

T
662.74/C.133



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica

CARACTERIZACION GEOMETRICA Y FLUIDODINAMICA
DE UN GASIFICADOR DE FLUJO DESCENDENTE
UTILIZANDO LEÑA COMO COMBUSTIBLE BIOMASICO

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

Patricio Caicedo Bonilla



Guayaquil - Ecuador

1992

AGRADECIMIENTO

A Dios.

Al Dr. Alfredo Barriga.

Al Personal del CETE y del
Laboratorio de Conversión de
Energía.

A la ESPOL.

Al SEI.

A mis compañeros y amigos.



DEDICATORIA

A mis Padres

A mis Hermanos



ING. OMAR SERRANO
SUB-DECANO ENCARGADO



DR. ALFREDO BARRIGA R.
DIRECTOR DE TESIS



ING. JORGE DUQUE R.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. MARIO PATIÑO A.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



Patricio Caicedo Bonilla



RESUMEN



El presente trabajo de investigación forma parte del proyecto SEI - ESPOL, con el objetivo de reducir el consumo de leña en la pequeña industria del ECUADOR, una de las aplicaciones son los hornos para la calcinación de la piedra caliza en los que se utiliza leña como combustible la eficiencia de calcinación es alrededor del 30 % .

Mediante el proceso de gasificación se pretende incrementar la eficiencia y a su vez reducir el consumo de leña.

La gasificación de la biomasa forestal es la tecnología mediante la cual se logra cambiar el estado de un combustible de sólido a gaseoso pasando por diferentes procesos como: secado, pirólisis, combustión y reducción.

El producto se lo denomina Gas Pobre por su bajo poder calorífico relativo al Gas Natural y es una mezcla de los siguientes gases : CO₂, O₂, N₂, CO, CH₄ y H₂. de los cuales los tres últimos son energéticamente activos, el gas también contiene vapor de agua, cenizas y alquitran.

En el presente trabajo se variarán los parámetros geométricos relacionados con el ingreso de aire tanto en su posición como en la distribución de aire en la tobera, con

la finalidad de observar su incidencia en la producción de Gas Pobre.

Se graficaron curvas del Poder calorífico del gas, eficiencia de gasificación y relación aire/combustible para las diferentes geometrías probadas, además se muestran graficamente las temperaturas en diferentes puntos del gasificador. Notandose el aumento en el requerimiento de flujo de aire para gasificación y de la eficiencia de gasificación cuando la distancia Tobera-Plato garganta se incrementa. Además el incremento de la temperatura del gas pobre a la salida del gasificador en función del tiempo transcurrido, aumentando desde 50 °C hasta 525 °C después de 3 horas de operación.

Operando el gasificador con un rango de valores de 22.9 y 85.7 m³/h para el flujo de aire; 16.4 y 50 kg/h de consumo de leña; 31.4 y 120.6 m³/h para el flujo de gas pobre; 2596 y 3167 kJ/m³ para el poder calorífico del gas pobre, se obtuvieron valores máximos de 69.6 y 80.8 % para la eficiencia en frío y en caliente respectivamente.



INDICE GENERAL

	PAGINA
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XVI
NOMENCLATURA	18
 CAPITULO I	
 INTRODUCCION	
1:1 OBJETIVOS	20
1:2 JUSTIFICACION DEL TEMA	21
1:3 ANTECEDENTES	23
1:4 LA LENA COMO FUENTE DE ENERGIA EN FORMA DE GAS POBRE PARA USO TERMICO EN LA PEQUEÑA INDUSTRIA	25
 CAPITULO II	
 CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROCESO	
2.1.- DESCRIPCION DEL PROCESO DE GASIFICACION	28
2.2.- TIPOS Y COMPONENTES PRINCIPALES DE GASIFICADORES.	33
2.3.- CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS Y GASEOSOS	39
2.3.1.- COMBUSTIBLES GASEOSOS	40

2.3.2.- COMBUSTIBLES SOLIDOS	48
2.4.- PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES BIOMASICOS FORESTALES	51
2.4.1.- LA ENERGIA ALMACENADA EN LA BIOMASA	51
2.4.2.- CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DE LA LEÑA Y PRINCIPALES RESIDUOS AGROFORESTALES	52
2.5.- CONSUMO DE LEÑA EN LA PEQUEÑA INDUSTRIA DEL ECUADOR	62

CAPITULO III

ANALISIS TEORICO

3.1.- ANALISIS ESTEQUIOMETRICO DE LA COMBUSTION DE LA LEÑA	66
3.1.1.- QUIMICA DE LA COMBUSTION.....	68
3.2.- INFLUENCIA DE LA VARIACION DE LOS DIFERENTES PARAMETROS EN EL PROCESO DE OBTENCION DE GAS POBRE	71
3.3.- DIAGRAMA DE OSTWALD DE LA LEÑA	75

CAPITULO IV

DISEÑO DE UN GASIFICADOR PARA USO TERMICO

4.1.- PRINCIPALES COMPONENTES DE UN GASIFICADOR.....	81
---	----



4.2.- DIMENSIONAMIENTO DE UN GASIFICADOR PARA COMBUSTION DIRECTA	85
4.2.1.- CAPACIDAD RELATIVA.....	86
4:3 VARIACION DE LA DISPOSICION GEOMETRICA DE LAS BOQUILLAS PARA LA ENTRADA DE AIRE	96
CAPITULO V	
PRUEBAS EXPERIMENTALES	
5.1.- EQUIPO UTILIZADO	97
5.2.- DETERMINACION DE LOS PARAMETROS OPERACIONALES.....	98
5:2.1.- PORCENTAJES DE CO2 Y O2	98
5:2.2.- TEMPERATURAS EN DIFERENTES PUNTOS	101
5:2.3.- FLUJO DE AIRE A LA ENTRADA ...	101
5:2.4.- HUMEDAD Y PESO DEL COMBUSTIBLE BIOMASICO	101
5:2.5.- PESO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS .	102
5:2.6.- TIEMPO DE OPERACION	102
5.3.- OPERACION CON SUMINISTRO DE AIRE POR MEDIO DE UNA BOQUILLA CENTRAL VARIANDO LA DISTANCIA BOQUILLA - PLATO GARGANTA	103
5.4.- OPERACION CON SUMINISTRO DE AIRE POR MEDIO DE UNA BOQUILLA CENTRAL CON VARIOS ORIFICIOS	120
5:5 RESULTADOS	130

CAPITULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

6:1.- ANALISIS DE RESULTADOS	131
6:2.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	144

APENDICE 1

DETERMINACION DE LA HUMEDAD RELATIVA

DE LA LENA	147
------------------	-----

APENDICE 2

PRECAUCIONES EN LAS OPERACIONES CON

GAS POBRE	151
-----------------	-----

APENDICE 3

CURVAS DE DISEÑO	156
------------------------	-----

APENDICE 4

FOTOGRAFIAS	163
-------------------	-----

APENDICE 5

PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACION DEL

GASIFICADOR	169
-------------------	-----

BIBLIOGRAFIA	172
--------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

Nº	PAG.
2:1 PROCESO DE GASIFICACION DE LENA ...	29
2:2 COMPOSICION DEL GAS POBRE	38
2:3 PODERES CALORIFICOS TIPICOS PARA MEZCLAS ESTEQUIOMETRICAS	47
2:4 CONSUMO FINAL DE ENERGETICOS EN PORCENTAJES	64
2:5 CONSUMO FINAL DE ENERGETICOS	65

CAPITULO III

3:1 DIAGRAMA DE OSTWALD PARA LA LENA ..	80
---	----

CAPITULO IV

4:1 SISTEMA DE GASIFICADOR - HORNO DE PIEDRA CALIZA	94
4:2 DIMENSIONES DEL GASIFICADOR	95

CAPITULO V

5:1 LOCALIZACION DE PUNTOS DE MEDICION	104
---	-----



CAPITULO VI

6:1	RELACION AIRE - COMBUSTIBLE PARA GASIFICACION DE LEÑA	136
6:2	EFICIENCIA DE GASIFICACION EN FRIO	137
6:3	PRODUCCION DE GAS POBRE	138
6:4	EFICIENCIA EN CALIENTE	139
6:5	PODER CALORIFICO DEL GAS POBRE	140

APENDICE 3

A:3.1	PODER CALORIFICO INFERIOR	157
A:3.2	PRODUCCION DE GAS	158
A:3.3	ALTURA h/D_g	159
A:3.4	AREA DE LA TOBERA	160
A:3.5	DIAMETRO DE LA ZONA DE COMBUSTION	161
A:3.6	VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE ...	162

INDICE DE TABLAS



CAPITULO I	PAGINA
1:1 COMPONENTES DEL GAS POBRE EN GASIFICADORES QUE OPERAN CON LENA	25
CAPITULO II	
2:1 PROPORCION DE POLIMEROS EN LA MADERA	51
2:2 CONTENIDO DE MATERIAL MINERAL EN LOS PRINCIPALES PRODUCTOS LIGNOCELULOSICOS.....	55
2:3 ANALISIS ULTIMO DE LA LENA SECA	58
2:4 PORCENTAJES DEL CONSUMO FINAL POR ENERGETICOS EN EL ECUADOR	63
2:5 RECURSOS FORESTALES REMANENTES EN EL ECUADOR	63
CAPITULO III	
3:1 COMPOSICION QUIMICA DEL AIRE SECO	67
CAPITULO V	
5:3.1 PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA - GARGANTA DE 10 Cm. y UN ORIFICIO	105
5:3.2 PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA - GARGANTA DE 14 Cm. y UN ORIFICIO	108
5:3.3 PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA -	

	GARGANTA DE 20 Cm. y UN ORIFICIO	111
5:3.4	PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA - GARGANTA DE 24 Cm. y UN ORIFICIO.....	114
5:3.5	PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA - GARGANTA DE 28 Cm. y UN ORIFICIO	117
5:3.6	PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA - GARGANTA DE 14 Cm. y SEIS ORIFICIOS	121
5:3.7	PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA - GARGANTA DE 20 Cm. y SEIS ORIFICIOS	124
5:3.8	PRUEBA EXPERIMENTAL PARA DISTANCIA TOBERA - GARGANTA DE 24 Cm. Y SEIS ORIFICIOS	127
5:3.9	COMPONENTES DEL GAS POBRE	130

CAPITULO VI

6:1	PROPIEDADES DEL GAS POBRE	133
6:2	RELACION AIRE / COMBUSTIBLE PARA GASIFICACION DE LEÑA	134
6:3	DENSIDAD, PRODUCCION DE GAS Y EFICIENCIA EN CALIENTE	135

NOMENCLATURA

a	:	Angulo del cono
Ab	:	Area de la carbonera
Ag	:	Area de la garganta
At	:	Area de la tobera
BH	:	Base húmeda
BS	:	Base seca
cc	:	Combustión completa
ci	:	Combustión incompleta
D	:	Densidad
Db	:	Diámetro de carbonera
Dc	:	Diámetro del crisol
Dg	:	Diámetro de la garganta
Dt	:	Diámetro de la tobera
h	:	Altura de zona de reducción
hb	:	Altura de carbonera
H	:	Distancia tobera - garganta
HR	:	Humedad relativa
P	:	Presión
PC _{gp}	:	Poder calorífico del gas pobre
Qa	:	Caudal de aire
Qg	:	Caudal de gas
Re	:	Rendimiento energético
Tc	:	Temperatura de combustión
Tp	:	Temperatura de pirólisis



Tr : Temperatura de reducción

Ts : Temperatura de secado

Sub - índices

a : 25 % de HR

b : 15 % de HR

m : mecánicos

t : térmicos

CAPITULO I

INTRODUCCION

1:1 OBJETIVOS

- a.- Establecer las características geométricas y fluidodinámicas apropiadas para la obtención de gas pobre en un gasificador de doble garganta y flujo descendente, utilizando leña como combustible biomásico.
- b.- Plantear una alternativa al uso de la leña como combustible en la pequeña industria con un grado menor de contaminación.
- c.- Analizar el proceso de obtención del gas pobre y sus aplicaciones futuras en el Ecuador.



1:2 JUSTIFICACION DEL TEMA

Es de mucho interés para el Ecuador desarrollar tecnología en el aprovechamiento de las formas de energía no convencionales siendo una alternativa la gasificación de un combustible biomásico forestal.

Los consumos específicos de energía en las pequeñas industrias ecuatorianas que utilizan leña como: ladrilleras, caleras, panaderías, etc. son relativamente altos esto se debe a que la combustión de la leña se realiza de forma muy ineficiente y genera gran cantidad de humos y otro material contaminante como gases combustibles inquemados. La leña que se encuentra en el horno es sometida a diferentes procesos como secado, pirólisis, reducción y combustión parcial, debido a que el aire asciende en contraflujo a la carga de leña en el caso específico de las caleras ocasiona que los gases de la pirólisis escapen al ambiente prácticamente sin combustionarse y que además parte del proceso de combustión se efectue en forma incompleta por la escasez de oxígeno en las capas superiores de la zona de combustión.

Estimaciones preliminares realizadas por el centro de experimentación en tecnología energética indican que solo se aprovecha el 30 % de la energía inicial de la leña, perdiéndose el resto al ambiente.

La combustión en la fase gaseosa es más eficiente que en la fase sólida, por cuanto no se pasa por un proceso de pirólisis y existe una mejor mezcla aire/gas, el aire necesario para la combustión puede ser suministrado de una manera más simple simultáneamente con el gas. El hecho de aumentar la eficiencia de combustión al cambiar el estado del combustible de sólido a gaseoso causaría un impacto positivo en el ahorro de energía (leña),

contribuyendo de esta forma a disminuir la deforestación y la contaminación ambiental, ya que con la combustión del gas se reduciría significativamente la producción de humos y gases incombustionados.

En el presente trabajo se pretende contribuir a desarrollar tecnología propia en la producción estable y continua del gas pobre.

El desarrollo de ésta tecnología podría permitir al país utilizar las miles de toneladas de desechos agroforestales actualmente desperdiciadas, convirtiéndolas en combustibles de mucho valor para la pequeña y mediana industria.

Entre las principales aplicaciones del gas pobre están las siguientes:

Motores de combustión interna (para vehículos y generadores eléctricos) y para combustión directa en hornos, quemadores, etc.

1:3 ANTECEDENTES

La Facultad de Ingeniería mecánica de la ESPOL desde hace alrededor de 10 años se encuentra trabajando en proyectos de energías no convencionales en el área de la gasificación de residuos agrícolas y forestales en cooperación con instituciones nacionales y extranjeras.

En lo que respecta a gasificación de residuos forestales en 1984 se construyó un gasificador experimental de doble garganta, de flujo descendente y para un consumo de 26 kg/h de madera troceada lo cual da una capacidad térmica de 93 kW con una eficiencia del 70 % . En este gasificador el ingreso del aire se lo realizó por medio de cinco toberas distribuidas circunferencialmente en el crisol, el mismo que fue construido con plancha de acero de bajo carbono.

