{\dot{m}_f \times t_i}{\rho_f \times A_b} = \frac{11 \left[\frac{kg}{hr} \right] \times 4 [hr]}{773 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times \frac{11}{190} [m^2]} \times 100 [cm] \approx 98.32 [cm]$$

$$h_{min} \approx 98.32[cm]$$

Diámetro de Tobera (D_n)

$$100 \left(\frac{A_n}{A_t} \right) = 4.57 \quad (\text{Ver Ref. 3})$$

Asumiendo el uso de 3 toberas en la garganta ($D_b = D_t$), entonces:

$$100 \left(\frac{D_n^2}{D_t^2} \right) \times 3 = 4.57 \rightarrow D_n \approx 3.33[cm]$$

Selección del Equipo de alimentador de aire (blower)

Considerando una caída de presión de $\sim 0.30[m \text{ de agua}]$ y una eficiencia de ventilador de 0.70.

$$P_{indicada} = \dot{m}_{aire} \times \rho_{agua} \times \Delta h_{agua} \times g$$

$$P_{indicada} = 300 \left[\frac{Nm^3}{hr} \right] \times 997.1 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 0.30[m] \times 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$P_{indicada} \approx 244.54[W]$$

$$\eta_{ventilador} = \frac{P_{indicada}}{P_{real}}$$

$$P_{real} \approx 349.34[W] (\sim 0.5[hp])$$

Pruebas de Gasificación una vez construido el Termogasificador

- Concentraciones promedio del Gas producto obtenido de la termogasificación con aire y la biomasa de prueba.

TABLA 17
PROMEDIO DE LECTURAS DE LA
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DEL
GAS PRODUCTO OBTENIDO

O_2	1.53%
CO	18.40%
CO_2	11.12%
CH_4	2.02%
H_2	10.38%
N_2	56.55%

Los datos obtenidos de las lecturas promedios (Ver Tabla 28 – Apéndice A) de las hizo con un Analizador de Gases Portátil (Ver Tabla 17, Figura 3.2 y Figura 3.3)

TABLA 18
DATOS DE PLACA DEL ANALIZADOR DE GASES
PORTÁTIL

Marca: NOVA		
Modelo: 2000		Serie: 9862
Voltaje: 115[V]	Amperaje: 2.5[A]	Frecuencia: 60[Hz]

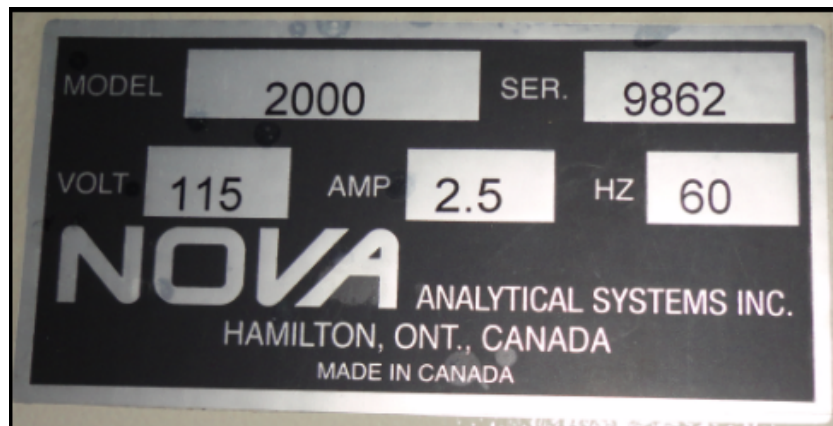


FIGURA 3.2 DATOS DE PLACA DEL ANALIZADOR DE GASES USADO PARA EL MUESTREO DEL GAS PRODUCTO DURANTE LA OPERACIÓN DEL GASIFICADOR



FIGURA 3.3 ANALIZADOR DE GASES DURANTE LA OPERACIÓN DE TOMA DE MUESTRAS

- Estimación de la Cantidad de Gas producido por [kg] de biomasa. Los valores de equivalentes en masa del N_2 y O_2 del Aire Atmosférico fueron tomados de la Tabla 25 (Ver Apéndice A)

Nitrógeno:

$$2.06 \left[\frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de biomasa}} \right] \times \frac{75.5}{100} \left[\frac{\text{kg de } N_2}{\text{kg de aire}} \right]$$

$$\text{Nitrógeno}_{\text{aire}} \cong 1.56 \left[\frac{\text{kg de } N_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

$$\text{Nitrógeno}_{\text{biomasa}} \cong 0.004 \left[\frac{\text{kg de } N_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

$$\text{Nitrógeno}_{\text{total}} \cong 1.5604 \left[\frac{\text{kg de } N_2}{\text{kg de biomasa}} \right] \times \frac{1 \text{ kmol de } N_2}{28 \text{ kg de } N_2}$$

$$\text{Nitrógeno}_{\text{total}} \cong 0.06 \left[\frac{\text{kmol de } N_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

$$\text{Gas}_{\text{producido}} \cong 0.06 \left[\frac{\text{kmol de } N_2}{\text{kg de biomasa}} \right] \times \frac{100 \text{ kmol de gas}}{56.55 \text{ kmol de } N_2}$$

$$\text{Gas}_{\text{producido}} \cong 0.10 \left[\frac{\text{kmol de gas}}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

Oxígeno:

Aportado por la Humedad del aire.

$$2.06 \left[\frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de biomasa}} \right] \times \frac{2[\text{kg}] \text{ de } H_2O}{100[\text{kg}] \text{ de aire}} \times \frac{1 \text{ kmol de } H_2O}{18[\text{kg}] \text{ de } H_2O}$$

$$\times \frac{16[\text{kg}] \text{ de } O_2}{1 \text{ kmol de } H_2O} \cong 0.04 \left[\frac{\text{kg de } O_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

$$\text{Oxígeno}_{\text{humedad del aire}} \cong 0.04 \left[\frac{\text{kg de } O_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

Aportado por el Aire seco.

$$Oxígeno_{aire} \cong 2.06 \left[\frac{kg \text{ de aire}}{kg \text{ de biomasa}} \right] \times \frac{23.2[kg] \text{ de } O_2}{100[kg] \text{ de aire}}$$

$$Oxígeno_{aire \text{ seco}} \cong 0.48 \left[\frac{kg \text{ de } O_2}{kg \text{ de biomasa}} \right]$$

Aportado por la Humedad de la biomasa.

$$\left(\frac{3.62}{100} \right) \left[\frac{kg \text{ de } H_2O}{kg \text{ de biomasa}} \right] \times \frac{1kmol \text{ de } H_2O}{18[kg] \text{ de } H_2O} \times \frac{16[kg] \text{ de } O_2}{1kmol \text{ de } H_2O}$$

$$Oxígeno_{humedad \text{ de la biomasa}} \cong 0.03 \left[\frac{kg \text{ de } O_2}{kg \text{ de biomasa}} \right]$$

Aportado por Biomasa

$$Oxígeno_{biomasa} \cong 0.1889 \left[\frac{kg \text{ de } O_2}{kg \text{ de biomasa}} \right]$$

$$Oxígeno_{total} \cong 0.74 \left[\frac{kg \text{ de } O_2}{kg \text{ de biomasa}} \right]$$

Hidrógeno:

Aportado por la Biomasa:

$$Hidrógeno_{biomasa} \cong 0.0257 \left[\frac{kg \text{ de } H_2}{kg \text{ de biomasa}} \right]$$

Aportado por la Humedad de la biomasa:

$$\left(\frac{3.62}{100} \right) \left[\frac{kg \text{ de } H_2O}{kg \text{ de biomasa}} \right] \times \frac{1kmol \text{ de } H_2O}{18[kg] \text{ de } H_2O} \times \frac{2[kg] \text{ de } H_2}{1kmol \text{ de } H_2O}$$

$$\text{Hidrógeno}_{\text{humedad de la biomasa}} \cong 4.02 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{kg de } H_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

Aportado por la Humedad del aire:

$$\left(\frac{2}{100} \right) \left[\frac{\text{kg de } H_2O}{\text{kg de aire}} \right] \times 2.06 \left[\frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de biomasa}} \right] \times \frac{1 \text{ kmol de } H_2O}{18 [\text{kg}] \text{ de } H_2O} \\ \times \frac{2 [\text{kg}] \text{ de } H_2}{1 \text{ kmol de } H_2O} \cong 4.60 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{kg de } H_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

$$\text{Hidrógeno}_{\text{humedad del aire}} \cong 4.60 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{kg de } H_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

$$\text{Hidrógeno}_{\text{total que ingresa}} \cong \mathbf{0.03432} \left[\frac{\text{kg de } H_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

Hidrógeno transformado en Metano:

$$0.0202 \frac{\text{kmol de } CH_4}{\text{kmol de gas}} \times 0.10 \frac{\text{kmol de gas}}{\text{kg de biomasa}} \times \frac{2 \text{ kmol de } H_2}{1 \text{ kmol de } CH_4} \\ H_2 \rightarrow CH_4 = 4.04 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{kmol de } H_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

Hidrógeno contenido en el gas seco:

$$0.1038 \frac{\text{kmol de } H_2}{\text{kmol de gas}} \times 0.10 \frac{\text{kmol de gas}}{\text{kg de biomasa}} \\ H_2 \rightarrow H_2 \cong 0.01038 \left[\frac{\text{kmol de } H_2}{\text{kg de biomasa}} \right]$$

Hidrógeno total contenido en el gas producto:

$$\text{Hidrógeno}_{\text{total}} \cong 0.01442 \left[\frac{\text{kmol de } H_2}{\text{kg de biomasa}} \right] \times \frac{2 [\text{kg}] \text{ de } H_2}{1 \text{ kmol de } H_2}$$

$$Hidr\acute{o}geno_{total} \cong 0.02884 \left[\frac{kg \text{ de } H_2}{kg \text{ de biomasa}} \right]$$

- Contenido de Humedad del Gas producto:

$$M.C_{Gas \text{ producto}} = (0.03432 - 0.02884) \left[\frac{kg \text{ de } H_2}{kg \text{ de biomasa}} \right] \\ \times \left(\frac{18[kg] \text{ de } H_2O}{2[kg] \text{ de } H_2} \right) \\ M.C_{Gas \text{ producto}} \cong 0.05 \left[\frac{kg \text{ de } H_2O}{kg \text{ de biomasa}} \right]$$

- Balance de Energía

Los Poderes Calorífico para los diferentes gases que constituyen el “Gas producto” son tomados de la Tabla 27 (Ver Apéndice A). Y los vectores energéticos son:

$$LHV_{CO} \cong 12.63 \left[\frac{MJ}{Nm^3} \right]$$

$$LVH_{H_2} \cong 10.78 \left[\frac{MJ}{Nm^3} \right]$$

$$LHV_{CH_4} \cong 35.88 \left[\frac{MJ}{Nm^3} \right]$$

Multiplicando los poderes caloríficos de cada gas constituyente del gas producto con su equivalente en volumen presente en el gas, se debe estimar el poder calorífico inferior y superior del “gas producto”

$$\begin{aligned}
 LHV_{gas\ producto} &= \left[\left(12.63 \times \frac{18.40}{100} \right) + \left(35.88 \times \frac{2.02}{100} \right) + \left(10.78 \times \frac{10.38}{100} \right) \right] \left[\frac{MJ}{Nm^3} \right] \\
 &\times \left(0.10 \left[\frac{kmol\ de\ gas}{kg\ de\ biomasa} \right] \right) \times 22.4 \left[\frac{Nm^3}{kmol\ de\ gas} \right] \\
 LHV_{gas\ producto} &\cong 9.34 \left[\frac{MJ}{kg\ de\ biomasa} \right]
 \end{aligned}$$

- Eficiencia de gas frío

$$\eta_{cg} = \frac{Q_g \cdot \dot{m}_g}{LHV_f \cdot \dot{m}_f} = \frac{LHV_{gas\ producto}}{LHV_{biomasa}} = \left(\frac{9.34}{25} \right) \times 100\% \cong 37.34\%$$

- Estimación de la energía transferida del interior del gasificador hacia el exterior.