En el presente trabajo se diseñará un gasificador para uso térmico con una capacidad de 200 kW_{térmico} con una eficiencia de 65 % para un consumo de biomasa de 60 kg/h. Esta potencia de diseño corresponde a una demanda térmica estimada para un horno de cal que opere con un valor de producción de cal del orden de 3000 kg de piedra caliza por día. Este gasificador será de doble garganta y tiro descendente con la diferencia de; crisol refractario, aire insuflado por medio de una tubería central a lo largo del eje del gasificador, con uno o varios orificios por donde fluye el aire para la zona de combustión, la ausencia de

parrilla horizontal a cambio de pilares verticales de mampostería (ladrillos) que van desde el piso hasta la base del crisol dejando espacios rectangulares para el paso del gas producido y utilizando en su construcción en la mayoría de los componentes elementos de mampostería.

La finalidad del presente trabajo es desarrollar tecnología que pueda ser aplicada en el medio, es decir reserantar al pequeño industrial un gasificador seguro que lo pueda construir por su costo relativamente bajo, utilizando mampostería, y materiales de fácil adquisición.

Esta tesis forma parte del proyecto " Uso racional de leña como energético en la pequeña industria del Ecuador" que se realiza en la ESPOL con el auspicio del SEI (Instituto Ambiental de Estocolmo). En dicho proyecto se pretende dar las pautas para reducir el consumo de leña y minimizar la emisión de contaminantes, así como dar un uso más racional y productivo a los recursos biomásicos de este tipo.

1:4 LA LEÑA COMO FUENTE DE ENERGIA EN FORMA DE GAS POBRE PARA USO TERMICO EN LA PEQUEÑA INDUSTRIA.

El uso de fuentes de energía confiables y renovables es de gran importancia para suplir las necesidades e incrementar la productividad en los países en desarrollo, hasta el momento se ha utilizado en gran escala los derivados del petróleo con el proposito de obtener energía, pero el incremento de los precios de estos así como su futura escasez hacen que sea impresindible la tarea de investigar sobre fuentes alternativas de energía.

La gasificación es un proceso térmico de descomposicion de la biomasa de origen vegetal, mediante el cual obtiene un gas que contiene CO, CO₂, H₂, N₂, así como pequeñas cantidades de hidrocarburos C_x H_y, metano, alquitranes y vapor de agua. Siendo el monóxido de carbono y el hidrógeno gaseoso sus principales componentes energéticos activos.

Existe además metano en pequeñas cantidades, que contribuye a incrementar el poder calorífico del gas pobre.

El proceso de gasificación convierte un combustible sólido de tipo lignocelulosico a un combustible gaseoso con mejores y más flexibles características de operación, mejor eficiencia térmica global y se adapta bien a los combustores y motores disponibles comercialmente.



**COMPONENTES DEL GAS POBRE EN GASIFICADORES QUE OPERAN CON
LEÑA**

CO	[monóxido de carbono]	15 a 22%
H ₂	[hidrógeno]	12 a 20%
C _x H _y	[hidrocarburos livianos]	0.2 a 0,4%
C ₁₃ H ₂₀ O	[alquitranes]	0 a 5%
CO ₂	[dióxido de carbono]	3 a 15%
N ₂	[nitrogeno]	45 a 55%
O ₂	[oxigeno]	0 a 1%
CH ₄	[metano]	2 a 3%

PODER CALORIFICO INFERIOR 5,0 a 5,9 MJ/Nm³

TABLA # 1

Fuente: referencia # 1

Además de ceniza, vapor de agua, y hollin.

De estos, los cuatro primeros son energéticamente activos mientras que los demás son inertes, diluyendo el gas y bajando su poder calorífico. Los alquitranes a pesar de ser combustibles son indeseables para el gas, pues cuando están calientes, se vaporizan dejando incrustaciones en las tuberías y cuando se enfrían se condensan. En el caso de que el gas se use como combustible para motores de combustión interna la presencia de los alquitranes es nociva pues causaría serias obstrucciones en los motores. El proceso de combustión con leña es muy complejo por su alto contenido de materia volátil.

En comparación con otras posibles alternativas de energía las principales ventajas de la opción del gas pobre son las siguientes:

- Se puede adaptar fácilmente a los tipos de maquinaria existentes, tales como; motores de combustión interna, hornos y aplicaciones térmicas en general.
- Es un combustible renovable que permite la utilización de residuos tanto agrícolas como forestales para ser convertidos en combustibles gaseosos de mucho valor.
- La eficiencia de un combustible gaseoso como el gas pobre es mucho mayor que la de un combustible en estado sólido.
- La contaminación ambiental al combustionar el gas pobre tiene un doble impacto; primero, minimiza la producción de humos y con ellos gases no combustionados y segundo, ahorra energía al ser más eficiente la combustión de un gas, lo que a su vez tendría un impacto positivo en la disminución de la tala de árboles para fines energéticos cuya cuantificación escapa del alcance del presente trabajo.
- La producción teórica de gas pobre es de 2.25 Nm³ por cada kg de leña con un 20 % de humedad relativa.
- Un kilogramo de leña produce aproximadamente 3.125 kW térmicos.
- Un kilogramo de leña produce aproximadamente 1 kW de potencia al eje en un motor de combustión interna.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROCESO

2:1 DESCRIPCION DEL PROCESO DE GASIFICACION

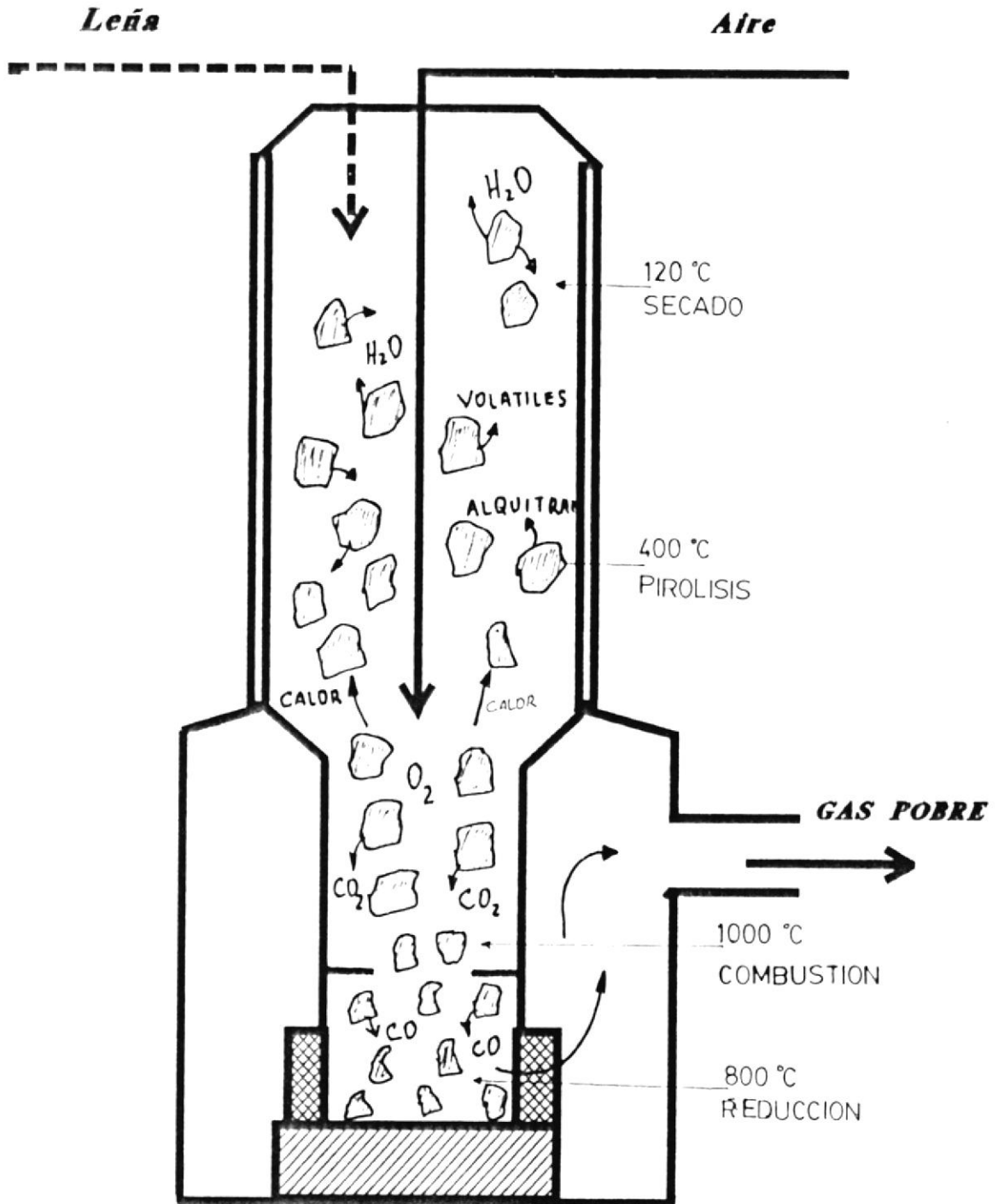
Un gasificador es un recinto hermético en donde ocurren diversas reacciones de oxidación y reducción, siendo esta última la que produce los gases combustibles requeridos en el proceso.

Para que ocurran las reacciones antes anotadas se debe proveer al equipo de gasificación de la mínima cantidad de aire para la combustión incompleta de la leña y de esta manera producir los gases combustibles (CO y H_2). La cantidad de aire será suministrada en el presente caso por medio de una tubería central hasta un recinto denominado crisol por ser la parte de gasificador donde ocurre la oxidación del combustible biomásico y las temperaturas son más elevadas (800 - 1000 °C).

El calor producido en la zona de crisol llegará a las zonas adyacentes en diferente magnitud, es decir a la zona de reducción la cual en el caso de un gasificador de flujo descendente se encuentra en la parte más baja del equipo le llegará mayor cantidad de calor por encontrarse en la

PROCESO DE GASIFICACION DE LEÑA

Figura 2:1



dirección de la corriente de los gases, no así la zona de pirólisis que se encuentra en la parte superior al crisol en donde la temperatura es menor.

La ubicación de cada una de estas zonas será diferente, dependiendo del tipo de gasificador y las características de las reacciones que ocurren se enuncian a continuación.

ZONA DE COMBUSTION:

Esta zona se ubica a la altura de la tobera de alimentación de aire en la cual ocurre la combustión de biomasa.



El ingreso de aire necesario para la combustión debe restringirse de tal manera que no extienda a toda la masa de combustible ya que si esto llegara a ocurrir, el equipo funcionaría como un horno común el cual genera calor y produce gases incombustibles, tales como el dióxido de carbono, nitrógeno gaseoso y vapor de agua los cuales constituyen una carga térmica, no cumpliendo con el objetivo de la gasificación.

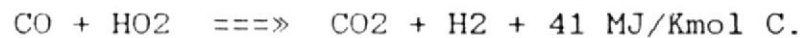
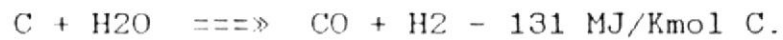
La reacción química en ésta zona es la siguiente:



El aire al entrar al gasificador reacciona con el carbono del combustible biomásico provocando la oxidación de éste en forma exotérmica, con liberación de luz y formación de CO₂.

ZONA DE REDUCCION:

Los gases calientes que salen de las zonas de combustión entran a la de reducción en la cual se forman los gases combustibles, los más importantes del proceso de gasificación son el CO y H₂, las siguientes reacciones ocurren en ésta zona:



El nivel de temperatura en la zona de reducción es muy importante para el equilibrio de las diferentes reacciones químicas que se producen en esta zona.

Una reacción de reducción muy importante es aquella entre el vapor de agua y el carbono, la cual es también endotérmica y sólo se realiza a temperaturas sobre los 900 °C, el agua se disocia y los productos resultantes son monóxido de carbono y cierta cantidad de hidrógeno. Se la conoce normalmente como reacción "agua-gas" y ya que los dos productos son combustibles se incrementa el valor calorífico final del gas pobre.

ZONA DE PIROLISIS:

En esta zona se extrae el calor producido en la zona de combustión. El combustible biomásico empieza a pirólizarse

cuando la temperatura es de aproximadamente 400 °C, el proceso se lleva a cabo de la siguiente forma:

Al calentarse la biomasa las moléculas grandes (celulosa, semicelulosa y lignina), se desintegran en moléculas de tamaño mediano y permanecen suficiente tiempo en la zona caliente luego se convierten en moléculas más pequeñas como metano, en el caso de que el tiempo de residencia en la zona ardiente sea muy corto o la temperatura baja, entonces las moléculas de tamaño pequeño y mediano escapan y aparecen en forma de alquitranes y aceites.

Este proceso es análogo al que ocurre en un horno de manufactura de carbón, en las reacciones participan: vapor de agua, ácido acético, metanol y considerables volúmenes de hidrocarburos pesados (brea).

Es importante señalar que en el caso de usar madera se emite en forma de brea y volátiles aproximadamente el 50% del peso inicial.

Después de la pirólisis el residuo sólido es carbón vegetal.

ZONA DE SECADO:

Esta zona se encuentra en la parte superior del equipo la temperatura es alrededor de 150 °C, cualquier humedad que contenga la leña la elimina como vapor de agua.

En esta zona las temperaturas no son lo suficientemente altas para producir reacciones químicas.

2:2 TIPOS Y COMPONENTES PRINCIPALES DE GASIFICADORES

Los gasificadores se clasifican de acuerdo con varios criterios:

1.- **SEGUN LA DIRECCION EN LA QUE FLUYE EL AIRE**, en la zona de combustión pudiendo ser de tres formas:

a.- *Gasificador de Flujo Ascendente*, en el cual el aire fluye desde la parrilla hacia arriba, es decir, la zona de combustión se encuentra adyacente a la parrilla y el gas producido se lo extrae por la parte superior del gasificador.

b.- *Gasificador de Flujo Descendente*, en éste tipo el aire fluye de arriba hacia abajo teniendo la zona de combustión a cierta distancia de la parrilla, el gas es extraído en la parte media o inferior del gasificador.

c.- *Gasificador de Flujo Cruzado*, el aire fluye en forma horizontal formando las cuatro zonas necesarias para que ocurra la conversión de combustible sólido a gaseoso, el gas se lo extrae en la parte media del equipo. En los tres tipos de gasificadores el combustible biomásico es ingresado por la parte superior.

2.- **EN RELACION AL TIPO DE LECHO:**

a.- *Lecho fijo*, En el cual el combustible es

soportado por una parrilla, el aire pasa a través del combustible y los gases producidos salen por la parte superior del gasificador.