TABLA 19
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES
SELECCIONADOS PARA LA CONSTRUCCION DEL
GASIFICADOR

Material	Temperatura Estimada para operación, [K]	Conductividad Térmica, [W/m · K]
Acero del interior	1000	30
Mortero Refractario	920	0.89
Acero del Exterior	400	56.7

Fuente: Ref. 14

TABLA 20
PROPIEDADES DEL AIRE Y DIMENSIONES DEL
GASIFICADOR (ESTIMADOS)

Convección forzada en el interior	$h_1 \cong 100 [W/m^2 \cdot K]$
Convección libre en el exterior	$h_4 \cong 15 [W/m^2 \cdot K]$
Temperatura exterior (estimada)	$T_1 \cong 500^\circ C$
Temperatura interior (estimada)	$T_6 \cong 50^\circ C$
Dimensiones del gasificador $L = 1 [m]$ $r_1 = 258 [mm]$ $r_2 = 260 [mm]$ $r_3 = 300 [mm]$ $r_4 = 304 [mm]$	

Fuente: Ref. 14

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1}\right) + \left(\frac{r_1}{k_A}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{r_1}{k_B}\right) \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \left(\frac{r_1}{k_C}\right) \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) + \left(\frac{r_1}{r_4}\right) \left(\frac{1}{h_4}\right)}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{100}\right) + \left(\frac{\frac{258}{1000}}{30}\right) \ln\left(\frac{260}{258}\right) + \left(\frac{\frac{258}{1000}}{0.89}\right) \ln\left(\frac{300}{260}\right) + \left(\frac{\frac{258}{1000}}{56.7}\right) \ln\left(\frac{304}{300}\right) + \left(\frac{258}{304}\right) \left(\frac{1}{15}\right)}$$

$$U \approx 9.24 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$q_r = (U)(A_1)(T_{\infty,1} - T_{\infty,4}) = (U)(2\pi r_1 L)(T_{\infty,1} - T_{\infty,4})$$

$$q_r = \left(9.24 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \right) \left(2\pi \left(\frac{258}{1000} [m] \right) (1[m]) \right) (500 - 50) [K]$$

$$q_r \approx 6.74 [kW]$$

CAPÍTULO 4

4. PROPUESTA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL GASIFICADOR.

Para un apropiado desempeño del gasificador se deben tener en consideración una serie de aspectos operacionales y de mantenimiento enunciados a continuación:

4.1. Factores que influyen en la operación.

En la operación del gasificador se tienen que controlar las siguientes variables:

Temperatura: A pesar de ser una de las variables más difíciles de controlar se debe estimar la misma en interior del hogar dentro de un rango superior a los 900°C.

Flujo de entrada del agente de gasificación: La cantidad y calidad del gas producto obtenido depende de la cantidad en volumen del agente de gasificación suministrado por peso de combustible que ingresa al gasificador.

Contenido de humedad del combustible (biomasa): El contenido de humedad de la biomasa que se recomienda para la gasificación debe ser bajo, dentro del rango de 15% al 20%. Ya que a pesar de reducir la temperatura del hogar, la presencia de vapor de agua favorece a la formación de hidrógeno.

Contenido de carbono volátil del combustible (biomasa): Para el proceso de termogasificación se recomienda una biomasa con bajo contenido de carbono volátil, ya que éste a pesar de ser formador de líquidos combustibles que contienen hidrógeno en su composición, son de difícil aprovechamiento.

Contenido de carbono fijo del combustible (biomasa): Éste debe ser alto en los procesos de termogasificación ya que es un precursor de sólidos combustibles. Lo que se convierte en la principal fuente de energía para la gasificación, interviniendo en todas las reacciones de transformación en el interior del reactor.

Carga de combustible (biomasa): Al ser un sistema de tipo intermitente, cada batch de combustible (biomasa) que ingresa, debe ser pesado previamente para ajustar la cantidad de aire u otro agente de gasificación que ingresa al reactor.

Tiempo de residencia: Debido a que los tiempos de residencia son muy bajos, una vez que el equipo empieza a gasificar, es necesario contar con sistemas altamente eficientes de remoción de humos, ya que mientras más tiempo permanezcan en el reactor, los vectores energéticos se transformarán en gases no combustibles.

4.2. Cronograma de operación.

Una vez terminada la construcción del gasificador tanto en su parte estructural como en la parte instrumental y de seguridad. Se procede al montaje en el sitio previamente seleccionado y acondicionado, y el gasificador está listo para entrar en funcionamiento.

a. Carga base de combustible (biomasa):

Para la carga base de combustible (biomasa) se debe ingresar el material ya encendido es decir en brasa ($\sim 6[kg]$), y luego alimentar el sistema con el agente de gasificación hasta que el material

ingresado alcance una temperatura adecuada y el lecho del gasificador esté incandescente. Se ha estimado un tiempo de $\sim 15[\text{min}]$.

b. Carga de la columna de combustible frío (biomasa):

Una vez que el lecho esté incandescente se carga el material frío ($\sim 10[\text{kg}]$) y se regula el ingreso del agente de gasificación.

c. Labores iniciales:

Una vez cargado el material frío, el equipo empezará a gasificar alrededor de $\sim 1[\text{hr}]$ a $\sim 2[\text{hr}]$ después, recordando que de aquí en adelante el gasificador no debe ser abierto para evitar demasiadas pérdidas de calor y además se debe controlar el ingreso del agente de gasificación mediante una válvula de paso. El tiempo que tarde el equipo en gasificar se vincula directamente con la cantidad de aire u otro agente que ingrese al gasificador y con el uso de algún catalizador.

El gas que se genere producto de la termogasificación mayormente es rico en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2) y si existe una humedad óptima de la biomasa los niveles de hidrógeno aumentarían, vale la pena volver a mencionar que uno de los gases

que también se genera es metano (CH_4) y que mayormente es generado cuando hay una materia prima con exceso de carbono volátil, lo que no es muy ventajoso para este tipo de equipos.

4.3. Seguimiento de operación.

Durante el funcionamiento del gasificador se podrían presentar algunos inconvenientes en el desempeño del mismo, por consiguiente se realizará dos tablas con los defectos, posibles causas y soluciones a los problemas en la operación del gasificador.

TABLA 21
PROBLEMAS INICIALES

Defectos	Posibles causas	Soluciones
Gasificador se apaga durante la carga del material.	a. Mal encendido del carbón base.	Sacar la biomasa por la compuerta de vaciado de cenizas e iniciar nuevamente el acondicionamiento del material de base. Una vez vuelto a cargar el gasificador dejar la compuerta de carga abierta para que la llama se avive y el combustible biomásico no se apague.
	b. Ingreso de biomasa fría con demasiada humedad.	Abrir la compuerta de carga de material y seguir ingresando el agente de gasificación hasta que el hogar se vuelva a encender tomando siempre en cuenta que éste aumentará en poco tiempo de temperatura lo que se convierte en una operación de extremo cuidado. Para lo cual hay que tomar las debidas precauciones para evitar accidentes personales o el deterioro del equipo.
	c. Atmósfera en el interior del gasificador con exceso de agente de gasificación.	Abrir la compuerta de carga de material y dejar que salga el exceso de aire, e ir regulando la entrada del agente de gasificación.
	d. Poca biomasa caliente en relación a la biomasa fría.	Abrir la compuerta de carga e ingresar más aire para combustionar más biomasa fría.

TABLA 22
PROBLEMAS GENERALES DURANTE LA OPERACIÓN

Defectos	Pasibles causas	Soluciones
No se produce gas combustible.	a. Demasiado tiempo de residencia del gas en el interior del gasificador. b. Temperatura del interior del gasificador no es la adecuada para que empiece a gasificar. c. Poco tiempo transcurrido después del ingreso de la biomasa fría para que empiece el equipo a gasificar. d. Exceso de aire que ingresa al gasificador.	Optimizar el equipo mediante el uso de un sistema de extracción de gases más eficientes, o regular tanto el ingreso de biomasa como del agente de gasificación. Abrir la compuerta de descarga y verificar si se apagó el hogar. Si esto ocurrió abrir la compuerta de carga e ingresar más aire para que se vuelva a encender el hogar. Si se alcanzó la temperatura óptima, dejar que transcurra más tiempo en operación el gasificador e ir verificando en el mechero. Dejar escapar un poco este gas y regular el ingreso del agente de gasificación.
Aumento de Temperatura	a. Existencia de combustión completa en vez de gasificación.	Regular el paso de ingreso de aire hacia el hogar hasta que baje un poco la temperatura e ir verificando en el mechero la presencia de gas combustible.

4.4. Plan de mantenimiento.

La realización de un plan de mantenimiento servirá para asegurar un normal desempeño de las funciones deseadas del equipo de gasificación térmica.

A continuación se presenta un plan de mantenimiento detallado para las partes del gasificador, que son:

- I) Hogar, Contenedor o tolva de combustible, tubería de alimentación de aire, tubería de extracción del gas.
- II) Receptor de cenizas.

Plan de mantenimiento #1

Descripción:

Hogar, Contenedor o tolva de combustible, Tubería de Alimentación de aire, Tubería de Extracción de Gas.

Nota de seguridad:

- Utilizar elementos de seguridad personal como: gafas, guantes, mascarilla, casco y botas de seguridad.
- Prohibido la presencia de fuego cerca de la instalación.

Descripción de la tarea: Inspección general y limpieza.

Tipo de tarea: Preventiva.

Frecuencia: Anual.

Instructivo:

- Parar la carga del termogasificador. Durante el mantenimiento no suministrar ni aire ni materia prima.
- Dejar que se apague el hogar completamente y que se “enfríe” todo el gasificador.
- Retirar todo el material carbonizado dentro hogar y dejarlo caer al receptor de cenizas.
- Vaciar todo el material carbonizado del receptor de cenizas.
- Limpiar y revisar la parrilla del hogar, la tubería de distribución de aire, la tubería de extracción del gas.
- En caso de usar algún catalizador, retirar la tapa superior del gasificador con ayuda de un tecla y proceder a sacarlo para su respectivo reemplazo según su tiempo de duración.
- Finalmente antes de armar nuevamente todo el equipo verificar el estado de los empaques de las bridas.

Tipo de trabajo: Mecánico.

Horas estimadas: 5

Número de personas: 2

Plan de mantenimiento #2**Descripción:**

Receptor de Cenizas.