Entre las principales ventajas se pueden anotar:

- Baja producción de cenizas
 - Alta eficiencia de conversión de combustible sólido.
- b.- *Lecho móvil*, Estos pueden ser de flujo ascendente, descendente y cruzado.
- c.- *Lecho fluidizado*, Se caracteriza por la formación de un lecho de biomasa en suspensión, por efecto de un flujo de aire vertical ascendente en la biomasa en forma de astillas de madera reducidas debido al contacto directo entre la biomasa y el aire, los procesos de transferencia de masa y energía ocurren con cierta facilidad, teniendo como consecuencia una distribución casi uniforme de temperatura a lo largo del equipo.
- Bajo estas condiciones, no se distingue en el gasificador, las zonas de secado, pirólisis, *gasificación y reducción.*

Las ventajas de este gasificador son:

- Se obtiene un gas limpio, los alquitranes generados son craqueados térmicamente en

compuestos más livianos, ya que el equipo trabaja a una temperatura del orden de 900 °C.

- Puede aceptar mayor humedad del combustible.
- Menor tiempo de residencia que los de lecho fijo
- Buen contacto gas sólido.

Entre las desventajas se pueden anotar las siguientes:

- Alto costo
- Alto contenido de carbón en la ceniza .

d.- Lecho de arrastre o en suspensión, En esta clasificación entran los gasificadores en que la granulometría de las partículas es tan pequeñas (0 - 1 mm) que son arrastradas por la corriente gaseosa al mismo tiempo en el que son gasificadas.

Entre las ventajas se tiene:

- No formación de alquitrán
- Producción de ceniza inerte
- Mayor capacidad para volumen del gasificador

Las principales desventajas son:

- Requiere oxígeno
- Mayor seguridad para el personal de operación.

3.- EN RELACION A LA FUENTE DE ENERGIA:

- a.- *Autotérmico*, En los que la energía necesaria para el proceso de gasificación proviene de la combustión parcial de la propia biomasa.
- b.- *Alotérmico*, La energía que alimenta al proceso es suministrada por una fuente externa que no es la misma biomasa que esta siendo gasificada.

4.- EN RELACION A LA PRESION :

- a.- *Baja presión*, Donde la presión de operación es próxima a la atmosférica, pudiendo ser positiva o negativa.
- b.- *Alta presión*, En los que la presión de operación es mayor que la atmosférica alcanzando valores de hasta 20 atmósferas.

CARACTERISTICAS DE LOS GASIFICADORES DE FLUJO DESCENDENTE

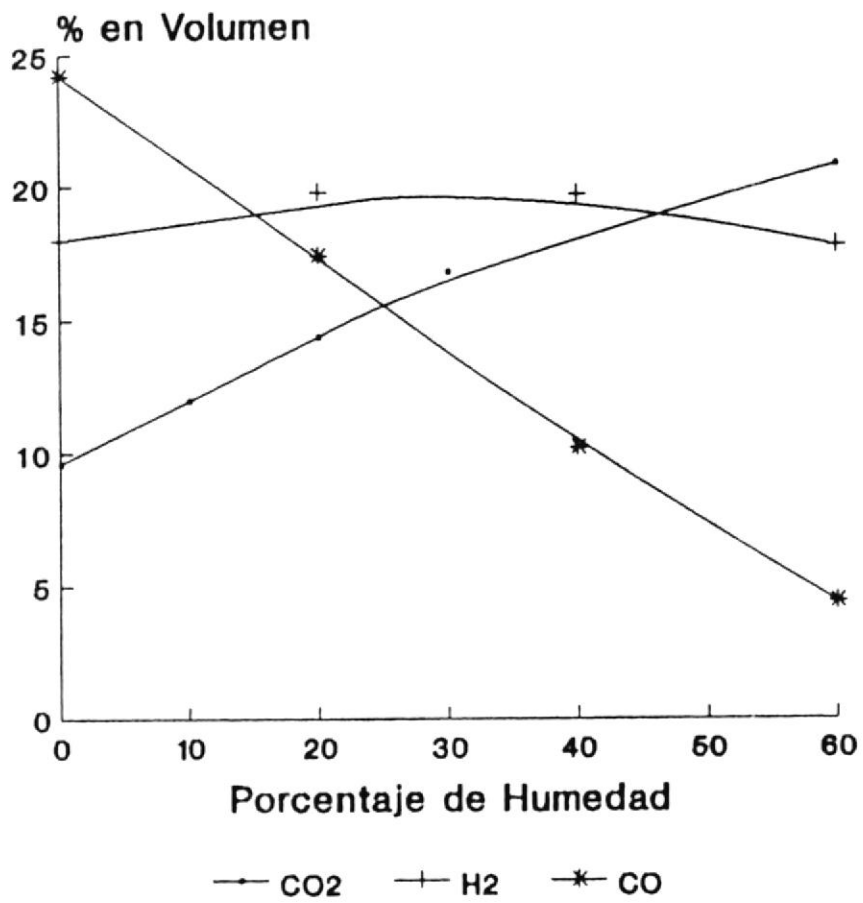
En este tipo de gasificadores, los volátiles (gases, vapores generados en la pirólisis) deberán atravesar la zona de combustión debiendo ésta encontrarse a suficientes altas temperaturas para originar la descomposición térmica (destilación destructiva) de la material volátil. Esto introduce a la zona de combustión interna.

El efecto del crisol se obtiene por medio de una reducción de área del gasificador (agargantamiento) y por una buena distribución de aire a la entrada.

La distribución homogénea del aire, lograda por medio de toberas de aire distribuidas simétricamente.

La zona de la carbonera debe proveer de un sistema de separación de agua y de una fracción de los gases condensables presentes en esta zona por otro lado, el gas cuando atravieza la zona de cenizas, es extraído por conductos laterales.

COMPOSICION GAS POBRE EN FUNCION DE LA HUMEDAD



FUENTE ref. 1

FIGURA 2:2

2:3 CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS Y GASEOSOS

Combustible en general, es una sustancia que contiene energía química debido a la configuración de sus átomos y moléculas la misma que puede ser liberada en reacciones de combustión y nucleares.

Se define la combustión como un conjunto de reacciones de oxidación rápidas confinadas en un espacio, son generalmente exotérmicas y luminosas. En las cuales el combustible se mezcla con el oxígeno generando productos no oxidables, liberando calor y emitiendo luz.

Según la fase los combustibles pueden ser, sólidos, líquidos o gaseosos teniendo especial interés en el presente trabajo por aquellos que se encuentran en el estado sólido y gaseoso.



Otras características que identifican a un combustible son: estado físico, del cual dependerá la construcción del dispositivo utilizado para la combustión; la composición elemental de la cual depende la cantidad de aire necesario para la combustión.

Un combustible se caracteriza además, por la forma en que se desarrolla su combustión en el tiempo y espacio, dependiendo de ésta característica por un lado la forma y dimensiones del espacio destinado a las reacciones y por otro lado, la concentración térmica alcanzada en dicho espacio.



2:3.1 COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los combustibles gaseosos pueden ser primarios o secundarios, siendo los primarios el gas natural y los gases licuados de petróleo. Mientras que los secundarios son los que se obtienen a partir del carbón o a partir de el proceso de gasificación de los diferentes tipos de biomasa, los mismos que son: gas de agua, gas de alto horno y gas de horno de coke.

El gas de alto horno es el que se produce en el proceso de fabricación del acero en un alto horno, posee un alto contenido de CO, su poder calorífico es considerado bajo y se produce con gran cantidad de impurezas.

Para analizar el proceso de combustión es necesario conocer las características de el combustible utilizado y además las propiedades de las mezclas con el oxígeno o el aire. Entre las propiedades más importantes de un gas estan, la densidad específica y el poder calorífico.

A su vez las propiedades de las mezclas gas-aire son; los límites de inflamabilidad, de presión, temperatura de llama y velocidad de llama.

Los combustibles gaseosos son los más limpios de todos, en relación a su fase, la velocidad de combustión se regula fácilmente y se consigue la combustión casi completa, reduciendo los niveles de contaminación.

DENSIDAD ESPECIFICA

Es la relación entre la densidad de un gas y la densidad del aire en las mismas condiciones de temperatura y presión. La densidad específica de los gases se puede determinar de una manera exacta en una balanza de densidades, observando la presión necesaria para producir densidades iguales de los dos gases comparados.

PODER CALORIFICO

El poder calorífico de los combustibles gaseosos varía de gran manera según su composición. Este valor se lo puede determinar a presión constante en un calorímetro para gases, en la cual el calor liberado por la combustión de una cantidad definida de gas es absorbido por una cantidad de aire o agua medida cuyo incremento de temperatura se observa.

Los poderes caloríficos de los gases se expresan generalmente en kJ/m³ o Kcal/m³. en condiciones específicas de presión, temperatura y contenido de vapor de agua.

La ASTM especifica como 575 kcal/kg como calor latente de condensación del agua para ser usado en el cálculo del poder calorífico inferior de los gases a 15.5 °C y 1 atmosfera de presión.

$$H_i = H_s - 167 w P/T$$

En donde H_s es el poder calorífico superior en kcal/m³,
 P es la presión del gas seco en mm de Hg, T es la
temperatura de los gases en °K.

LIMITES DE INFLAMABILIDAD

Los límites superior e inferior de inflamabilidad indican respectivamente, el porcentaje de gas contenido en el aire por debajo y por encima del cual la llama no se propaga.

Cuando es iniciada la llama en mezclas de composiciones comprendidas dentro de estos límites, se propagará, es decir se tendrán mezclas inflamables.

LIMITES DE PRESION

Definen el intervalo de presiones dentro del cual puede existir una llama, se ha realizado experiencias demostrativas al respecto, habiendose constatado en lo que se refiere al límite inferior que está por debajo de las 10^{-3} atmósferas, el límite superior es muy difícil de estimar debido a la peligrosidad de la mezcla, hasta el momento se han conseguido combustiones a presiones de hasta unas 100 atmósferas.

TEMPERATURA DE LLAMA

En la combustión de un determinado material pueden conseguirse llamas de temperaturas diversas, según las condiciones experimentales utilizadas; ejercen una

influencia determinante en ello el poder calorífico del combustible y su composición, el tipo de comburente (aire, oxígeno o una mezcla de ambos) y la velocidad global de combustión. Este último dato depende a su vez de la reactividad del combustible, de la forma y eficacia del sistema de combustión y de la temperatura inicial de los reactivos. El cálculo teórico de la temperatura de una llama (temperatura ideal) se basa normalmente en el supuesto de que la reacción se produzca de un modo completo, en proporciones estequiométricas, con mezcla perfectamente homogénea y en un corto tiempo (de modo que no se produzcan pérdidas de calor por el ambiente). Debe tenerse en cuenta además del calor unitario de la reacción, el calor sensible de los reactivos de manera que pueda obtenerse el contenido térmico global de los productos que intervienen: en consecuencia se calcula la temperatura de llama (temperatura adiabática ideal) multiplicando el calor específico medio de los gases quemados por su cantidad y dividiendo el contenido térmico global por este valor.

Las temperaturas que se obtienen mediante este cálculo son siempre más altas que las reales, por cuanto muchas de las hipótesis formuladas son prácticamente irrealizables.

COMBUSTION DEL GAS POBRE

La característica principal para la ignición del gas pobre es la temperatura y está determinada por la presencia de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO).

La razón de propagación de la llama esta influenciada por el hidrógeno con una velocidad de llama de 265 Cm/s y por el monóxido de carbono con una baja velocidad de llama de 40 Cm/s. Es muy importante tener conocimiento de los componentes energeticos de esta mezcla de gases.

Para tener una buena combustión del gas pobre no es suficiente con proveer de una cantidad corecta de aire y un chorro de gas combustible, es esencial la mezcla íntima de los dos fluidos.

Se debe tener siempre en cuenta que el término GAS POBRE no se refiere a una composición química específica, como es el caso de algunos derivados del petróleo (dieseSwy gasolina), ya que el comportamiento del gas pobre varía mucho debido a la amplia gama de posibles contenidos de HIDROGENO Y MONOXIDO DE CARBONO.

PODER CALORIFICO DEL GAS POBRE

El gas pobre tiene un contenido térmico relativamente bajo generalmente sólo de un 10 - 15 % con relación al gas natural la razón principal es el efecto de dilución del nitrógeno, puesto que este gas es inerte, pasa por el gasificador sin participar en ninguna de las reacciones químicas principales.

El gas final es una mezcla que contiene por lo menos un 50 % de nitrógeno.

Por lo tanto al utilizar oxígeno puro para alimentar la combustión en vez de aire se obtiene un gas de más alto contenido térmico, el costo adicional requerido y la complejidad del proceso lo excluyen de la mayoría de los usos en pequeña escala y en las zonas rurales de los países en desarrollo.

En principio, las potencias caloríficas se pueden calcular de los análisis completos, si se conocen todos los calores de las reacciones que tienen lugar durante la combustión. Se han de hacer varias aproximaciones especialmente que la combustión es completa y se produce CO_2 y H_2O .

Esto se puede lograr facilmente con un ensayo de laboratorio en donde la disociación de los compuestos presentes en el combustible deberá también tenerse en

cuenta, pero muchas veces es muy difícil por la gran cantidad y complejidad de los compuestos.

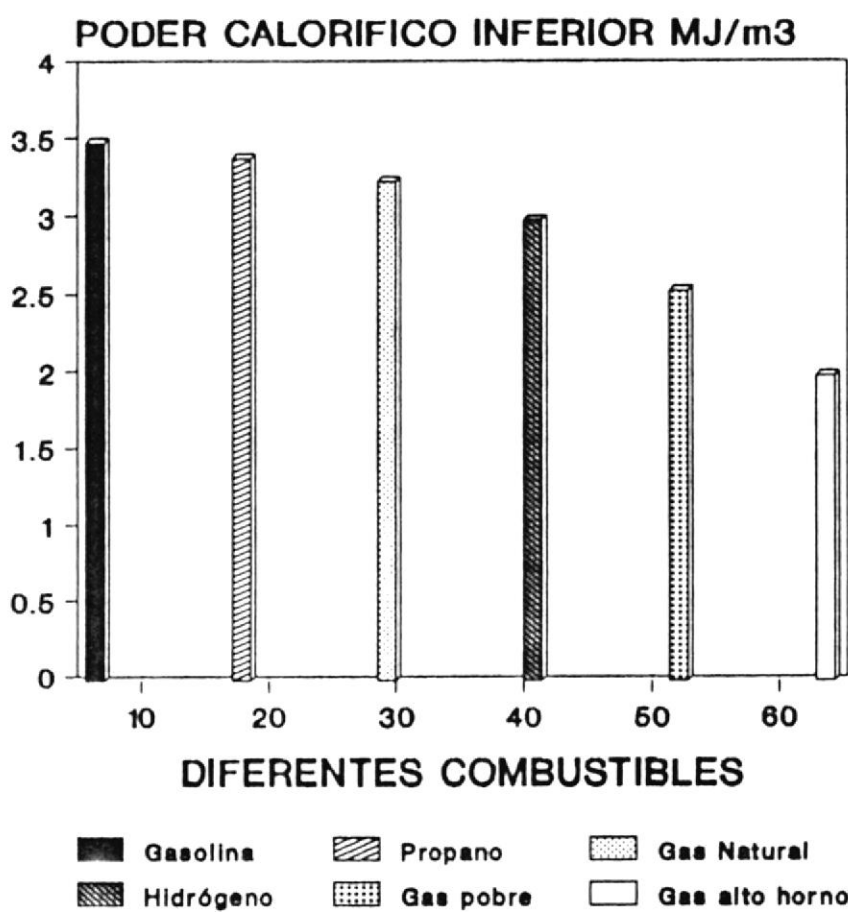
Particularmente cuando la temperatura es muy elevada las moléculas de H₂O y CO₂ tienden a disociarse y en el cálculo teórico del poder calorífico se han considerado la oxidación completa del HIDROGENO y del CARBONO.