Nota de seguridad:

- elementos de seguridad personal como: gafas, guantes, mascarilla, casco y botas de seguridad.
- Prohibido la presencia de fuego cerca de la instalación.

Descripción de la tarea: Descarga y limpieza del receptor de cenizas así como una limpieza superficial del distribuidor de aire y la limpieza de la parrilla del hogar.

Tipo de tarea: Preventiva.

Frecuencia: 360 horas de trabajo.

Instructivo:

- Detener el ingreso de aire al interior del hogar y dejar enfriar completamente el gasificador.
- Abrir la compuerta de descarga de cenizas.
- Abrir la compuerta de servicio para proceder a limpiar el distribuidor de aire y la parrilla del hogar (se recomienda usar un cepillo de metal).

Tipo de trabajo: Mecánico.

Horas estimadas: 1 hora.

Número de personas: 1.



FIGURA 4.1 PREPARACIÓN DE LA BIOMASA PARA SER CARGADA EN EL GASIFICADOR



FIGURA 4.2 OPERACIÓN, CARGADO DEL MATERIAL, Y MONITOREO DEL GAS PRODUCTO

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS ECONÓMICO.

Se debe tener en cuenta que para montar un equipo de termogasificación, los costos depende básicamente de la tecnología que se use en el, así como también de los requerimientos de producción, teniendo presente que la implementación de un gasificador no constituye un gasto, sino una inversión que traerá a mediano y largo plazo grandes beneficios económicos y ambientales.

Los costos de los materiales se basaron en precios de este medio.

5.1. Costos de Materiales.

Los costos de los materiales son uno de los factores determinantes en la aplicación de los equipos de termogasificación y por tal razón se realizó el diseño con el objetivo optimizar el uso de materiales para evitar altos costos en la inversión del proyecto.

TABLA 23
COSTOS DE MATERIALES Y EQUIPOS

Descripción	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Planchas de Acero <i>ASTM A36 – 4 × 1220 × 2440[mm]</i>	3	102.82	308.45
Planchas de Acero <i>ASTM A36 – 10 × 1220 × 2440[mm]</i>	3	257.05	771.14
Plancha de Acero <i>ASTM A36 – 19 × 1220 × 2440[mm]</i>	1	445.00	
Soldadura <i>AWS E – 6011 (US. D/kg)</i>	5[kg]	2.27	11.35
Soldadura <i>ER 70 S – 6 (Ø1.20 [mm])</i> (Bobinas de 15[kg])	30[kg]	64.66	129.32
Lámina de fibra de Aramida y Grafito <i>espesor = 1/8"</i>	1	297.08	297.08
Mortero Refractario (<i>canecas de 55[lb]</i>)	5	75.00	375.00
Ladrillos Refractarios forma STD	60	5.80	348.00
Tubería <i>ASTM A53 GrB – 5" Ced 40</i>	1	115.24	115.24
Tubería <i>ASTM A53 GrB – 4" Ced 40</i>	1	80.10	80.10
Tubería <i>ASTM A53 GrB – 2" Ced 40</i>	1	27.79	27.79
Tubería <i>ASTM A53 GrB – 1 1/2" Ced 40</i>	1	21.14	21.14
Tubería <i>ASTM A53 GrB – 1 1/4" Ced 40</i>	1	18.67	18.67
Cañería EMT 1 1/2"	1	20.54	20.54
Válvula de compuerta de 2"	1	25.00	25.00
Pernos 1/2[in] × 2[in] – 13 UNC – 2A	64	0.42	26.88
Soplador Centrífugo de 4"	1	250.00	250.00
1[m] Manguera flexible para aire de 4" con acoples	1	50.00	50.00
Pintura para altas temperaturas	1[Gal]	35.00	35.00
TOTAL= \$			2,910.70

5.2. Costos de Mano de obra.

En la construcción del gasificador están implicadas personas con conocimientos en metalmecánica.

TABLA 24
COSTOS DE MANO DE OBRA

Descripción	Personas	Costo Unitario diario [\$/ <i>persona</i>]	Días Laborados	Costo Total (\$)
Armador	1	50.00	24	1,200.00
Soldador Calificado	1	50.00	48	2,400.00
Ayudante de Taller	2	14.17	48	1,360.32
Total= \$				4,960.32

TABLA 25
INVERSIÓN INICIAL

Descripción	Valor (\$)
Costos de Materiales y Equipos	2,910.70
Costos de Obra de Mano	4,960.32
Costos de Transporte y Montaje	100.00
Total= \$	7,971.02

Estos valores fueron adquiridos a la fecha de estudio de este proyecto y por lo tanto para futuros estudios se deberán considerar la variación los precios de materiales y mano de obra.

5.3. Evaluación Económica.

Los proyectos de biomasa normalmente no son rentables, así que siempre lo que se desea es que vayan acoplados a un proceso de tipo productivo, que será más rentable que el mismo proyecto bioenergético. Del que simplemente su aprovechamiento ayudará desde el punto de vista ambiental, y de generación energética de autoconsumo.

Los beneficios directos del uso de la termogasificación pueden ser estimados en base al tipo y uso del gas producto, como una fuente alternativa a las energías renovables convencionales y a las no renovables. Sin limitar el uso de la termogasificación a biomasa agroindustriales, sino más bien a la aplicación de la “cogasificación”. La cual le daría un uso más productivo tanto a los desechos agroindustriales, y agroforestales, así como también a los RSU.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones:

- Se alcanzó el objetivo de construir un diseño que permite gasificar tanto con oxígeno así como con aire atmosférico. Haciendo uso de un sistema de tres toberas distribuidas radialmente por debajo de la parrilla del lecho para el ingreso del oxígeno a través de la zona de la garganta del hogar y de un sistema de distribución de aire ubicado en el centro del receptor de las cenizas, obteniendo dos atmósferas diferentes de gasificación y utilizando carbón de cuesco de palma aceitera como materia prima.
- Basado en los resultados de la composición del gas obtenido se estimó el poder calorífico superior e inferior del gas producto, tanto para la termogasificación con aire así como también para el oxígeno.

- A pesar que la termogasificación de biomasa con oxígeno permite obtener un gas con mejor poder calorífico, ésta resulta ser costosa debido al valor intrínseco del oxígeno puro. Además ésta atmósfera permite ajustar un gas producto de mejores propiedades en procesos posteriores a la gasificación como la Reducción Fischer-Tropsch para la obtención de bio-petróleos. Sin embargo, para aplicaciones experimentales comunes es mucho más práctico gasificar biomasa con aire (atmosférico) dependiendo de la finalidad de gasificar.

Recomendaciones:

- Se recomienda realizar mayor experimentación con el equipo construido, modificando el número de toberas, su ángulo de incidencia para el ingreso del agente de gasificación, y el tipo de combustible biomásico.
- Además se recomienda tener extrema precaución cuando se realiza la operación de carga de material ya que el equipo posee un sistema de compuerta simple y obligatoriamente se debe cortar el ingreso del agente de gasificación para realizar la operación de carga. Si la operación se realiza mientras está ingresando el agente de gasificación se podría generar problemas de avivamiento del lecho

caliente poniendo en riesgo la seguridad del personal que opera el equipo así como el deterioro del mismo.

- Se debe obligatoriamente usar equipo de seguridad industrial para trabajos con altas temperaturas, tanto durante como después de la operación, y durante la limpieza del equipo. Ya que una vez apagado pueden existir gases inflamables, que podrían ser peligros.
- Adicionalmente se sugiere también el uso de materia prima seca y el uso de algún catalizador que permita disminuir las temperaturas de craqueo, aumentando la cantidad de monóxido de carbono y de hidrógeno en el gas producto.

APÉNDICE A

PROPIEDADES DE GASES Y ANÁLISIS DEL

GAS PRODUCTO OBTENIDO DURANTE LA

GASIFICACIÓN

TABLA 26

COMPOSICIÓN DE AIRE ESTÁNDAR A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Gas	Por Volumen	Por Masa	Peso Molecular
Nitrógeno	78.09	75.47	28.02
Oxígeno	20.95	23.2	32
Argón	0.933	1.28	39.94
Dióxido de Carbono	0.03	0.046	44.01

Fuente: Ref. 9

TABLA 27

CALOR ESPECÍFICO DE GASES

Gas	Peso Molecular	Calor Específico a Temperatura, $(T[K])$	Rango de Validez $[K]$
H ₂ S	34	$30.139 + 0.015(T)$	300 – 600
H ₂ O (vapor)	18	$34.4 + 0.000628(T) + 0.0000052(T^2)$	300 – 2500
H ₂	2	$27.71 + 0.0034(T)$	273 – 2500
CH ₄	16	$22.35 + 0.048(T)$	273 – 1200
CO	28	$27.62 + 0.005(T)$	273 – 2500
CO ₂	44	$43.28 + 0.0114(T) - 818363(T^{-2})$	273 – 1200
O ₂	32	$34.62 + 0.00108(T) - 785712(T^{-2})$	300 – 5000
N ₂	28	$27.21 + 0.0042(T)$	300 – 5000

Fuente: Ref. 9

TABLA 28
PODERES CALORÍFICOS DE LOS CONSTITUYENTES DEL GAS PRODUCTO TÍPICO
DE LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA SÓLIDA

Gases	H₂	CO	CO₂	CH₄	C₂H₆	C₂H₄	C₂H₂	C₃H₈
HHV [<i>MJ/Nm³</i>]	12.74	12.63	-	39.82	70.29	63.41	58.06	101.24
LHV [<i>MJ/Nm³</i>]	10.78	12.63	-	35.88	64.34	59.45	56.07	99.09
Viscosidad [<i>μP</i>]	90	182	150	112	94	103	104	82
Conductividad Térmica [<i>W/m · K</i>]	0.1820	0.0251	0.0166	0.0343	0.0218	0.0214	0.0213	0.0183
Calor Específico [<i>kJ/kg · K</i>]	3.467	1.05	0.85	2.226	1.926	1.691	1.775	1.708
Gases	C₃H₆	I – C₄H₈	I – C₄H₁₀	n – C₄H₁₀	C₆H₆	N₂	NH₃	H₂S
HHV [<i>MJ/Nm³</i>]	93.57	125.08	133.12	134.06	142.89	-	13.07	25.10
LHV [<i>MJ/Nm³</i>]	87.57	116.93	122.91	123.81	141.41	-	10.13	23.14
Viscosidad [<i>μP</i>]	180							
Conductividad Térmica [<i>W/m · K</i>]	0.026							
Calor Específico [<i>kJ/kg · K</i>]	1.05							

Fuente: Ref. 9

TABLA 29

RESULTADOS DE LAS DIFERENTES MUESTRAS DE GAS

PRODUCTO ANALIZADAS

$H_2, \%$ ($V - V$)	$CO, \%$ ($V - V$)	$CH_4, \%$ ($V - V$)	Agente de Gasificación	HHV [MJ/Nm ³]	LHV [MJ/Nm ³]
10.38	18.40	2.02	Aire	4.45	4.17
6.88	19.10	0.63	Aire	3.54	3.38
6.88	19.09	0.63	Aire	3.54	3.38
12.40	49.30	1.30	Oxígeno	8.32	8.03
12.40	49.30	1.30	Oxígeno	8.32	8.03
12.50	49.55	1.33	Oxígeno	8.38	8.08
12.50	49.50	1.30	Oxígeno	8.36	8.07
12.42	49.25	1.32	Oxígeno	8.33	8.03
12.40	49.30	1.30	Oxígeno	8.32	8.03