La fórmula química para el cálculo de poder calorífico del gas pobre en base a los porcentajes de CO, H₂ y CH₄ es:

$$PC_{gp} = [\%CO] * 126.44 + [\%H_2] * 107.60 + [\%CH_4] * 359.0.$$

En [kJ/Nm³].

PODERES CALORIFICOS TIPICOS PARA MEZCLAS ESTEQUIOMETRICAS



FUENTE ref. # 1

FIGURA 2:3

2:3.2 COMBUSTIBLES SOLIDOS

Entre los combustibles sólidos se encuentran principalmente los fósiles y los de origen biomásicos. Los combustibles fósiles más conocidos son: el carbón mineral, el coque y la turba.

El carbón mineral es un combustible sólido, de color negro, originado por la descomposición de la vegetación antigua en un proceso anaeróbico, bajo la influencia de la humedad, el calor y la presión. Este compuesto principalmente de carbono, hidrógeno y azufre.

Este combustible se clasifica en varias formas, según su grado de metamorfosis va de lignito hasta meta antracita variedad, también se clasifican según su tamaño y uso.

El coque es un material sólido coherente que se obtiene del carbón, alquitran y residuos de petróleo.

Existen otras variedades específicas del coque como coque del petróleo, coque del alquitrán, es decir con una palabra que indica su origen.

La turba representa una etapa de la metamorfosis de la materia vegetal del carbón, es originado como producto de la descomposición y desintegración parcial de las plantas y pantanos en ausencia del aire, es un residuo perdo oscuro que posee una humedad elevada.

La biomasa, es toda materia organica de origen vegetal o animal que es posible convertir en energía, en su mayor parte se constituye por materia vegetal variando de simples algas a complejas maderas, ramas, plantas, raices, y frutos, su contenido energetico es relativamente uniforme del orden de 15000KJ/Kg. Lo cual es una de sus limitaciones desde el punto de vista energético, así como también el hecho de tener que transportarla a grandes distancias, por lo cual su mejor aplicación será para zonas rurales e industrias cuyos desechos sean biomásicos forestales, tales como: Papeleras, Madereras, Ingenios azucareros, etc.

ORIGEN DE LA BIOMASA VEGETAL.

Es un producto de la fotosíntesis teniendo una densidad energetica relativamente baja (cantidad de energía por unidad de masa). Las propiedades físicas fundamentales son: alta densidad, alta dureza y alta rijidez.

Químicamente se compone de celulosa y lignina pincipalmente.

La fotosíntesis es un proceso mediante el cual los vegetales usan la energía irradiada por el sol, generando la vida y crecimiento de las plantas, es decir la fotosíntesis se encarga de convertir la energía solar en energía química.

Los principales combustibles biomásicos son los residuos

forestales, como por ejemplo la leña y los residuos agrícolas como la cascarilla de arroz, de café, de cacao, tucas de maíz, cascara de maní, etc.

La combustión de los materiales sólidos como el carbón y la leña ocurre en varias fases.

Primeramente, existe desprendimiento de materia volátil formada principalmente por una fracción condensable que origina la fase líquida como lo son el alquitrán y el licor piroleñoso, y una fracción no condensable que origina la fase gaseosa la cual está formada por metano y monóxido de carbono en su mayoría.

Este desprendimiento se debe a la descomposición térmica del combustible, produciéndose su inflamación con el aire.

A las temperaturas de combustión normales, la combustión del residuo caliente sólido depende de la velocidad a la que el oxígeno contenido en el aire se difunde por la superficie.

El primer producto de la combustión que se crea en la superficie del carbón es el monóxido de carbono, éste gas combustible se convierte en dióxido de carbono por reacción con el aire que le rodea, a menos que se enfríe en alguna superficie.

2:4 PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES BIOMASICOS FORESTALES

2:4:1 LA ENERGIA ALMACENADA EN LA BIOMASA

La energía química almacenada en las fibras y tejidos de la biomasa vegetal puede convertirse en combustibles de mucho valor a través de procesos tales como: la combustión directa o la gasificación.

Las fibras y tejidos vegetales están constituidos principalmente por componentes orgánicos lignocelulósicos, agua y minerales provenientes de los nutrientes. Los principales componentes orgánicos son: C, H, O y los inorgánicos: N, Mg, P, Si, Fe, Na, K, Mn.

En un proceso de descomposición natural de la leña y cualquier otro residuo lignocelulósico decaen lentamente por la acción bacteriana, generándose gas carbónico y quedando un remanente de sales minerales en el suelo. En cambio el fuego permite una oxidación rápida de la biomasa con liberación intensa de calor.

PROPORCION DE LOS POLIMEROS EN LA MADERA

LEÑA	CELULOSA	HEMICELULOSA	LIGNINA
DURA	43%	35%	22%
SUAVE	43%	28%	28%

TABLA # 2:1

2:4.2 CARACTERISTICAS FISICO - QUIMICAS DE LA LEÑA Y PRINCIPALES RESIDUOS AGROFORESTALES.

Las propiedades físicas y químicas de la leña son importantes para el diseño y la operación de los sistemas de combustión, carbonización y gasificación. Las principales características de los lignocelulósicos para su utilización como combustibles son:

- * PODER CALORIFICO
- * CONTENIDO DE HUMEDAD Y VOLATILES
- * CONTENIDO Y PUNTO DE FUSION DE LAS CENIZAS
- * ANALISIS INMEDIATO
- * ANALISIS ULTIMO
- * DENSIDAD ESPECIFICA
- * DENSIDAD APARENTE
- * FORMA y TAMANO DE LA LEÑA

PODER CALORIFICO DE UN COMBUSTIBLE LIGNOCELULOSICO

Corresponde al calor producido por la combustión completa de una cantidad unitaria de masa, en un proceso a volumen constante, en una bomba calorimétrica de oxígeno en condiciones normalizadas. Incluye el calor latente del vapor de agua en los productos de combustión. Es numéricamente igual a su calor normal de combustión con el signo cambiado.

Esta es una propiedad fundamental para todo tipo de

Combustible la que constituye en muchos procesos de ingeniería la energía disponible inicialmente.

En el caso de la leña el poder calorífico es función de el porcentaje de elementos constituyentes además de su contenido de humedad relativa .

A partir de resultados de la bomba calorimétrica y el análisis de regresión se recomienda la siguiente formula de Dulong, para el cálculo del poder calorífico superior de un lignocelulósico.

$$\text{PCS. (BS) [KJ]} = 479.3*(C) + 667.6*(H) + 58.8*(O) - 1207.7*(S) - 8419.7 .$$

Donde; C, H, O, S, representan los porcentajes gravimétricos del Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Azufre en base seca.

Por otro lado se requiere energía para evaporar el agua formada en la combustión, esta energía generalmente no se recupera por lo cual la energía real que se puede extraer del combustible es generalmente menor que el poder calorífico superior.

CONTENIDO DE HUMEDAD Y VOLATILES

La humedad presente en la leña tiene el doble efecto de reducir el poder calorífico, ya que se requiere energía para evaporar el agua contenida en los poros del sólido, además reduce la cantidad efectiva de biomasa.

El contenido de humedad de la biomasa depende del tipo de combustible, origen y procesamiento a que es sometido antes de ser utilizado en un gasificador.

Se puede hablar de tres tipos de humedad:

HUMEDAD DE SATURACION O INHERENTE.- Es el contenido de humedad que el sólido posee cuando esta en equilibrio en una atmosfera del 96 al 97 % de humedad relativa, se la encuentra en los intersticios del sólido biomásico.

HUMEDAD SUPERFICIAL.- Se refiere a la humedad presente en la superficie del sólido biomásico y se encuentra por encima de la humedad de saturación.

HUMEDAD DE DESCOMPOSICION.- Es la formada por los compuestos orgánicos del combustible al descomponerse por calor, se requieren temperaturas de 200 a 225 °C , las cuales se encuentran muy por encima de las temperaturas necesaria para eliminar la humedad de saturación y superficial.

CONTENIDO DE MATERIAL MINERAL EN LOS PRINCIPALES PRODUCTOS LIGNOCELULOSICOS

LIGNOCELULOSICO	MINERALES (% BASE SECA)
PAJA DE CEBADA	10.30
CORONTO DE MAIZ	1.5
CASCARA DE ARROZ	16-23
RAMAS DE ARBOLES	3.0
MADERA	0.1-1
PEPAS DE DURAZNO	0.4
CASCARA DE MANI	1.5
CARBON VEJETAL	2-5
CARBON DE PIEDRA	5-17

TABLA # 2:2

fuelle ref. 10

La formación de volátiles y su composición dependen tanto de la rapidez de calentamiento y temperatura final alcanzada, como de la composición del lignocelulósico (contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa).

En general se puede decir que el contenido de lignina influye en la contextura del remanente carbonizado, mientras que los contenidos de celulosa y hemicelulosa tienen influencia sobre la formación de fracciones volátiles.

CONTENIDO Y PUNTO DE FUSION DE LAS CENIZAS

El contenido de las cenizas de los principales lignocelulósicos incluyendo a la leña fluctua entra 0.1 al 20% de donde el 95 % de las cenizas está formado por

óxidos minerales como por ejemplo:

SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 .

En el caso de la leña, los principales componentes son: Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , NaO . Para residuos como cascara de arroz la mayor parte de la ceniza corresponde a SiO_2 .

Las cenizas pueden fundirse parcialmente formando escoria o en ciertos casos puede vaporizarse parcialmente originando partículas finas difíciles de filtrar.

El SiO_2 es considerado como uno de los componentes de ceniza más problemáticos por su relativo bajo punto de fusión y elevada presencia de en algunos productos como (paja, cascara de arroz, bagazo, etc.).

Un porcentaje de ceniza no mayor al 5% es aceptado como límite para la operación del gasificador sin escorias, contenidos mayores requieren se limite la temperatura de operación a no más de $1100\text{ }^\circ\text{C}$, caso contrario es necesario que se provea de un drenaje de escoria líquida al equipo.

EL ANALISIS INMEDIATO

Proporciona información acerca de los porcentajes en masa de:

- *HUMEDAD*.- Es la pérdida de peso resultado de secar el combustible a temperaturas entre 104 y $110\text{ }^\circ\text{C}$,

ver apendice # 1.

- *MATERIA VOLATIL.*- Formada por gases y vapores, se considera como la pérdida de peso, menos la humedad, que se obtiene por el calentamiento del combustible durante siete minutos en un atmosfera inerte a una temperatura de $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$, se compone principalmente de los gases combustibles: hidrógeno, monóxido de carbono, metano, compuestos sulfurosos volátiles y algunos gases incombustibles como el anhídrido carbónico y el vapor de agua.

- *CARBONO FIJO.*- Que consiste en el residuo carbonizado menos la ceniza.

- *LA CENIZA.*- Es el residuo inorgánico que queda después de quemar el combustible en un horno, cuya temperatura final esta entre 700 y $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$; se compone de hierro, calcio, sílice, alúmina y en menores cantidades magnesio, sodio y potasio.

La suma de estos porcentajes de la humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas debe ser igual a 100.

EL ANALISIS ULTIMO

consiste en determinar la composición de combustible en porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y también cenizas.

ANALISIS ULTIMO DE LA LEÑA SECA

CARBONO	49 +/- 1.0
HIDROGENO	6.1 +/- 0.1
OXIGENO	42.5 a 44.6
NITROGENO	0.1 a 0.3
CENIZAS	0.2 a 1.0

TABLA # 2:3

Referencia # 6.

En la práctica ASTM, los valores de oxígeno e hidrógeno incluyen además de los correspondientes a las sustancias orgánicas, los que se presentan en forma de humedad y los del agua que forman parte de los silicatos minerales.

LA DENSIDAD ESPECIFICA.- Llamada también relativa, es la relación entre el peso del combustible macizo y el peso de un volumen igual de agua.

LA DENSIDAD APARENTE.- Es el peso por metro cúbico de combustible en trozos; esta propiedad varía de acuerdo con la densidad específica, distribución de tamaño, contenido de humedad y forma.

FORMA y TAMAÑO DE LA LEÑA

La forma del combustible a gasificar repercute en la rentabilidad del sistema. La densificación de la biomasa (conocida también como compactación) permite proveer de un material más homogéneo.

Los principales tipos son:

- 1.- Cubicación
- 2.- Briquetaje
- 3.- Paletización

La cubicación es una compactación simple por medio de presiones moderadas, el briquetaje utiliza presiones medias del orden de 10 atmósferas, mientras que el paletizaje requiere de presiones del orden de 100 atmósferas.

El contenido energético volumétrico específico es mucho más elevado.

El tamaño adecuado de la materia prima es importante debido a que de él depende el flujo de combustible biomásico en el gasificador y esta relacionado con la operación continua del mismo. Además influye sobre la caída de presión a través del gasificador.

En general, partículas muy pequeñas producen un incremento en la caída de presión a través del lecho de combustible, por otra parte partículas más grandes originan canalización y carbonización incompleta debido al corto tiempo de residencia del combustible en la zona de carbonización.

Se ha demostrado experimentalmente que la relación entre el tamaño de partículas y el área transversal mínima debe ser 3 veces la mayor dimensión de la biomasa, para evitar la carbonización del combustible.

El tamaño de la biomasa apropiado para la gasificación está entre 5 y 8 cm en el lado mayor.

COMPARACION ENTRE LA LEÑA y EL CARBON PARA SU APLICACION EN GASIFICADORES.

Cuando el uso final del gas es como combustible directo, es decir para ser empleado en una hornilla o quemador se debe utilizar la leña que se tiene la presencia de productos piroleñosos, pero cuando el uso va a ser en motores de combustión interna se aconseja usar carbón vegetal para evitar la presencia nociva de los productos antes indicados los mismos que reducirán la vida del motor.

DESVENTAJAS DEL USO DE CARBON VEGETAL

algunas de las desventajas que provocan una disminución de la relación final: volumen de gas / peso de carbón requerido.

- Gran parte de los volátiles que se desprenden en la carbonización son perdidos siendo arrastrados hacia la atmósfera.
- Hay pérdidas de calor en el proceso de carbonización por el intercambio con el medio ambiente y en el enfriamiento.
- Hay una elevada formación de carboncillo (carbón fino) en el manejo y transporte del carbón.