ANEXO B

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS

A LAS BIOMASAS SELECCIONADAS PARA EL

PROYECTO

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-33-2014

SOLICITANTE INER	FECHA DE RECEPCIÓN 2014-11-04
MUESTRA Materia organica	FECHA DE INFORME 2014-11-20
NÚMERO LTB-110	ENVASE Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO Análisis Proximal de los RSU	MUESTREO Ing. Diego Chulde
DOCUMENTO	
TÉCNICO ASIGNADO Qui. Paola Cuji, Ing. Diego Chulde	

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	4,66
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	82,02
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	0,74
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	12,58
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	15,58

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

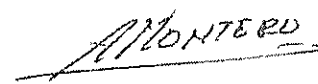
a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Los ensayos fueron realizados con 4 repeticiones y con tres tipos de muestras

Revisado por


 Ing. Ricardo Narváez
 Director del Proyecto

Aprobado por


 PhD. Andrés Montero
 Coordinador General Técnico



CIB-ESPOL

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-32-2014

SOLICITANTE INER	FECHA DE RECEPCIÓN 2014-11-04
	FECHA DE INFORME 2014-11-20
MUESTRA Papel	ENVASE Bolsas plásticas
NÚMERO LTB-111	MUESTREO Ing Diego Chulde
ENSAYO REQUERIDO Análisis Proximal de los RSU	
DOCUMENTO	
TÉCNICO ASIGNADO Qui. Paola Cuji, Ing. Diego Chulde	

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	1,72
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	79,07
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	1,71
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	17,50
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	15,95

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

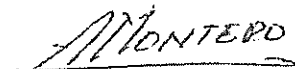
a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Los ensayos fueron realizados con 4 repeticiones y con tres tipos de muestras

Revisado por


Ing. Ricardo Narváez
Director del Proyecto

Aprobado por


PhD. Andrés Montero
Coordinador General Técnico



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-34-2014

SOLICITANTE INER	FECHA DE RECEPCIÓN 2014-11-04
MUESTRA Plástico	FECHA DE INFORME 2014-11-20
NÚMERO LTB-109	ENVASE Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO Análisis Proximal de los RSU	MUESTREO Ing. Diego Chulde
DOCUMENTO	
TÉCNICO ASIGNADO Qui. Paola Cuji, Ing. Diego Chulde	

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	5,49
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	90,68
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	-
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	3,83
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	39,48

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

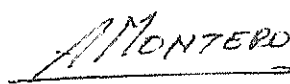
a. El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Los ensayos fueron realizados con 4 repeticiones y con tres tipos de muestras

Revisado por

Aprobado por


 Ing. Ricardo Narváez
 Director del Proyecto


 PhD. Andrés Montero
 Coordinador General Técnico



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-04-2015

SOLICITANTE INER	FECHA DE RECEPCIÓN 2015-01-05
MUESTRA Biomasa	FECHA DE INFORME 2015-02-09
NÚMERO	ENVASE Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO Análisis Elemental	MUESTREO Ing Diego Chulde
DOCUMENTO	
TÉCNICO ASIGNADO Ing. Valeria Ramírez	

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Cuesco humedo sin sal 25°C (LTB-121)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	47,77
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	6,32
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,27
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,47
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	43,01
Cuesco humedo con sal, seco a 50°C (LBT-126)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	48,84
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	6,33
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,07
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,49
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	42,11
Cuesco humedo con sal, seco a 75°C (LBT-127)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	48,02
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	6,05
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,23
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,49
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	43,05

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-34-2014

SOLICITANTE INER	FECHA DE RECEPCIÓN 2014-11-04
MUESTRA Plástico	FECHA DE INFORME 2014-11-20
NÚMERO LTB-109	ENVASE Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO Análisis Proximal de los RSU	MUESTREO Ing. Diego Chulde
DOCUMENTO	
TÉCNICO ASIGNADO Qui. Paola Cuji, Ing. Diego Chulde	

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	5,49
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	90,68
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	-
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	3,83
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	39,48

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

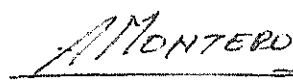
a. El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Los ensayos fueron realizados con 4 repeticiones y con tres tipos de muestras