VENTAJAS DEL USO DE CARBON VEGETAL

- Ahorro en el transporte de la materia prima por ser un material más liviano que la madera.
- El gas producido contiene menores cantidades de productos piroleñosos

VENTAJAS DEL USO DE LA LEÑA

- El rendimiento global aumenta ya que no hay pérdidas en la carbónización ni en el transporte, por lo tanto la relación volumen de aire/masa de leña tiende a aumentar.

DESVENTAJAS DEL USO DE LEÑA

- El gas producido contiene grandes cantidades de materiales pirolíticos.
- El transporte de la leña hasta la instalación de gasificación tiene un costo más alto.

2:5 CONSUMO DE LEÑA EN LA PEQUEÑA INDUSTRIA DEL ECUADOR

La leña es un recurso energético muy importante en el país a nivel domestico en los nucleos familiares de escasos recursos tanto de las áreas rurales como de las urbano - marginales. El Instituto Nacional de Energía (INE), en su serie de Balances Energéticos estiman que el consumo residencial de leña es de alrededor de 2,0 kg. por persona por día, siendo 1,9 kg. en la Costa, 2,1 kg. en la Sierra y de 2,9 kg. en el Oriente. Aunque en la sierra se requiere calefacción, el consumo tiende a ser del orden del encontrado en la costa lo que se atribuye a que los suministros de leña son escasos en algunas regiones tendiendo a reducir el nivel medio de consumo. El elevado consumo en la región oriental no tiene influencia en el promedio dada la reducida población de esta región.

En lo que respecta al consumo de leña en la pequeña industria, ésta se indica en los balances energéticos nacionales de la tabla # 5, tomada de una publicación del INE en 1990, en la cual se puede ver que el consumo de la leña en el país se ha incrementado.

La mayor parte de éstos recursos se encuentran en el Oriente y en la parte norte de la costa, en la Sierra aparecen más los problemas de deforestación.

PORCENTAJES DEL CONSUMO FINAL POR ENERGETICOS EN EL ECUADOR

RECURSO	1980	1985	1986	1987	1988
LEÑA	-----	7.25	7.24	8.21	8.06
BAGAZO	27.06	17.53	15.59	21.14	20.7
PETR *	58.79	62.23	63.7	56.52	57
ELEC @	14.15	12.99	13.47	14.13	14.1

* PETROLEO

@ ELECTRICIDAD

TABLA # 2:4

Referencia 13.

POTENCIAL ENERGETICO FORESTAL

Los recursos forestales remanentes en el Ecuador se muestran en la siguiente tabla.

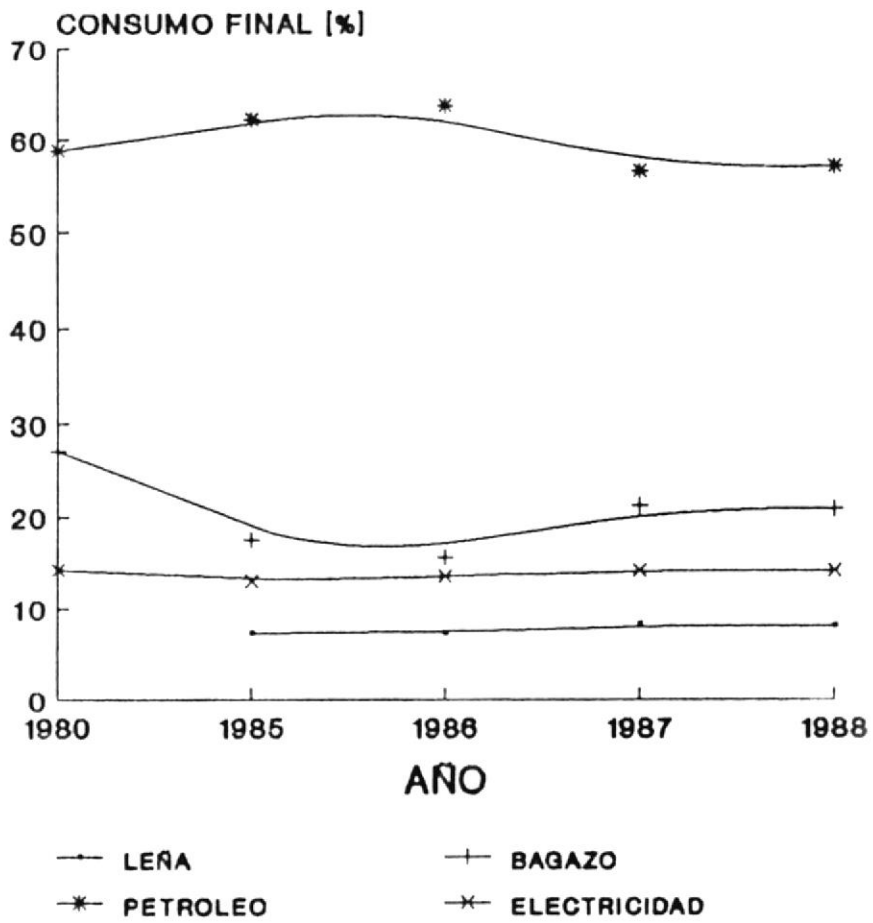
RECURSOS FORESTALES REMANENTES EN EL ECUADOR

TIPO DE BOSQUE	SUPERFICIE (ha.)
Tropical humedo	8528000
Tropical seco	420000
Subtropical humedo	2754000
Manglares	120000
Plantaciones	53000
Total	11875000

TABLA # 2:5

Fuente: (PNUD/BM, 1985).

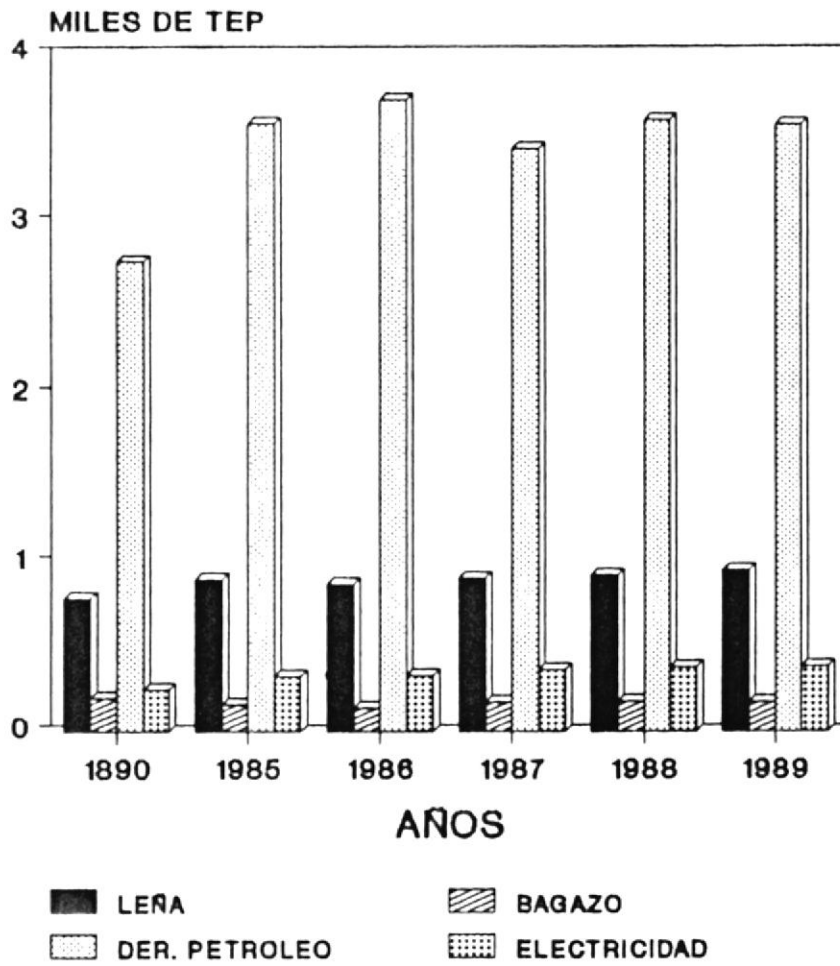
CONSUMO FINAL DE ENERGETICOS EN PORCENTAJES



Fuente : INE, 1990

FIGURA 2:4

CONSUMO FINAL ENERGETICOS



Fuente: INE, 1990

FIGURA 2:5

CAPITULO III

ANALISIS TEORICO

3:1 ANALISIS ESTEQUIOMETRICO DE LA COMBUSTION DE LA LENA

Para que el combustible se oxide completamente es necesario que todo el carbono presente en el combustible se combine con el oxígeno para dar dióxido de carbono (un gas incombustible); todo el hidrógeno se combine con el oxígeno para dar agua y que todo el azufre se combine con el oxígeno para dar dióxido de azufre, si esto ocurre la combustión se denomina completa (cc), y se denomina combustión incompleta si la transformación se realiza en forma parcial.

En el ultimo caso los productos de la combustión contienen además de los antes mencionados; monóxido de carbono (un gas combustible) como producto de parte del carbono no oxidado, hidrógeno que aparece en forma libre o formando parte de hidrocarburos sin quemar.

Todas las sustancias iniciales que sufren el proceso de combustión se denominan reactantes y las sustancias que resultan del proceso se denominan productos.



COMPOSICION QUIMICA DEL AIRE SECO

MOLECULA GASEOSA:	% VOL.	% MASA	P M
OXIGENO	20.99	23.19	32
NITROGENO	78.03	75.47	28
ARGON	0.94	1.30	39.9
ANHIDRIDO CARBONICO	0.03	0.04	44
HIDROGENO	0.01	0	2.0
AIRE SECO	100	100	28.9

TABLA # 3:1

Fuente ref. # 11

En la mayoría de los procesos de combustión el oxígeno se suministra como aire y no como oxígeno puro.

Para cálculos de ingeniería es aceptable utilizar los siguientes valores:

	% Volumen	%masa
NITROGENO	79	76.8
OXIGENO	21	23.2

3:1.1 QUIMICA DE LA COMBUSTION

El producto resultante de la combustión incompleta de la biomasa vegetal es una mezcla gaseosa de monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno, metano y otros hidrocarburos, vapor de agua.

La parte más importante de ésta mezcla es el monóxido de carbono e hidrógeno gaseoso ya que son productos combustibles.

Las siguientes relaciones estequiométricas servirán de manera muy simplificada para la evaluación del rendimiento del gas cuando se gasifica la leña.

1 kg de leña seca se compone de :

0,5 kg de carbono; 0,06 kg de hidrógeno; 0,44 kg de oxígeno.

La combustión completa significa que el carbono reaccionará completamente con suficiente oxígeno para formar dióxido de carbono y el hidrógeno reaccionaría con el oxígeno para formar agua. Esto requerirá:

$$\frac{0,50 * 32}{12} = 1,33 \text{ kg de oxígeno para formar CO}_2$$

$$\frac{0,06 * 16}{2} = 0,48 \text{ kg de oxígeno para formar H}_2\text{O}$$

$$\text{Total} = 1,81$$

En la estructura de la leña solo hay 0,44 kg de oxígeno la combustión completa solo puede ocurrir si 1,37 kg de oxígeno adicional son introducidos al recinto de combustión.

En el proceso de gasificación no se desea una combustión total, la cantidad adicional de oxígeno debe ajustarse cuidadosamente.

Si se supone que el 70 % del carbón se oxida a CO y un 30 % a CO₂, se puede calcular la cantidad necesaria de oxígeno por kg de leña.

$$\text{Para formar CO:} \quad \frac{0,5 * 0,7 * 16}{12} = 0,47 \text{ kg.}$$

$$\text{Para formar CO}_2 : \quad \frac{0,50 * 0,3 * 32}{12} = \frac{0,40 \text{ kg.}}{0,87 \text{ kg de O}_2}$$

En la estructura de la leña ya están presentes 0,44 kg de oxígeno, es necesario agregar los 0,43 kg de oxígeno restantes por medio del aire.

Un kg. de aire seco contiene 0,77 kg de nitrógeno y 0,23 kg de oxígeno.

La masa de aire (ma) correspondiente a 0,43 kg de oxígeno es :

$$m_a = 0,43 + \frac{0,43 * 0,77}{0,23} = 1.87 \text{ kg}$$

Siendo el peso específico del aire $1,29 \text{ kg/m}^3$, para las condiciones normales, en volumen el requerimiento de aire será:

1.44 Nm^3 de aire.

Estos cálculos son simplificados ya que se ha ignorado el contenido de agua de la madera así como la humedad del aire y además no se tomó en cuenta la formación de otros componentes que no sean CO y CO₂.

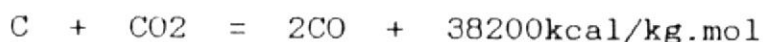
3:2 INFLUENCIA DE LA VARIACION DE LOS DIFERENTES PARAMETROS EN EL PROCESO DE OBTENCION DEL GAS POBRE

Los factores de los cuales depende la composición del gas resultante serán todos aquellos que afecten el equilibrio, a la velocidad de reacción gas - biomasa, las propiedades físicas y químicas del combustible biomásico utilizado, además el comburente (aire / oxígeno), la temperatura del proceso, el tiempo de contacto comburente - combustible.

LA TEMPERATURA :

Esta gobierna las distintas zonas de reacción anotadas en el capítulo dos.

La reacción más importante es la de Bouduard, la cual es la clave para la reducción del CO₂ formado inicialmente.



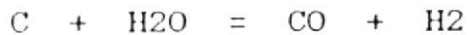
En la cual se produce monóxido de carbono para temperaturas elevadas como se deduce de la expresión:

$$\log k_p = 9,1106 - (8841,7/T)$$

$$k_p = \frac{p^2_{CO}}{p_{CO_2}}$$

que permite conocer las composiciones de equilibrio del gas pobre, en función de la temperatura.

A 1000 °C la reacción es completa, a 650 °C es de un 50%. La elevación de temperatura también influye favorablemente la elevación de la temperatura en la conversión del vapor debido a la reacción:



Esta elevación de la temperatura aumenta el rendimiento porque crece la relación CO/H₂ en los productos del gasificador.

LA REACTIVIDAD DEL CARBÓN:

De este parámetro también depende la velocidad de la reacción de reducción y en función de este parámetro variará el tiempo de contacto carbón - aire para llegar al equilibrio. Depende de la porosidad interna y forma en que se ha pirolizado.

EL TIEMPO DE RESIDENCIA DEL COMBURENTE:

Dependiendo de la magnitud de este parámetro ocurrirán las diferentes reacciones en el gasificador de diferentes maneras.

La característica esencial en el proceso de obtención de gas pobre es la restricción del suministro de aire para que la combustión no se extienda a toda la masa de combustible biomásico, con el fin de que el gasificador trabaje como tal y produzca gases combustibles.

EL COMBURENTE UTILIZADO:

Dependiendo del comburente empleado (oxígeno o aire), en sus diferentes proporciones (O_2 , N_2 , H_2), los productos en el gasificador variarán en su composición. Al emplear aire el poder calorífico del gas resultante será menor que si se utilizara oxígeno puro, ya que el nitrógeno contenido en el aire se constituye en una carga térmica bajando el poder calorífico del gas pobre.