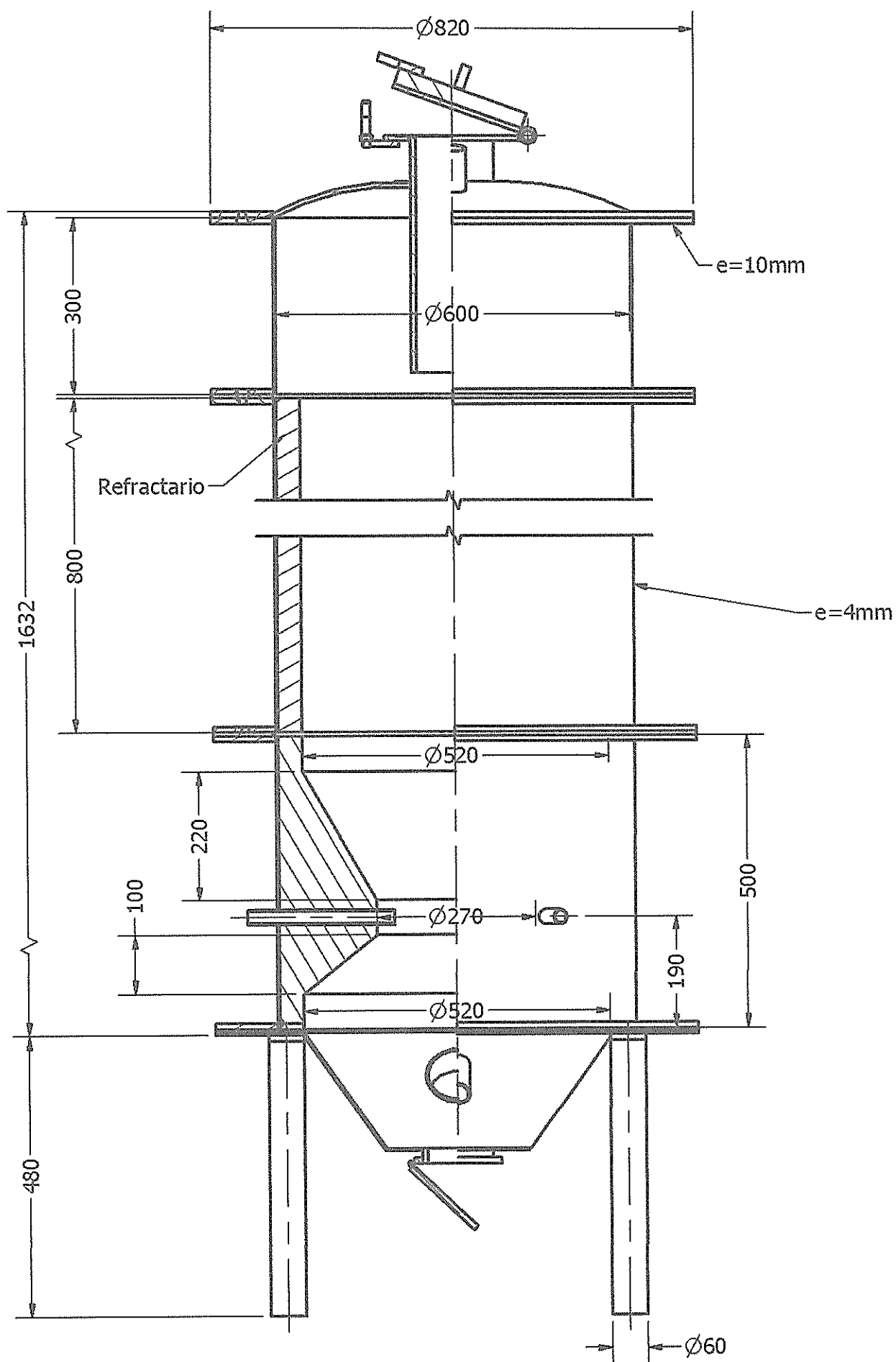
Revisado por


 Ing. Ricardo Narváez
 Director del Proyecto

Aprobado por


 Ph.D. Andrés Montero
 Coordinador General Técnico





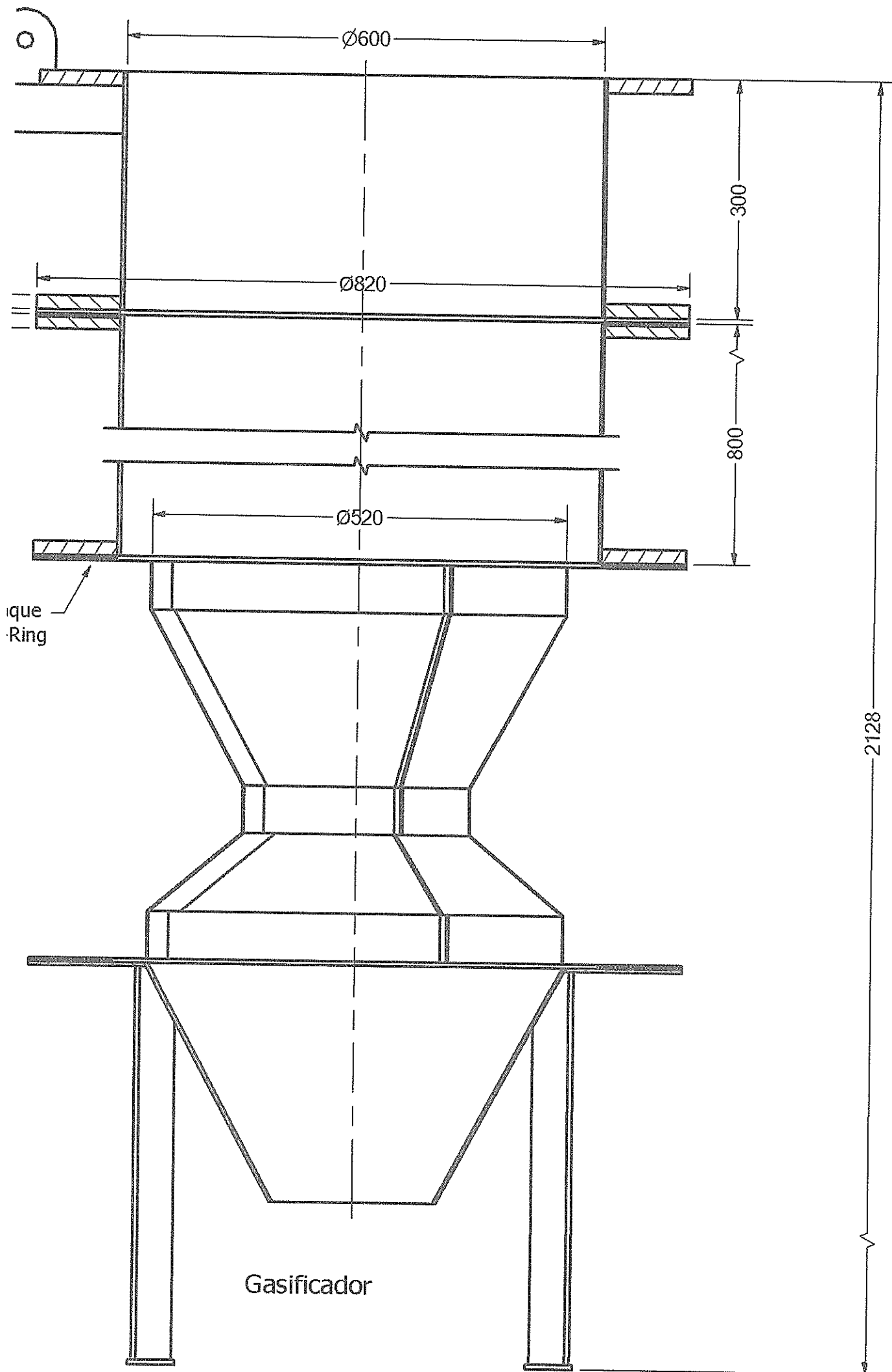
Gasificador

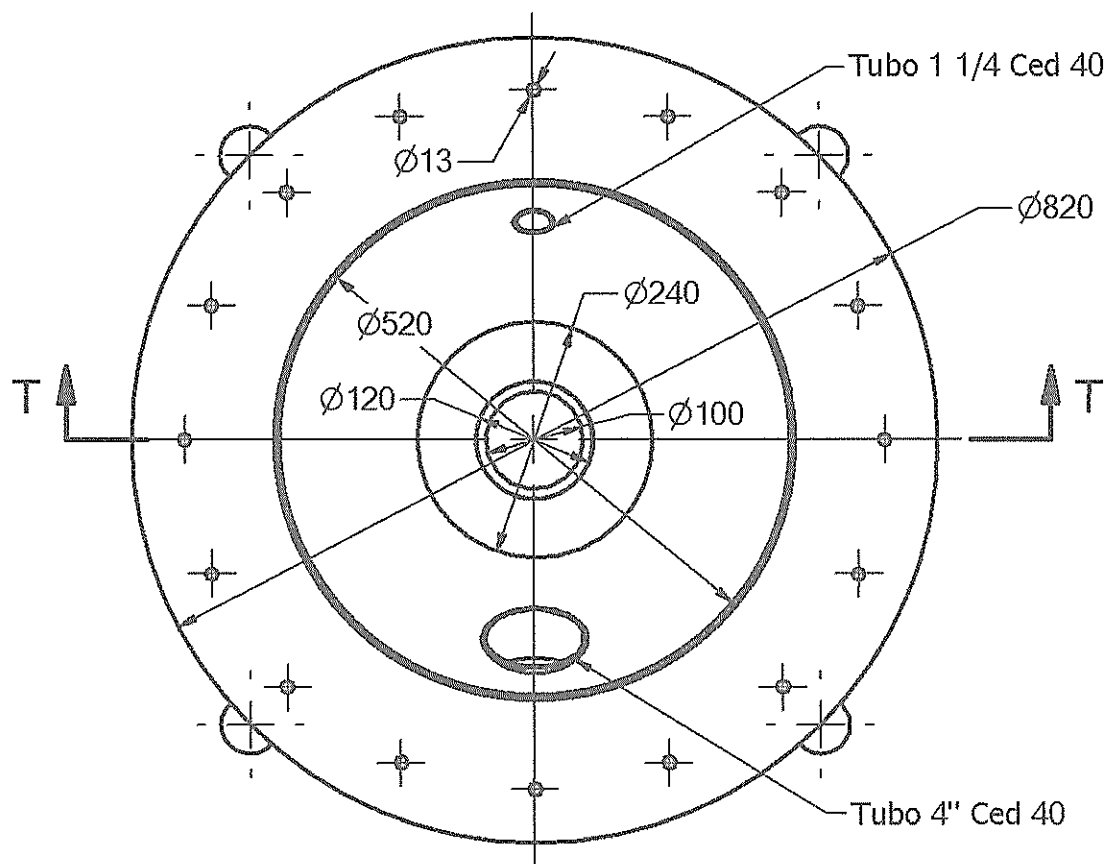
SECCIÓN W-W
ESCALA 1 / 9

ANEXO C

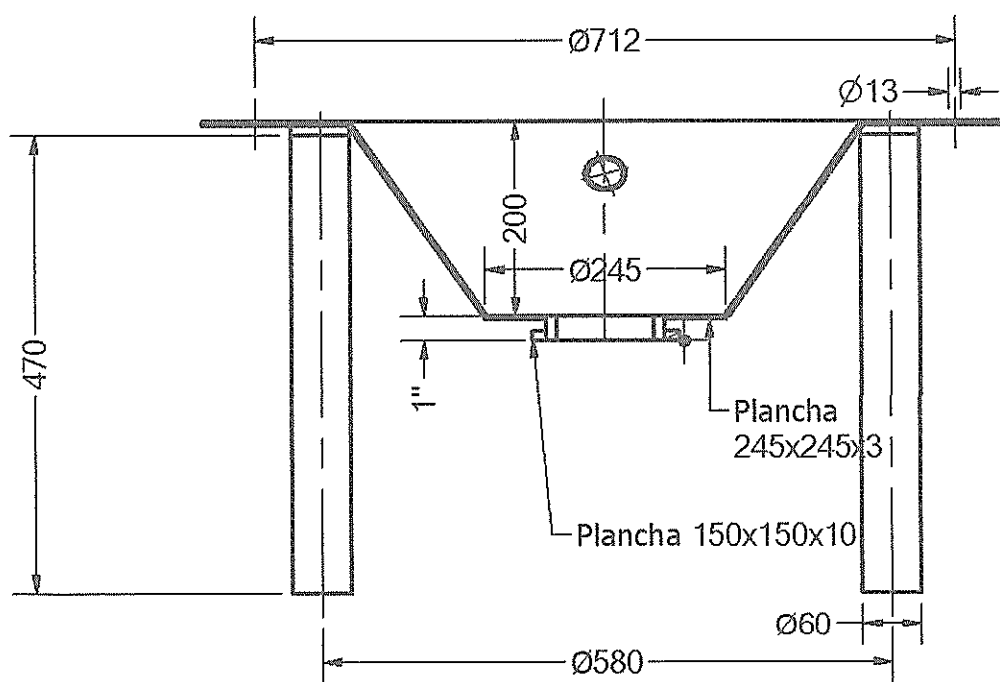
PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL

TERMOGASIFICADOR

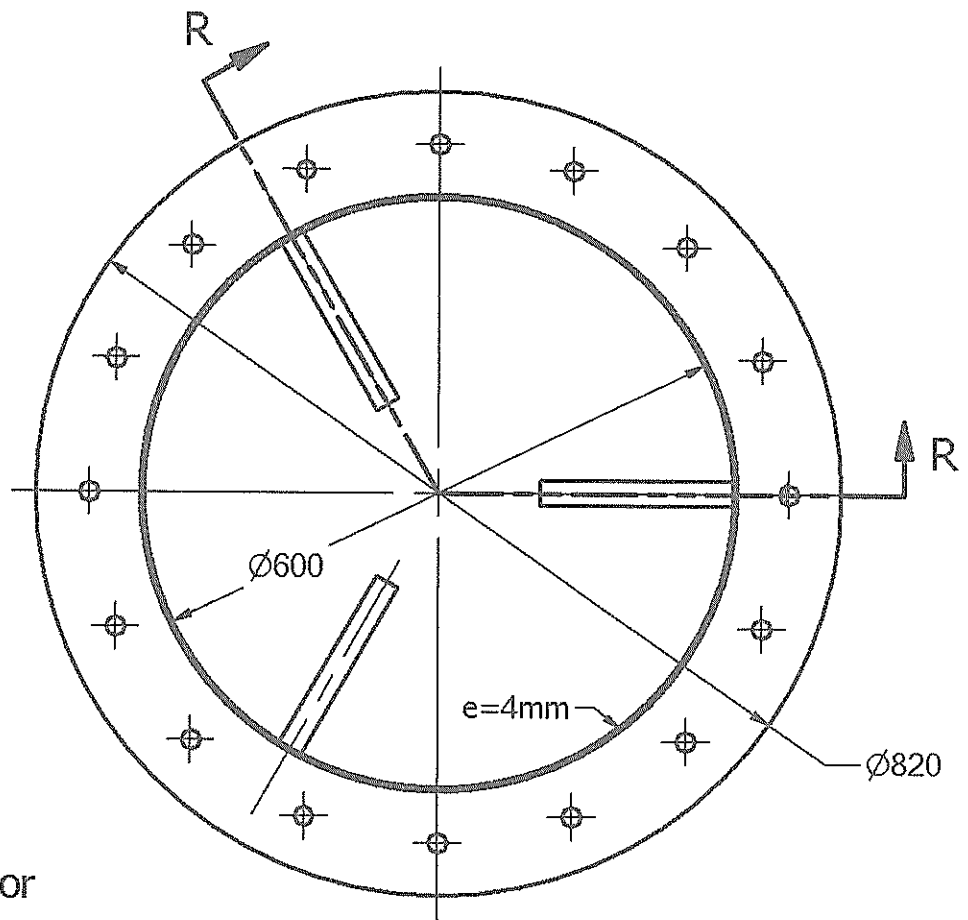




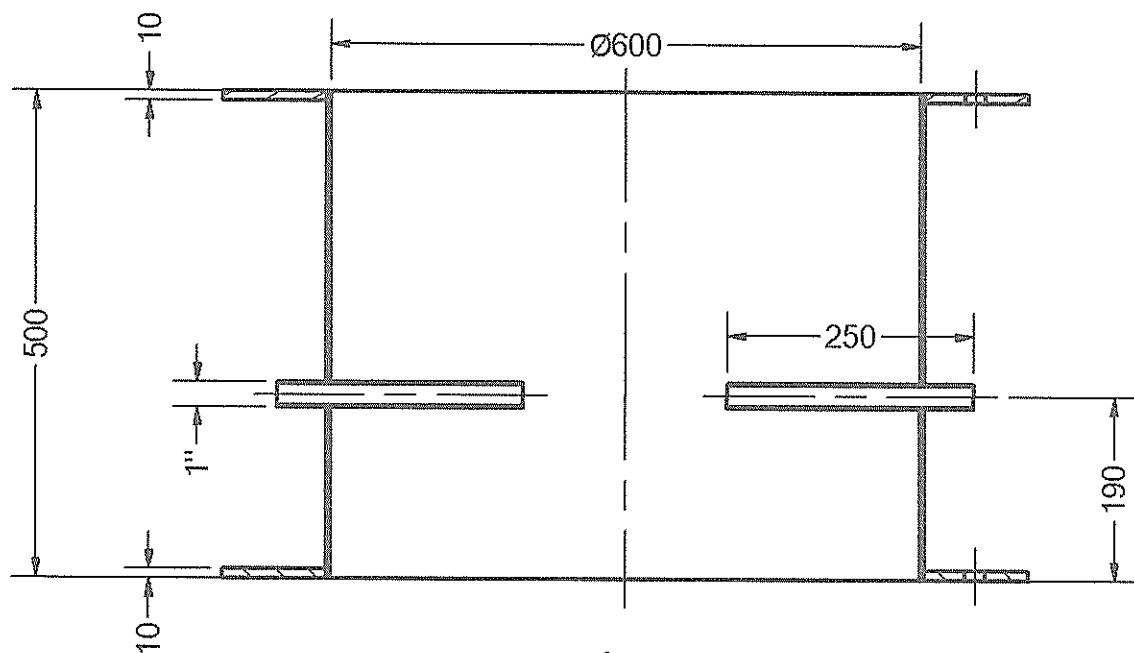
Cenicero
Gasificador



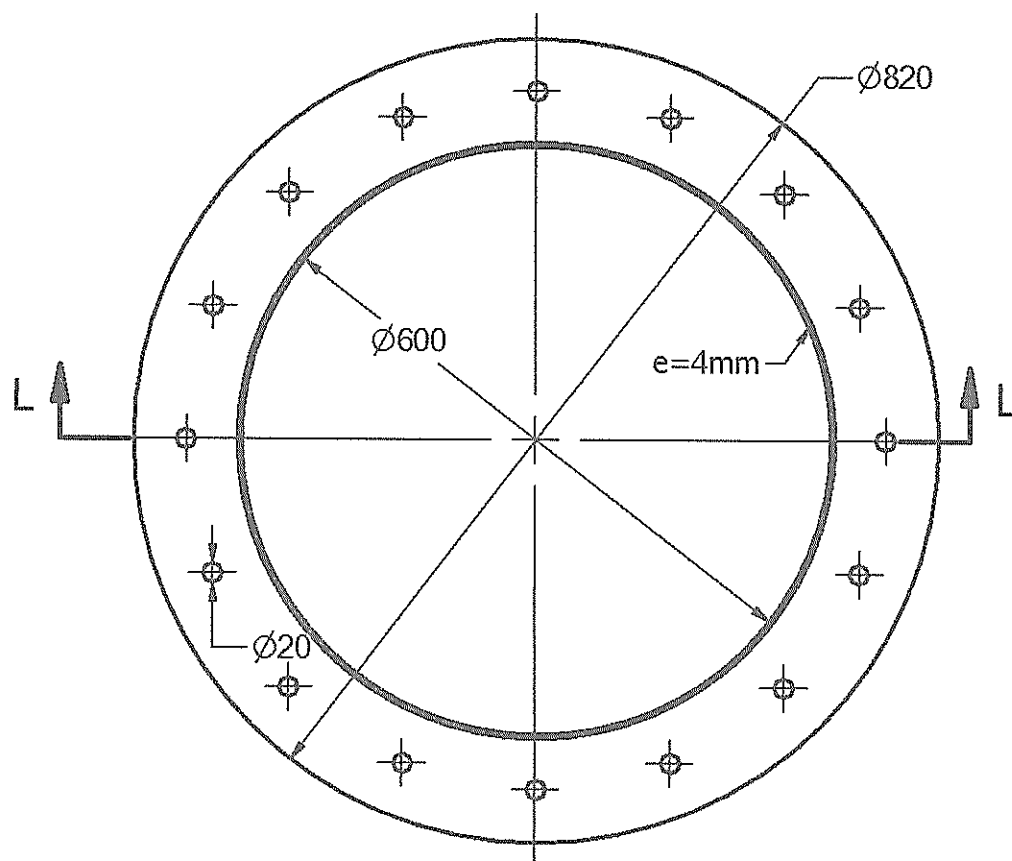
SECCIÓN T-T
ESCALA 1 / 7.5



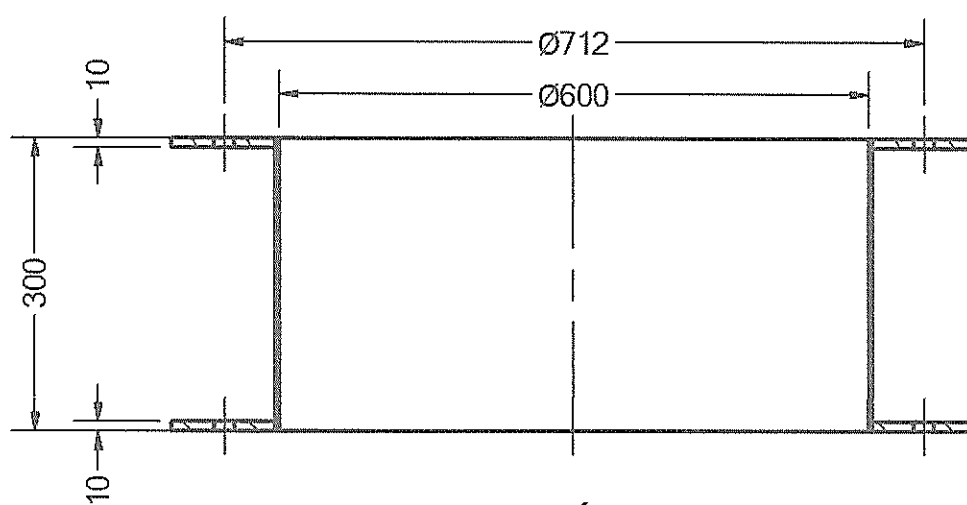
Gasificador Inferior



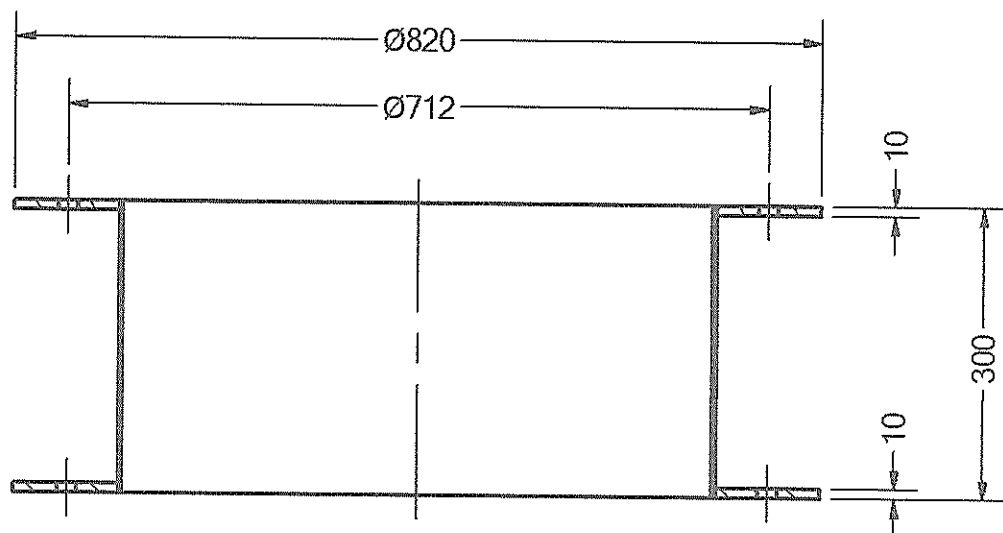
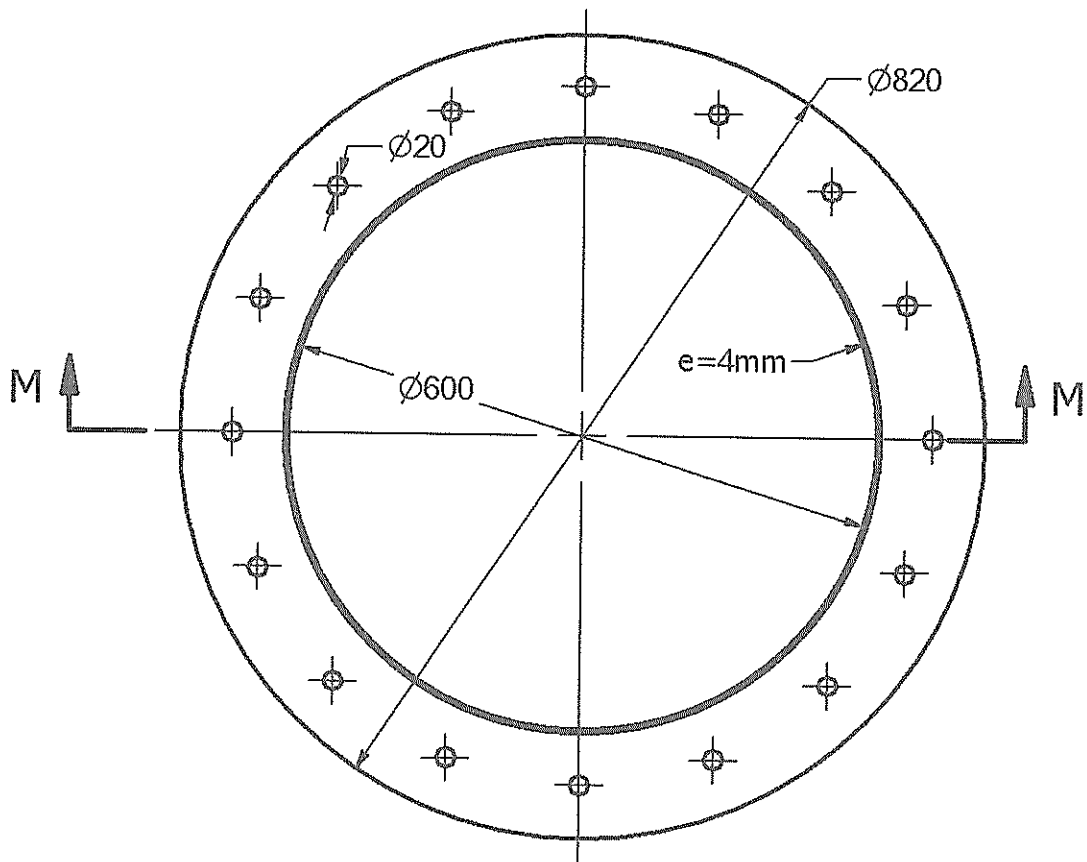
SECCIÓN R-R
ESCALA 1:7.5



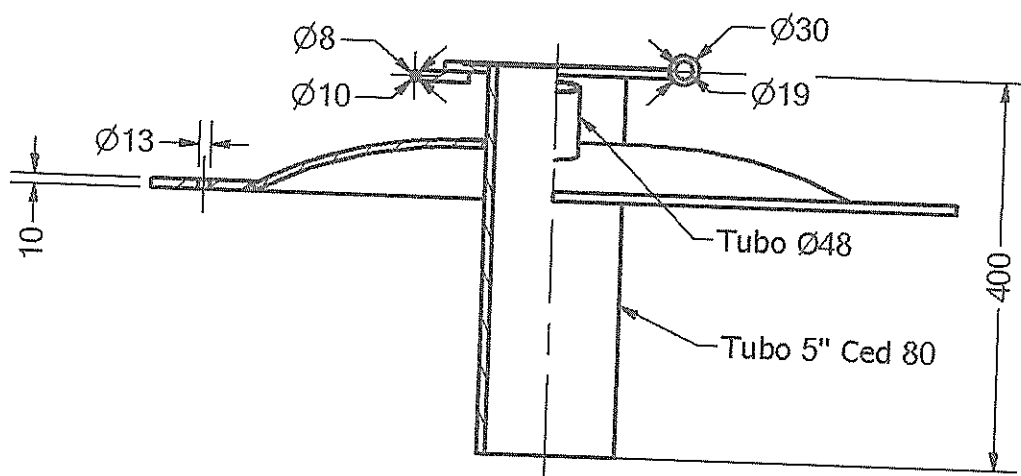
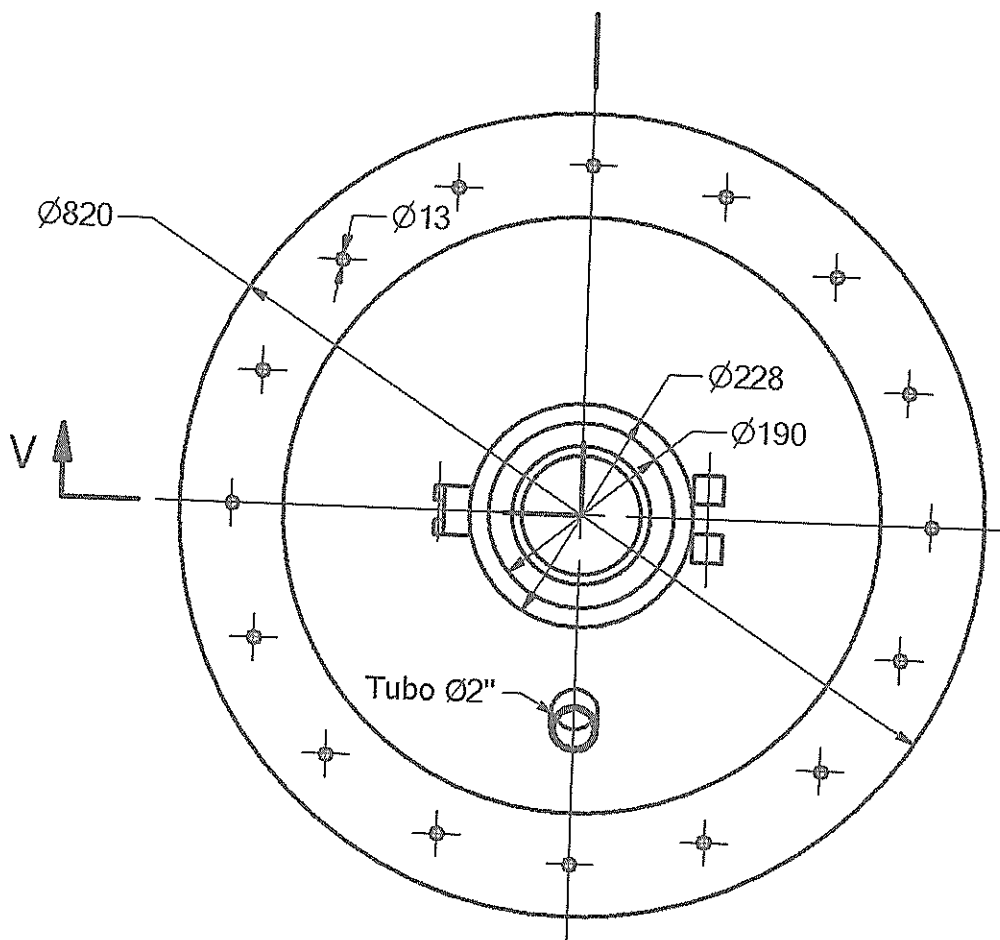
Clasificador parte Intermedia



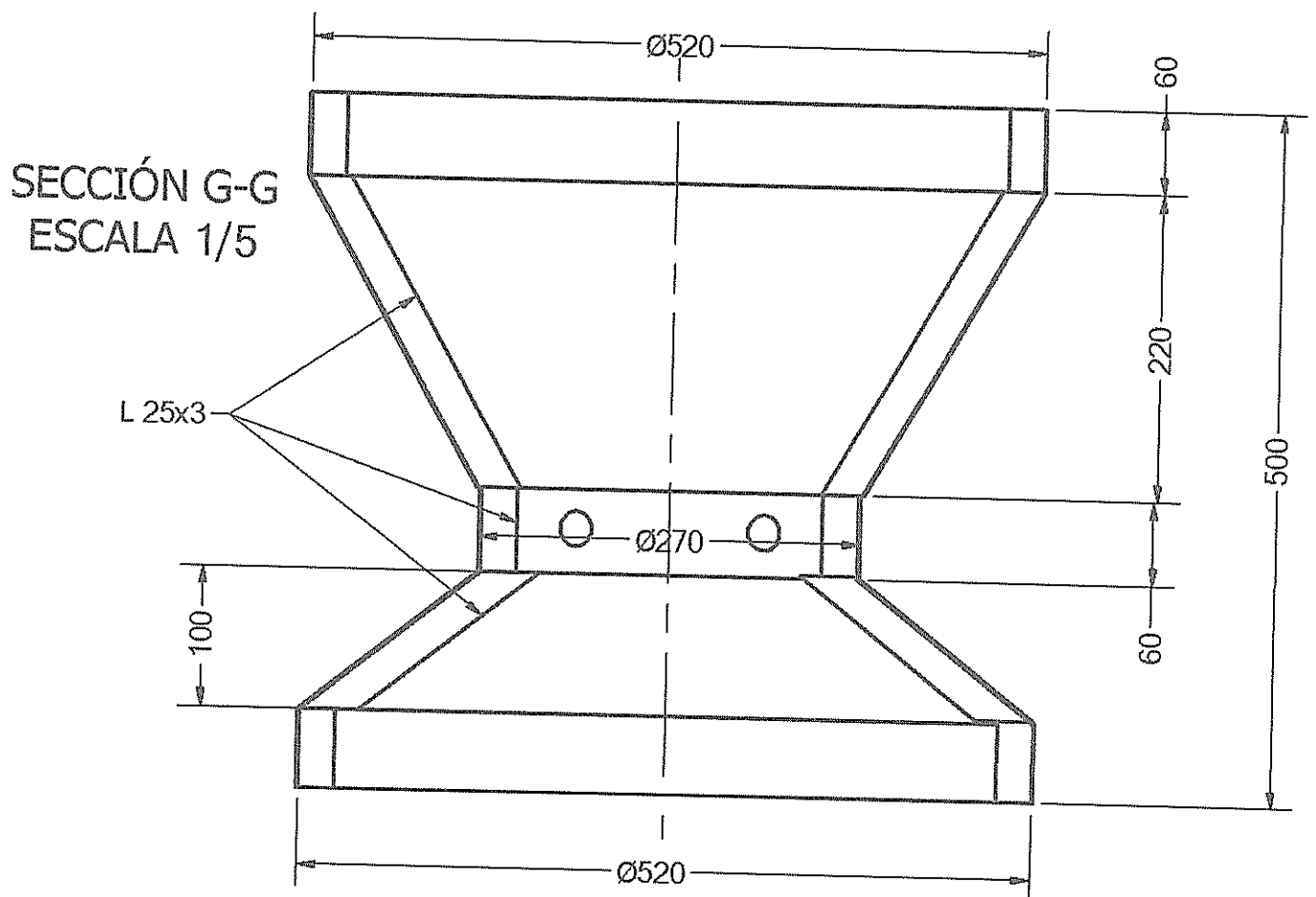
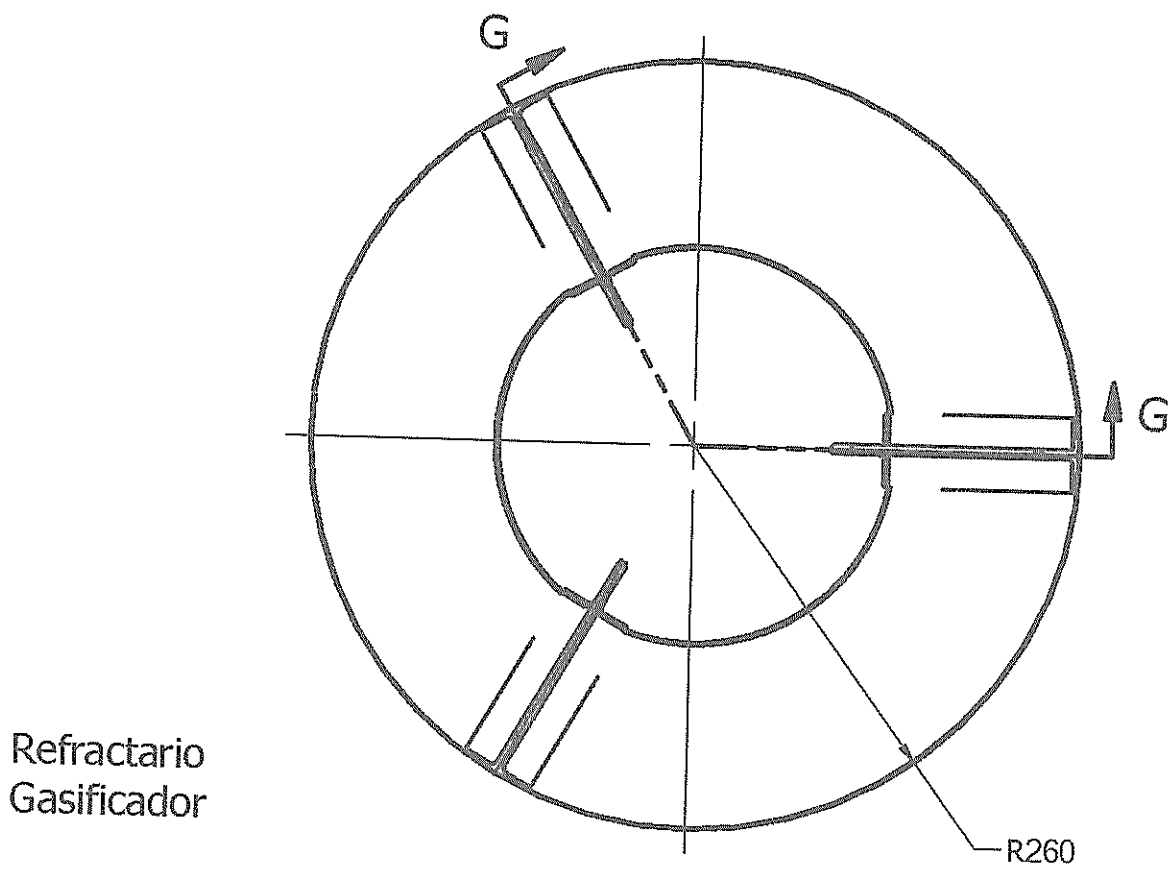
SECCIÓN L-L
ESCALA 1:7.5



SECCIÓN M-M
ESCALA 1:7.5



SECCIÓN V-V
ESCALA 1 / 7.5



Cuesco humedo con sal, seco a 100°C (LBT-128)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	49,35
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	6,27
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,28
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,44
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	41,50
Carbon a partir de cuesco seco con sal en tierra (LBT-129)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	70,89
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,42
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,40
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,34
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	22,79
Carbon a partir de cuesco seco sin sal en tierra (LBT-130)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	71,09
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	4,11
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,82
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,35
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	21,47
Carbon a partir de cuesco humedo con sal en tierra (LBT-131)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	68,57
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,41
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,53
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,31
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	25,02
Carbon a partir de cuesco humedo sin sal en tierra (LBT-132)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	71,38
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	4,09
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,81
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,34
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	21,22