EL TAMAÑO DE LA LEÑA:

El tamaño de la leña a gasificar condiciona la homogeneidad del lecho intimamente relacionada el buen funcionamiento del gasificador.

A medida que aumenta el tamaño del combustible biomásico la altura del lecho debe ser mayor para lograr gasificar la biomasa, así mismo al aumentar la altura del lecho aumenta la dificultad para su homogenización y aumenta la pérdida de carga.

Los trozos finos además de contribuir a la pérdida de carga de los gases hacen al lecho más compacto y originan la formación de canales y escorias que dificultan la marcha del proceso.

El tamaño del combustible tiene influencia sobre la caída de presión a través del gasificador. Teóricamente sería deseable proporcionar al aire de entrada la mayor



cantidad de área posible del sólido para obtener una velocidad de gasificación favorable y una elevada velocidad de reacción, para evitar la canalización de los trozos de madera se tiene un valor experimental para la relación entre el plato garganta y la mayor dimensión de la leña troceada debe tener un valor de por lo menos 6.8.

En general las partículas más pequeñas ocasionan un aumento en la caída de presión a través del lecho de combustible, mientras que los trozos muy grandes originan canalización y combustión incompleta debido al corto tiempo de residencia del combustible en la zona de carbonización y al mucho espacio vacío.

3:3 DIAGRAMA DE OSTWALD DE LA LENA

Este diagrama esta formado por un triángulo rectángulo, en al eje de las abscisas se colocan los porcentajes de O₂ y sobre las ordenadas el porcentaje de CO₂.

El valor máximo del porcentaje de oxígeno corresponde a la concentración atmosférica (21%) y el máximo porcentaje de CO₂ corresponde al valor obtenido de la combustión completa con aire estequiometrico.

El diagrama de Ostwald realaciona cuatro porcentajes volumétricos como son: %CO₂, %CO, %O₂ y %EA (exceso de aire).

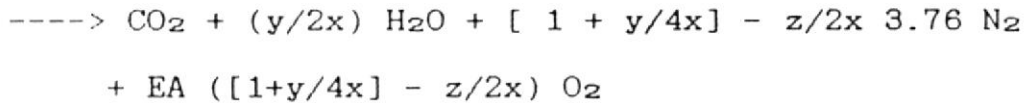
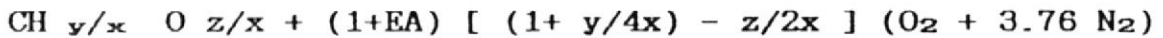
Conociendo dos de estos valores se pueden hallar los dos restantes. Para construir este diagrama se requiere conocer la composición en porcentaje del combustible y asumir que durante la combustión no existe la formación de hollín, es necesario que todo el hidrógeno arda completamente y que el único producto de la combustión incompleta sea el CO, lo cual es suficiente para fines tecnológicos.

La linea separadora entre la zona correspondiente a el exceso de aire y la deficiencia del mismo se la obtiene trazando una linea que une los puntos correspondientes a CO₂ máximo y el valor del O₂ obtenido cuando se tiene combustión estequiométrica con formación del máximo CO y el porcentaje de CO₂ es igual a cero.

ANALISIS DE LA COMBUSTION

$$C \ 4.16 \quad H \ 6 \quad O \ 2.75$$

$$x = 4.16 \quad y = 6 \quad z = 2.75$$

ECUACION IDEAL DE COMBUSTION DE LEÑA

x, y, z; son los % volumétricos del carbono, hidrógeno y oxígeno.

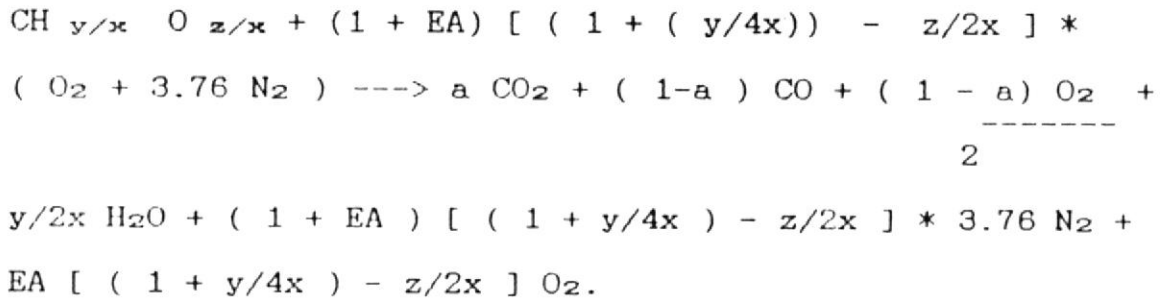
$$CO_2) \ max = \frac{1}{1 + 3.76 [(1+ y/4x) - z/2x]} * 100$$

$$CO_2) \ max = \frac{1}{1 + 3.76 [1.36 - 0.33]} * 100$$

$$CO_2) \ max = 20.53 \ %$$

La línea que separa la zona correspondiente a la combustión con exceso de aire y la zona con deficiencia de aire se obtiene uniendo el punto de CO₂ máximo con el punto correspondiente al valor del % de oxígeno obtenido cuando se tiene combustión estequiométrica con la formación de un valor máximo de % CO y el % de CO₂ igual a cero.

Para hallar este porcentaje se considera el caso general:



Si $\text{CO}_2 = 0$; $\text{EA} = 0$ y $a = 0$

$$\left. \begin{array}{l} \% \text{O}_2 \\ \text{CO} = \text{máximo} \end{array} \right\} = \frac{\frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{2} + \left(1 + \frac{Y}{4x} - \frac{z}{2x} \right) 3.76} * 100$$

También se puede expresar en porcentajes de máxima concentración de CO_2 .

$$\left. \begin{array}{l} \% \text{O}_2 \\ \text{CO} = \text{máximo} \end{array} \right\} = \frac{\text{CO}_2 \text{ máximo}}{\text{CO}_2 \text{ máximo} + 200} * 100$$

$$\left. \begin{array}{l} \% \text{O}_2 \\ \text{CO} = \text{máximo} \end{array} \right\} = \frac{20.53}{20.53 + 200} * 100 = 9.3 \%$$

Los valores del % CO constante están representados por una familia de segmentos paralelos a la hipotenusa de combustión estequiométrica y para trazarlos es suficiente unir los puntos de CO_2 máximo en el eje de las ordenadas y $\text{O}_2 = 21$ % en el eje de las abscisas.

El porcentaje de CO se lo obtiene por la siguiente relación:

$$\% \text{ CO} = 2 [\% \text{ O}_2]$$

<u>% O₂</u>	<u>% CO</u>
0.5	1
1	2
1.5	3
2	4
2.5	5
3	6
3.5	7
4	8



Las líneas correspondientes al porcentaje de exceso de aire constante se hallarán con la siguiente relación, en la cual se obtendrá un valor para el CO₂ y se graficarán segmentos paralelos a la línea de combustión estequimétrica.

$$\text{CO}_2 \left| \begin{array}{l} = \frac{1}{1+(1+EA) (1+ y/4x - z/2x) 3.76 + EA (1+ y/4x)} \\ EA=\text{const.} \end{array} \right.$$

% CO ₂	EA
18.5	10 %
16.9	20 %
15.5	30 %
14.4	40 %
13.4	50 %
12.5	60 %
11.7	70 %
11.0	80 %
10.4	90 %
9.9	100 %
7.8	150 %
6.5	200 %
4.9	300 %
3.8	400 %
3.2	500 %

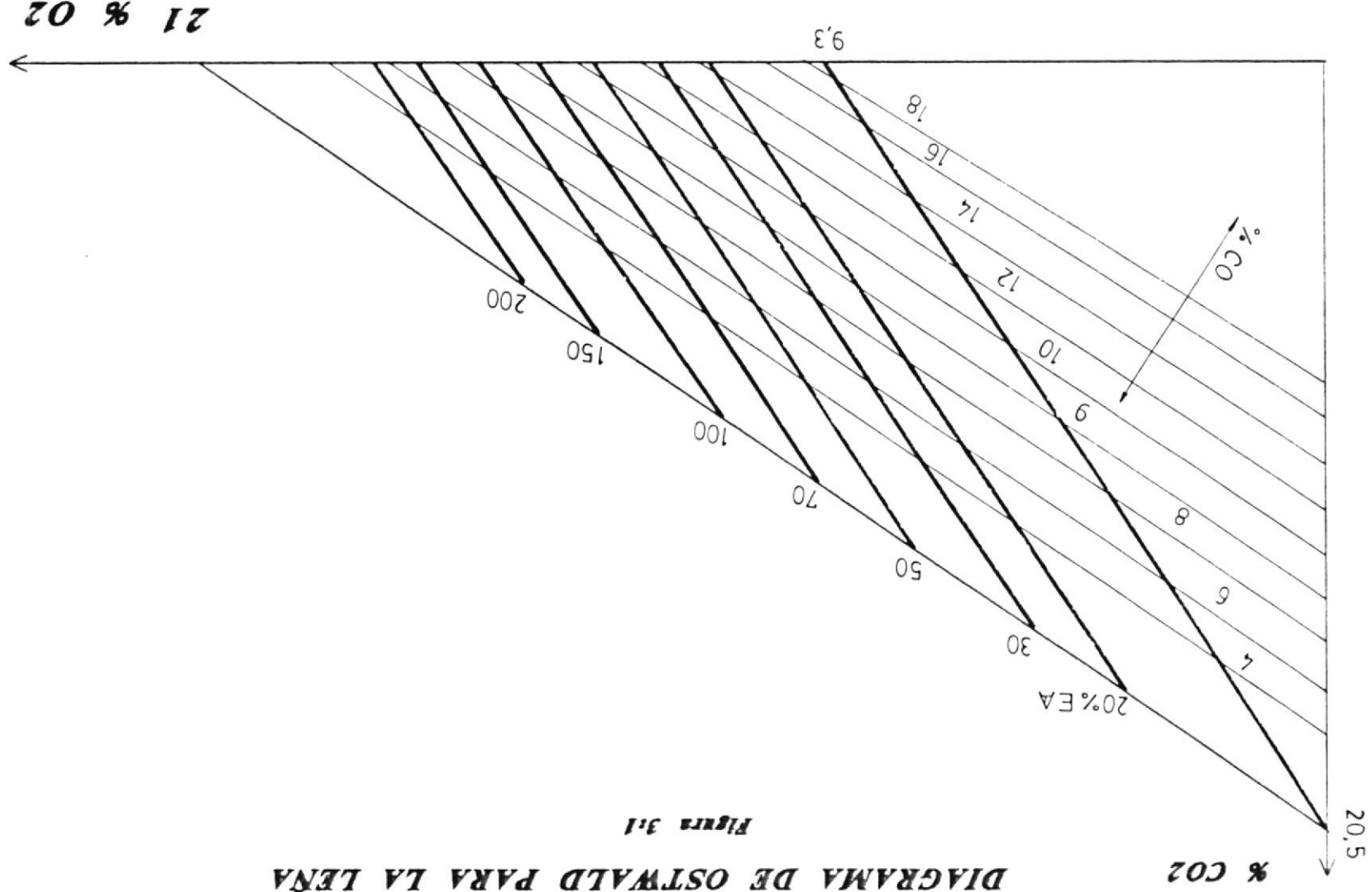
Para determinar la concentración de gases producidos en el gasificador se utilizó el Fyrite el cual mide por absorción los porcentajes de CO₂ y O₂ en volumen. El porcentaje de CO se determinó mediante el diagrama de Ostwald.

Los demás porcentajes de H₂, N₂ y H₂O se determinaron por la ecuación de combustión de la leña asumiendo un análisis último de 44 % de O, 6 % H y 50 % de C. Asumiendo también la no formación de CH₄ durante las reacciones químicas.

La fórmula química en base mol es : C 4.16 O 2.75 H6.

DIAGRAMA DE OSTWALD PARA LA LENA

FIGURA 3.1



CAPITULO IV

DISEÑO DE UN GASIFICADOR

PARA USO TERMICO

En ésta tesis se pretende dar ciertas guías para el diseño de gasificadores, las cuales están basadas en consideraciones teóricas y también en la evaluación de diseños que operan exitosamente.

4:1 PRINCIPALES COMPONENTES DE UN GASIFICADOR

Un gasificador se compone basicamente de las siguientes partes: Carbonera o Bunker, Crisol, Cono, Recubrimiento aislante, Plato Garganta, Boquilla, Rejilla y accesorios para el ingreso de aire.

También cuentan con accesorios de limpieza y enfriamiento para el gas pobre que se utiliza en sistemas de fuerza motriz tales como:

Separador de ciclón, Filtro de mangas,
Filtro humedo e intercambiador de calor.

En el presente caso el gasificador no dispondrá de un tren de limpieza, ya que su aplicación será para combustión directa en un horno para calcinación de piedra caliza.

CARBONERA. - Es la parte superior del gasificador, consta de un recipiente cilindrico en donde se introduce la leña fresca que se desea gasificar y una tapa superior provista de un resorte con la finalidad de ajustar la tapa y además que permita el alivio de presiones excesivas en la operación del gasificador.

En este recinto ocurre la pirólisis y el secado de la leña por lo cual es la zona donde las temperaturas son relativamente más bajas (100 - 400 °C).

En el presente diseño la carbonera se constituye de un tubo de cemento de 7.5 cm. de espesor de fabricación nacional.

CRISOL. - En esta parte del equipo ocurren las reacciones químicas de oxidación y reducción. Se encuentra en la parte central del gasificador debajo del cono y sobre los ladrillos refractarios en posición de canto colocados en la parte inferior.

En un gasificador de flujo descendente la forma de ésta cámara debe ser tal que permita a los volátiles (gases de la pirólisis) atravesar la zona de combustión, debiendo esta encontrarse a altas temperaturas para originar la descomposición de los mismos (cracking), lo cual introduce al concepto de crisol de combustión.

El efecto crisol se obtiene precisamente debido a una reducción en el área del gasificador (agargantamiento) y por una buena distribución en la entrada de aire

CONO. - Constituye el primer agargantamiento en el gasificador de flujo descendente y se encarga de unir la carbonera con el crisol, facilitando el descenso de la leña pirólizada hacia la zona de combustión.

RECUBRIMIENTO AISLANTE. - Es necesario proporcionar al equipo de gasificación de un material aislante térmico con la finalidad de conservar el calor en el interior del gasificador, principalmente en las zonas de reducción y combustión en los cuales las temperaturas deben ser elevadas para provocar las reacciones químicas de reducción y oxidación. En este gasificador se utilizaron materiales locales (nacionales) para la construcción de el recubrimiento aislante, consistiendo éste en ladrillos de arcilla y una mezcla de mortero (refractario local) con cemento gris Portland y arena.

PLATO GARGANTA. - En un gasificador de flujo descendente constituye la segunda garganta, por la cual debe atravesar el carbón que ha estado previamente en la zona de combustión, de tal forma que en la parte inferior del gasificador ocurran las reacciones de reducción, es decir la formación de CO (monóxido de carbono), que constituye el principal componente energéticamente activo además del hidrógeno gaseoso.