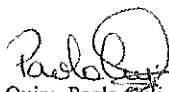
Mezcla de carbon con y sin sal humedo, en tierra (LBT-133)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	59,38
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,46
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,55
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,29
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	34,16
Mezcla de carbon con y sin sal secos, en tierra (LBT-134)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	72,38
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,78
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,63
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,32
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	20,73
Carbon a partir de cuesco humedo con sal en ladrillo (LBT-135)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	74,78
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,59
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,75
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,23
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	18,49
Carbon a partir de cuesco humedo sin sal en ladrillo (LBT-136)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	67,60
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,72
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,66
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,25
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	25,61
Carbon a partir de cuesco seco con sal en ladrillo (LBT-137)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	61,49
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,08
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,52
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,27
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	32,48
Carbon a partir de cuesco humedo sin sal en ladrillo (LBT-138)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	62,54
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,38
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,49
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,25
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	31,18

Mezcla de carbon con y sin sal seco en ladrillo (LBT-139)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	54,60
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,43
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,45
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,26
	Oxigeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	39,10

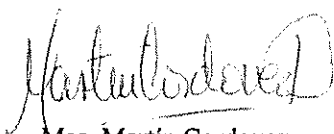
Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

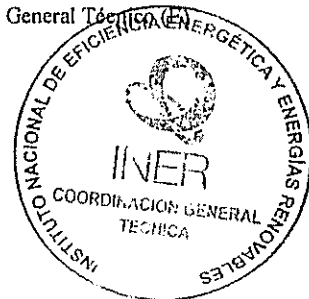
a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Revisado por


Quim. Paola Curi
Analista Técnico

Aprobado por


Msc. Martín Cordovez
Coordinador General Técnico



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-04-2015

SOLICITANTE INER	FECHA DE RECEPCIÓN 2015-01-05
MUESTRA Biomasa	FECHA DE INFORME 2015-02-09
NÚMERO	ENVASE Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO Análisis Elemental	MUESTREO Ing Diego Chulde
DOCUMENTO	
TÉCNICO ASIGNADO Ing. Valeria Ramírez	

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Cuesco con sal a temperatura 1 (LTB-113)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	44,22
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	6,24
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,21
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,49
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	43,68
Cuesco con sal a temperatura 2 (LTB-114)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	48,01
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	5,93
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	4,29
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,46
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	39,15
Carbon sin sal (LBT-115)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	73,63
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,29
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	4,79
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,23
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	15,90

Carbon con sal (LBT-I 16)	Carbono, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	70,74
	Hidrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	3,29
	Nitrógeno, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	5,05
	Azufre, % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	0,25
	Oxígeno % (p-p)	Análisis Elemental	a	a	18,51

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Revisado por


Quim. Paola Cuy
Analista Técnico

Aprobado por


Msc. Martín Cordovez
Coordinador General Técnico (E)



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-03-2015

SOLICITANTE	INER	FECHA DE RECEPCIÓN	2015-01-05
MUESTRA	Biomasa	FECHA DE INFORME	2015-02-09
NÚMERO	de LTB-121 a LTB-139	ENVASE	Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO	Análisis Proximal de los RSU	MUESTREO	Ing. Diego Chulde
DOCUMENTO			
TÉCNICO ASIGNADO	Ing. Boris German, Ing. Diego Chulde		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Cuesco humedo sin sal 25°C (LTB-121)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	8,51
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	74,69
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	13,87
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	2,93
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	20,56
Cuesco humedo sin sal 50°C (LTB-122)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	5,40
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	76,95
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	14,61
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	3,04
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	19,75
Cuesco humedo sin sal 75°C (LBT-123)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	4,52
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	75,42
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	15,64
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	4,42
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	19,48
Cuesco humedo sin sal 100°C (LBT-124)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	1,69
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	74,51
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	20,95
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	2,85
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	17,55
Cuesco humedo con sal, seco a 25°C (LBT-125)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	8,21
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	75,75
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	12,24
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	3,80
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	18,81
Cuesco humedo con sal, seco a 50°C (LBT-126)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	4,86
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	71,18
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	19,71
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	4,25
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	19,18

Cuesco humedo con sal, seco a 75°C (LBT-127)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	4,07
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	72,34
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	19,48
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	4,11
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	16,63
Cuesco humedo con sal, seco a 100°C (LBT-128)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	1,99
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	72,86
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	21,07
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	4,08
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	16,29
Carbon a partir de cuesco seco con sal en tierra (LBT-129)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	3,74
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	24,14
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	56,57
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	15,55
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	26,78
Carbon a partir de cuesco seco sin sal en tierra (LBT-130)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	4,00
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	63,91
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	8,42
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	23,67
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	27,23
Carbon a partir de cuesco humedo con sal en tierra (LBT-131)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	3,62
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	27,23
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	46,65
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	22,50
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	25,78
Carbon a partir de cuesco humedo sin sal en tierra (LBT-132)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	3,61
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	34,29
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	48,92
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	13,18
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	27,00
Mezcla de carbon con y sin sal humedo, en tierra (LBT-133)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	3,90
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	29,07
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	36,73
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	30,30
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	26,58
Mezcla de carbon con y sin sal secos, en tierra (LBT-134)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	3,66
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	30,80
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	35,49
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	30,05
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	26,80
Carbon a partir de cuesco humedo con sal en ladrillo (LBT-135)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	6,09
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	21,68
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	42,73
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	29,50
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	27,74

Carbon a partir de cuesco humedo sin sal en ladrillo (LBT-136)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	7,28
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	28,05
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	41,29
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	23,38
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	25,95
Carbon a partir de cuesco seco con sal en ladrillo (LBT-137)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	6,50
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	21,41
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	49,98
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	22,11
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	28,10
Carbon a partir de cuesco humedo sin sal en ladrillo (LBT-138)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	6,54
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	28,56
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	44,12
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	20,78
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	25,97
Mezcla de carbon con y sin sal seco en ladrillo (LBT-139)	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza BS EN 15148:2009	a	a	7,22
	Carbón volátil, % (p-p)	-	a	a	26,13
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	36,24
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	30,41
	Poder Calórico, MJ/kg	ASTM D1989-96	a	a	26,79

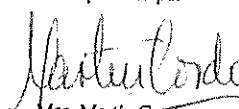
Los ensayos fueron realizados en base a la muestras recolectadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Revisado por


Quim. Paulo Quij
Analista Técnico

Aprobado por


Msc. Martín Córdova
Coordinador General Técnico (E)



INFORME DE ENSAYOS N° LTB-33-2014

SOLICITANTE INER		FECHA DE RECEPCIÓN	2014-11-04
MUESTRA	Materia organica	FECHA DE INFORME	2014-11-20
NÚMERO	LTB-110	ENVASE	Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO	Análisis Proximal de los RSU	MUESTREO	Ing. Diego Chulde
DOCUMENTO			
TÉCNICO ASIGNADO	Qui. Paola Cuji, Ing. Diego Chulde		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza	a	a	4,66
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	82,02
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	0,74
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	12,58
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	15,58

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

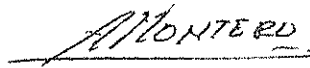
a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Los ensayos fueron realizados con 4 repeticiones y con tres tipos de muestras

Revisado por


 Ing. Ricardo Narváez
 Director del Proyecto

Aprobado por


 Ph.D. Andrés Montero
 Coordinador General Técnico



INFORME DE ENSAYOS N° LTB-32-2014

SOLICITANTE INER		FECHA DE RECEPCIÓN	2014-11-04
MUESTRA	Papel	FECHA DE INFORME	2014-11-20
NÚMERO	LTB-111	ENVASE	Bolsas plásticas
ENSAYO REQUERIDO	Análisis Proximal de los RSU	MUESTREO	Ing Diego Chulde
DOCUMENTO			
TÉCNICO ASIGNADO	Qui. Paola Cuji, Ing. Diego Chulde		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Residuos Sólidos Urbanos	Humedad, % (p-p)	Equipo Termobalanza			
	Carbón volátil, % (p-p)	BS EN 15148:2009	a	a	1,72
	Carbón Fijo, % (p-p)	-	a	a	79,07
	Cenizas, % (p-p)	BS EN 14775:2009	a	a	1,71
	Poder Calórico, MJ/kg	-	a	a	17,50
			a	a	15,95

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

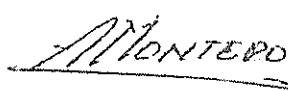
a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

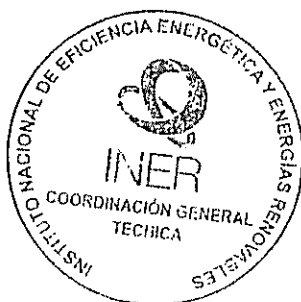
Los ensayos fueron realizados con 4 repeticiones y con tres tipos de muestras

Revisado por


 Ing. Ricardo Narváez
 Director del Proyecto

Aprobado por


 PhD. Andrés Montero
 Coordinador General Técnico



BIBLIOGRAFÍA

1. REED T.B., "Biomass Gasification – Principles and Technology", Golden, Colorado, 1981.
2. REED T.B., DAN JANTZEN, "GENGAS – The Swedish Classic on wood fueled Vehicles", Allenspark, Colorado, 1982.
3. PATIÑO A. MARIO, "Diseño, construcción y pruebas de un termogasificador experimental para residuos forestales y agrícolas", Tesis de Grado, ESPOL, 1985.
4. SOLAR ENERGY RESEARCH INSTITUTE, "Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems", Golden, Colorado, 1988.
5. RODRÍGUEZ V. FRANKLIN, "Pruebas experimentales de gasificación y operación con gas pobre de un motor encendido por chispa", Tesis de Grado, ESPOL, 1990.
6. CAICEDO B. PATRICIO, "Caracterización geométrica y fluido dinámica de un gasificador de flujo descendente utilizando leña como combustible biomásico", Tesis de Grado, ESPOL, 1992.
7. DE SOUZA-SANTOS MARCIO, "Solid Fuels Combustion and Gasification – Modeling, Simulation, and Equipment Operation", Dekker, Inc., N.Y., USA, 2004.

- 8.** VAN LOO SJAAP, KOPPEJAN JAAP, "The Handbook of Biomass and Combustion & Co-firing", EarthScan, London, UK., 2008.
- 9.** BASU PRABIR, "Biomass Gasification and Pyrolysis, Practical Design and Theory", Elsevier Inc., 2010.
- 10.** ROSENDAHL LASE, "Biomass Combustion Science, Technology and Engineering", Woodhead Publishing Limited, 2013.
- 11.** MUÑOZ V. PATRICIO, "La matriz energética ecuatoriana", Comisión de Integración Energética Regional, Quito, Ecuador, 2012.
- 12.** LLORET EUGENIO, "Sembrar el agua para cosechar energía", Comisión de Integración Energética Regional, Quito, Ecuador, 2013.
- 13.** MUÑOZ V. PATRICIO, "Análisis de la incidencia del uso de cocinas eléctricas de inducción", Comisión de Integración Energética Regional, Quito, Ecuador, 2013.
- 14.** INCROPERA FRANK, DEWITT DAVID, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, Inc., 1996.