Los diferentes componentes se muestran en la figura # 4:1 y 4:2.

ACCESORIOS PARA EL INGRESO DEL AIRE. - El aire necesario para la zona de combustión es proporcionado por medio de un soplador, el cual deberá vencer las caídas de presión que se presentarán en la operación de el gasificador, en el caso de ser usado el gas pobre para fuerza motriz solo necesitará el soplador de aire para el arranque y estabilización de la producción de gas combustible, no siendo así para el caso del uso térmico directo.

Se utilizó tubería de acero galvanizado para la construcción de las toberas de alimentación de aire.

4:2 DIMENSIONAMIENTO DE UN GASIFICADOR PARA COMBUSTION DIRECTA.

Los más importantes parámetros de diseño en un gasificador se los conoce en base a la experiencia en la construcción y operación de estos equipos, desde hace alrededor de cincuenta años esta tecnología se ha venido desarrollando debido a la escasez y por ende alto costo del petróleo en la segunda guerra mundial.

Los principales parámetros de diseño son los siguientes:

- Producción de gas
- Poder calorífico inferior de la leña
- Diámetro de la carbonera
- Diámetro del plato garganta
- Posición de las toberas para el ingreso del aire
- Velocidad del aire al ingreso
- Diámetro de las toberas para el ingreso del aire
- Angulo del cono
- Diametro del crisol
- Altura de la zona de reduccion
- Altura de la carbonera.



Los gasificadores son diseñados para cumplir con ciertas necesidades energéticas, las cuales pueden ser: Combustión directa y en motores de combustión interna.

4:2.1 CAPACIDAD RELATIVA

Las reacciones en las varias fases de la gasificación tienen velocidades limitadas específicas, las cuales requieren un tiempo de permanencia específico para que las condiciones de operación sean óptimas. Los tiempos de permanencia dependen del flujo del material a través de la sección transversal del gasificador.

Los diferentes tipos de gasificadores de tiro descendente requieren diferentes factores para llegar al tiempo de permanencia óptimo en las zonas de pirolisis, oxidación y reducción.

El flujo relativo en ($\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) para la leña ó, (m/s) para gas, calculados a 02°C . Se dan como valores críticos para la carga máxima a través de la sección transversal más angosta.

GASIFICADOR SIN GARGANTA (fig.) :	250 - 300	$\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
GASIFICADOR UNA GARGANTA (fig.) :	1200	$\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
GASIFICADOR DOBLE GARGANTA (fig.) :	4200	$\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

Con estos datos se puede calcular el diámetro de la garganta si es que se conoce el rendimiento deseado (y por lo tanto la capacidad absoluta).

DISEÑO DE UN GASIFICADOR DE FLUJO DESCENDENTE A BASE DE LEÑA PARA UTILIZACION EN COMBUSTION DIRECTA.

Para el dimensionamiento del gasificador se utilizaron las curvas de diseño mostradas en el apendice 3, así como ciertos valores obtenidos en trabajos experimentales anteriores.

Se realizó un dimencionamiento del equipo para el rango de valores de humedades relativas en base seca correspondientes al 15 y 25 % , ya que los valores de la humedad relativa de la leña que se utilizaría para gasificar está en ese rango denotandolos con los sub indices b y a respectivamente.

CARACTERISTICAS DEL COMBUSTIBLE BIOMASICO

Tipo: Forestal, Leña

Especie: Eucalipto

Humedad relativa: 15 - 25 % BS

Forma: Ramas y troncos troceados con corteza

Tamaño: 5 cm. de lado promedio

Densidad aparente: 400 kg/m³

CARACTERISTICAS QUIMICAS

Composición elemental C: 50 % ; O: 44 % ; H: 6 %

Referencia # 6

Poder Calirífico Superior (BS) = 22,9 MJ/kg

Referencia Instituto de

Química de la ESPOL.



Mediante la fórmula de Dulong se obtuvo el valor de 22.2 MJ/kg , la cual asume que el oxígeno del carbón se combina con parte del hidrógeno presente para formar agua, quedando el resto del hidrógeno disponible para la combustión junto con el carbono y el azufre.

El análisis de laboratorio realizado por el Instituto de Ciencias Químicas de la ESPOL, da el valor de 22948 kJ/kg para el poder calorífico superior de la leña en base seca.

REQUERIMIENTO ENERGETICO DE DISEÑO [Re]

Re = 200 Kw térmicos

ng = 65 %

Donde, Re: Requerimiento energético.

ng: Eficiencia de gasificación.

* Los valores con el sub índice a, corresponden a un 25 % de humedad relativa. Mientras que los valores con sub-índice b, corresponden a un 15 % de humedad relativa de la leña.

PCI (leña BS)a = 16002.8 kJ/kg.

PCI (leña BS)b = 18456.9 kJ/kg.

$$Q_f = \frac{Re}{PCI (leña BS) * ng}$$

$$Q_{fa} = \frac{200 \text{ kJ/s}}{16002.8 \text{ kJ/kg} * 0.65} (*)$$

$$Q_{fa} = 69.2 \text{ kg/h.}$$

$$Q_{fb} = \frac{200 \text{ kJ/s}}{18456.9 \text{ kJ/kg} * 0.65}$$

$$Q_{fb} = 60.01 \text{ kg/h.}$$

PRODUCCION DE GAS

Según la curva de diseño # 2, (ver apendice 3)

Referencia # 1.

$$\frac{Q_{ga}}{Q_{fa}} = 2.15$$

$$Q_{ga} = 2.15 * (69.2) = 148.8 \text{ Nm}^3/\text{h.}$$

$$\frac{Q_{gb}}{Q_{fb}} = 2.35$$

$$Q_{gb} = 2.35 * (60.01) = 141.02 \text{ Nm}^3/\text{h.}$$

PODER CALORIFICO INFERIOR DEL GAS

Segun la curva de diseño # 1 (ver apendice # 3)

$$PCIa = 4700 \text{ kJ/ Nm}^3.$$

$$PCIb = 5100 \text{ kJ/Nm}^3.$$

DIAMETRO DE GARGANTA [Dg]

Capacidad Relativa = 4200 kg/h*m²

$$A_{ga} = \frac{69.2 \text{ kg/h}}{4200 \text{ kg/h*m}^2}$$

$$A_{ga} = 0.0165 \text{ m}^2$$

$$D_{ga} = \text{SQR} [4 * A_{ga}/\text{PI}]$$

$$D_{ga} = 0.145 \text{ m.}$$

$$A_{gb} = \frac{60.01 \text{ kg/h}}{4200 \text{ kg/h*m}^2}$$

$$A_{gb} = 0.0143 \text{ m}^2$$

$$D_{gb} = 0.135 \text{ m.}$$

Por la experiencia en el diseño y operación de gasificadores desarrollada en la ESPOL, el diámetro de la garganta debe ser de 3 a 4 veces la dimensión promedio de la biomasa a gasificar.

Esta regla empirica de diseño se impone a la anterior cuando el tamaño de la biomasa es fijo y el diámetro de diseño no satisface la condicion geometrica antes mencionada.

$$D_g = 18 \text{ Cm.}$$

Con este valor se calcularán las dimensiones restantes para el gasificador.

DIAMETRO DE LA TOBERA [Dt]

De la curva de diseño # 4, Apendice 3.

$$100 \frac{A_{t^a}}{A_{g^a}} = 4.85$$

$$A_t = \frac{4.85}{100} (0.0254) = 1.23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_t = \frac{(4 (1.23 \cdot 10^{-3}))}{\text{PI}} = 0.0394 \text{ m}$$

ALTURA BOQUILLA GARGANTA [H]

De la curva de diseño # 3

$$\frac{H}{D_g} = 0.72$$

$$H = 0.72 (0.18) = 0.13 \text{ m}$$

ALTURA DE LA ZONA DE REDUCCION [Hr]

Por regla de diseño (referencia # 1).

$$H_r = 2 (D_g)$$

$$H_r = 2 (0.18) = 0.36 \text{ m.}$$

DIAMETRO DE LA CARBONERA [Db]

Por regla de diseño : $\frac{Qf}{Ab} = 250 \frac{kg}{m^2 h}$

Referencia 1

$$Ab_a = \frac{69.2}{250} = 0.277 \text{ m}^2$$

$$Ab_b = \frac{60.01}{250} = 0.24 \text{ m}^2$$

$$Db_a = \frac{4(0.277)}{\pi} = 0.594 \text{ m}$$

$$Db_b = \frac{4(0.24)}{\pi} = 0.553 \text{ m}$$

DIAMETRO EN LA ZONA DE COMBUSTION (crisol) [Dc]

Según la curva de diseño # 5, Apendice 3

$$\frac{Dc}{Dg} = 2.25$$

$$Dc = 2.25 (0.18) = 0.405 \text{ m.}$$

ALTURA CARBONERA [hb]

$$hb = \frac{Qf * t}{D * Ab}$$

$$hb_a = \frac{69.2 * 1h}{400 * 0.277} = 0.63 \text{ m.}$$

$$hb_b = \frac{60.01 * 1h}{400 * 0.24} = 0.625 \text{ m.}$$

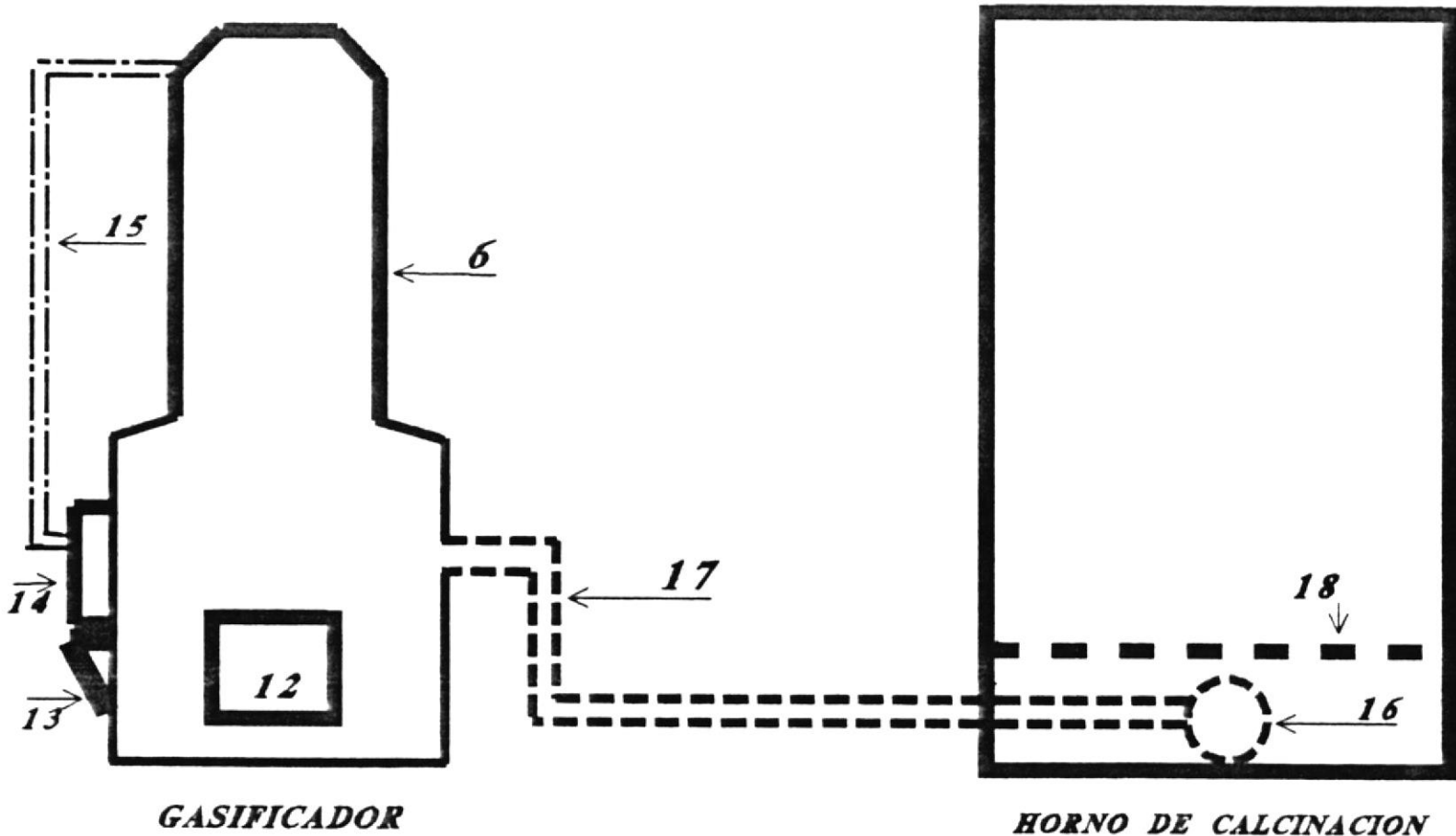
ANGULO DEL CONO [a]

Según referencia # 1

a = 50 ° Con respecto a la horizontal

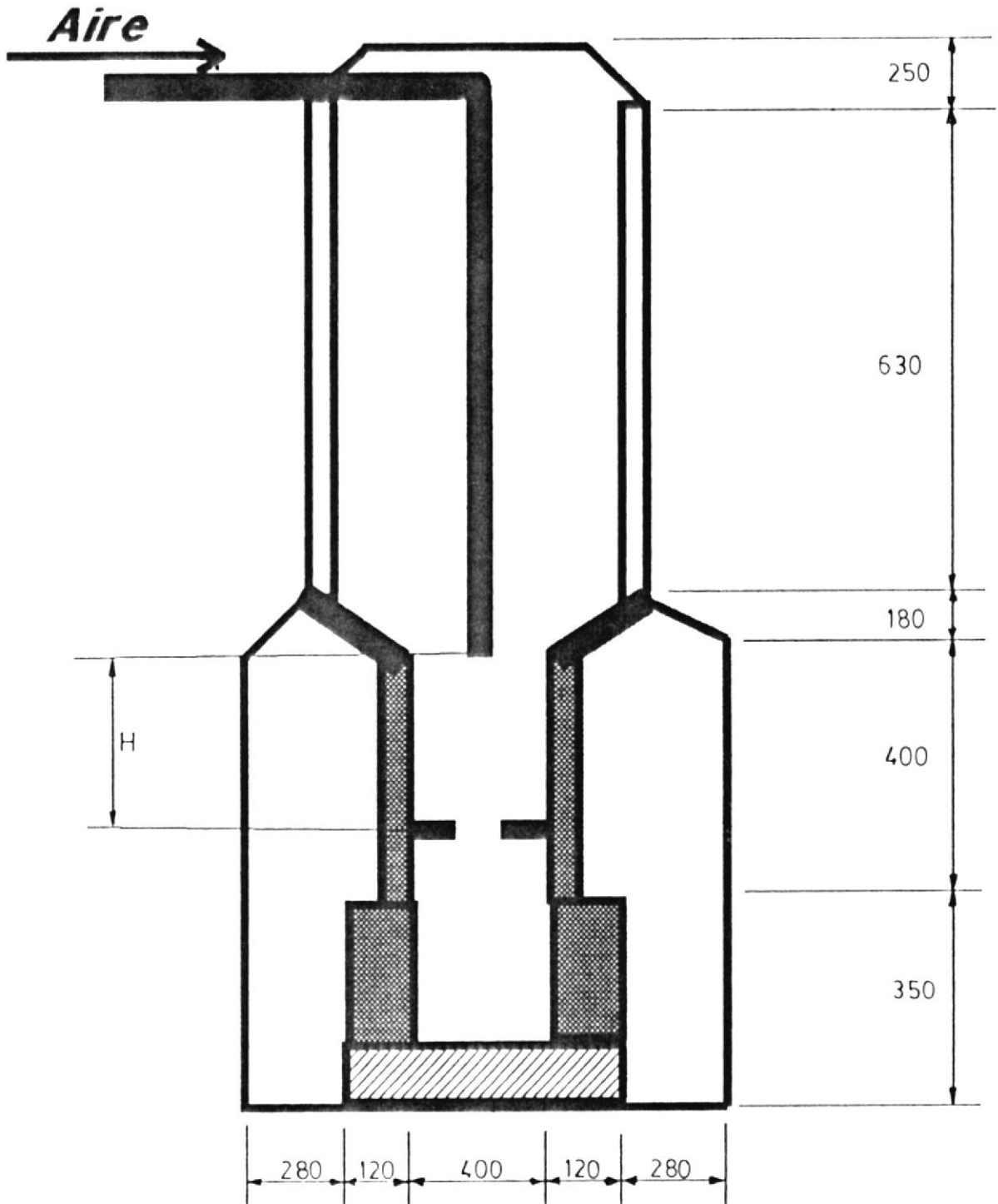
SISTEMA DE GASIFICADOR - HORNO DE PIEDRA CALIZA

FIGURA 4:1



DIMENSIONES DEL GASIFICADOR

Figura 4:2



4:3 VARIACION DE LA DISPOSICION GEOMETRICA DE LAS BOQUILLAS PARA LA ENTRADA DEL AIRE

En el presente trabajo de tesis de grado se realizará la caracterización de los parámetros operacionales de un gasificador diseñado y construido con una tobera central, la misma que se construyó con acero galvanizado de bajo carbono de fácil adquisición en el mercado local. La finalidad de ingresar el aire por medio de una boquilla o tobera central reduce el costo y facilita la construcción del gasificador, así como también podría alargar la vida útil de las toberas y del equipo en general.

En la figura 4:2 se muestra la tubería central por la que se insufla el aire necesario para la gasificación, la cual tiene un diámetro a la entrada de aire de una pulgada y media y su distancia relativa con respecto al plato garganta denotada por H, se variará desde 10 hasta 28 centímetros con la finalidad de observar la incidencia de esta variación en la producción y otras características del gas pobre.

PRINCIPALES COMPONENTES DEL GASIFICADOR

- 1.- CRISOL
- 2.- PLATO GARGANTA
- 3.- TUBERIA PARA EL INGRESO DE AIRE
- 4.- CARBONERA
- 5.- CONO



CAPITULO V

PRUEBAS EXPERIMENTALES

5:1 EQUIPO UTILIZADO

Para cumplir con el objetivo propuesto, el cual consiste en una caracterización del proceso para la obtención de gas pobre en este tipo de gasificadores se requiere diferentes instrumentos de medición de varios parámetros como son: Temperatura, flujo de aire, Peso, Tiempo y Análisis de gases.

Para realizar las pruebas se utilizará un gasificador de flujo descendente de doble garganta utilizando leña como combustible biomásico, el cual fue diseñado y construido en la ESPOL con el auspicio del SEI.

Los instrumentos utilizados son los siguientes:

- Termocuplas tipo K
- Termometro tipo K modelo 303K
- Velometro marca Alnor
- Analizador de gases Fyrite
- Horno de Mufla marca Lindberg/Blue M GS
- Balanza de resorte.
- Balanza Dial - 0 Gram
- Soplador de aire
- Reloj.

Se utilizó leña troceada en forma cubos de 5 Cm. de lado promedio y con un rango de humedad relativa entre el 15 y 25 % con una densidad aparente de 400 Kg/m³.

5:2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS OPERACIONALES

5:2.1 PORCENTAJES DE CO₂ Y O₂.

Para determinar la concentración de los gases producidos en el gasificador se utilizó el FYRITE (ver fotografía # 4), el cual determina por absorción los porcentajes de CO₂ y O₂ en volumen, el porcentaje de CO se determinó por medio del diagrama de Ostwald para la leña, los demás porcentajes; H₂O, N₂ y H₂ se determinaron analizando la ecuación de combustión real para la leña tomando del analisis último los siguientes valores:

C: 50 % , H: 6 % , O: 44 % (gravimétrico).

para la leña con 1.5 % de ceniza y 15 % de HR.

Transformando los porcentajes anteriores a base mol, se tiene lo siguiente:

C: 4.16 , H: 6 , O: 2.75 (volumétrico).

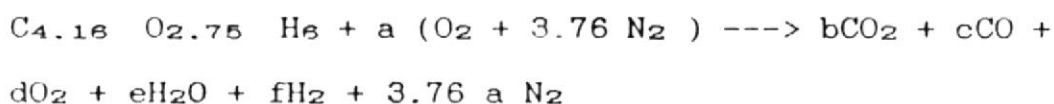
Formula química para la leña; C 4.16 H₆ O_{2.75}

Los porcentajes volumétricos para la leña obtenidos en las ocho pruebas son en promedio:

CO₂=4.75 % y O₂=4.44 %.

Con estos valores en el diagrama de Ostwald se encuentra el valor correspondiente al porcentaje de CO (monóxido de carbono), $CO = 17.5 \%$.

La ecuación de combustión para la leña:



CALCULO DE LOS COMPONENTES DEL GAS POBRE.

De la ecuación de combustión, se tiene:

$$1.- \text{ C: } 4.16 = b + c$$

$$2.- \text{ O: } 2.75 + 2a = 2b + c + 2d + e$$

$$3.- \text{ H: } 6 = 2e + 2f$$

Las concentraciones molares de los gases conocidos (CO_2 , O_2 , CO) en función de N_t (numero de moles totales).

Ejemplo para la prueba # 1.

$$[CO_2] = \frac{b}{N_t} = 0.05$$

$$[O_2] = \frac{d}{N_t} = 0.043$$

$$[CO] = \frac{c}{N_t} = 0.172$$

$$b + c = 4.16 ; \text{ según la ecuación 1}$$

$$\frac{b/N_t}{c/N_t} = \frac{0.05}{0.172} = 0.29$$

De donde, $c = 3.22$ y $b = 0.94$

$$N_t = c/0.172$$

$$N_t = 18.72$$

$$d/N_t = 0.043, \text{ entonces } d = 0.81$$

De la ecuación 3

$$e + f = 3$$

$$N_t = b + c + d + e + f + 3.76*a$$

De donde, $a = 2.86$

De la ecuación 2

$$e = 1.75$$

$$f = 1.25$$

$$[H_2] = \frac{f}{N_t} = 6.7 \%$$

$$[H_2O] = \frac{e}{N_t} = 9.3 \%$$

$$[N_2] = \frac{3.76*a}{N_t} = 57.4 \%$$

Nota.- Este no es el procedimiento convencional para determinar los componentes del gas pobre, pero se lo realizó en vista de las limitaciones del laboratorio.

5:2.2 TEMPERATURA EN DIFERENTES PUNTOS

Se determinó la temperatura en los diferentes puntos del gasificador mostrados en la figura 5:1.

Los cuales corresponden a las diferentes zonas de gasificación es decir secado, pirolisis, combustión y reducción, también la temperatura del gas a la salida del gasificador.

Para lo cual se utilizo Termocuplas y Termómetros tipo K, los mismos que tienen un rango de medicion entre (-50 y 1300 °C).

5:2.3 FLUJO DE AIRE A LA ENTRADA

El flujo de aire se lo determinó con un velometro, en el cual se determina la velocidad del aire directamente las lecturas obtenidas están en pie por minutos, su mayor rango de mediciones es (0 - 10000) pie por minuto y se requiere tomar varias mediciones en el área seccional para determinar la velocidad promedio en un ducto, como en el presente caso en la tubería para el ingreso de aire al gasificador.

5:2.4 HUMEDAD Y PESO DEL COMBUSTIBLE BIOMASICO

La humedad de la leña se determinó como se muestra en el apendice # 1 notandose un rango de variación entre 14.5 y 22 % para las muestras tomadas de eucalipto.

El peso tanto de la leña como del carbón vegetal en cada una de las pruebas realizadas se determinó con una balanza de resorte cuyo rango de medición está entre 0 y 25 kg con una mínima división de 0.5 kg.

5:2.5 PESO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS

Al finalizar la prueba de gasificación se deberá esperar un día para que el horno se enfríe para luego proceder a su mantenimiento, el cual se basa principalmente en la remoción y evacuación de la ceniza y los residuos de carbón, los cuales no varían mucho en producción. Este procedimiento dá un error intrínseco ya que por las fugas de aire continua el proceso de combustión de la biomasa remanente en el gasificador, este error sistemático se lo estima en un 20 % de la biomasa sin quemar su incidencia puede ser minimizada extendiendo la prueba.

Los residuos fueron evacuados y posteriormente pesados utilizando para ello una balanza de resorte de iguales características que la utilizada para pesar la leña y el carbón.

5:2.6 TIEMPO DE OPERACION

En cada una de las pruebas se presentan tanto el tiempo de operación como el tiempo de producción de Gas Pobre llamado también en el presente trabajo tiempo de llama.

El primero fue determinado desde el momento en que se enciende la llama con diesel para iniciar la combustión utilizando para ello un reloj.

5:3 OPERACION CON SUMINISTRO DE AIRE POR MEDIO DE UNA TOBERA CENTRAL CON UN ORIFICIO, VARIANDO LA DISTANCIA TOBERA - PLATO GARGANTA.

Estas pruebas se las realizó utilizando una tubería central con único agujero descendente de una pulgada y media de diámetro, utilizando para la construcción de la misma acero de bajo carbono galvanizado.

Variando la distancia vertical desde 10 hasta 28 Cm. con respecto al plato garganta, vease figura 5:1 .

En cada una de las pruebas se reporta la temperatura y presiones ambientales así como también la hora inicial de la prueba. en las cuales se utilizó el mismo tipo de leña con el rango de humedad entre 15 y 25 % aproximadamente.

Los detalles del procedimineto vease en apendice # 5

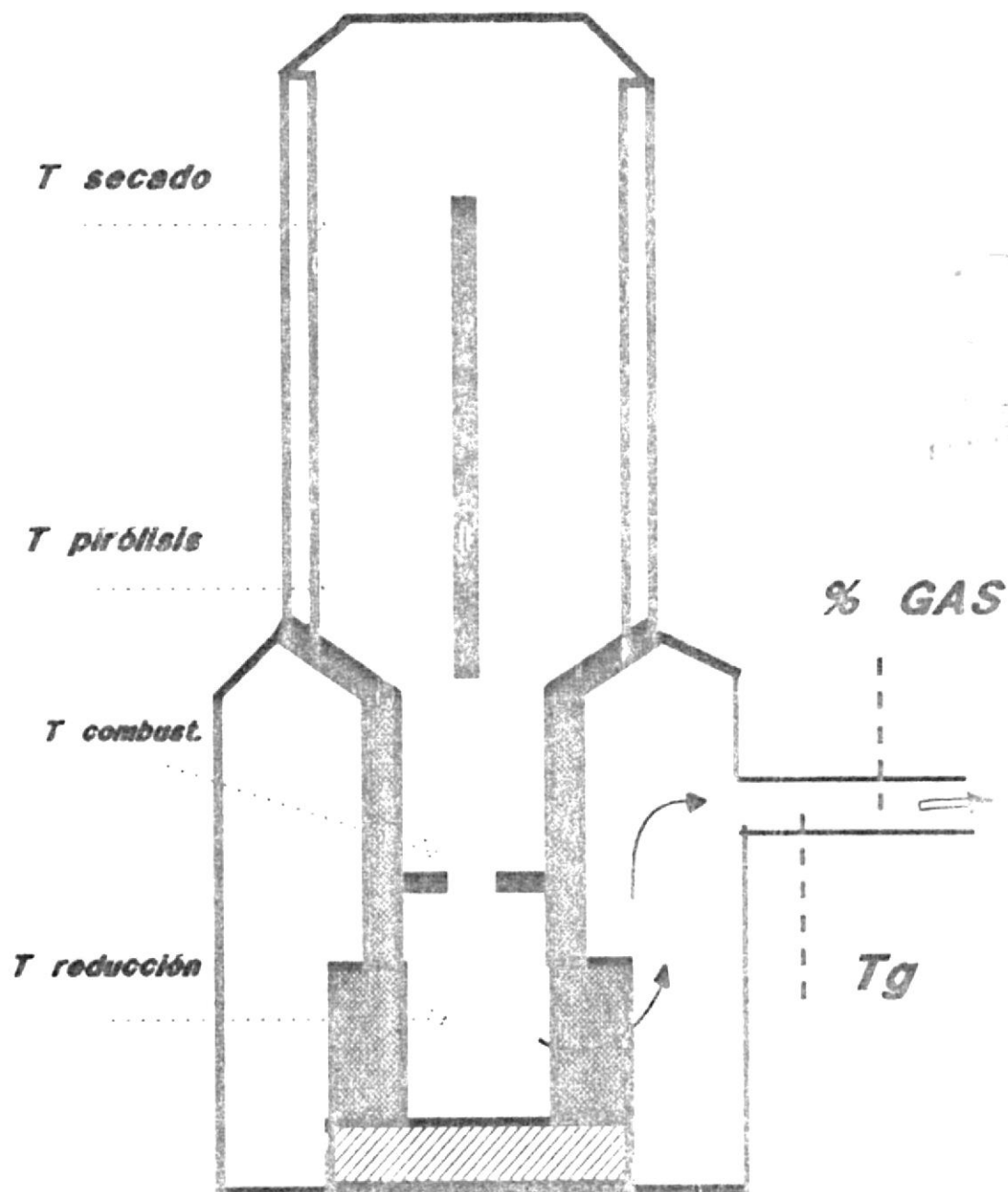
LOCALIZACION DE PUNTOS DE MEDICION**Figura 5:1**

TABLA # 5:3.1

PRUEBAS EXPERIMENTALES

PRUEBA # 1

DISTANCIA TOBERA - GARGANTA : 10 Cm.
 NUMERO DE ORIFICIOS : 1
 PESO DE LA LENA : 15 kg.
 PESO DEL CARBON : 4 kg.
 TIEMPO DE OPERACION : 85 min.
 TIEMPO DE LLAMA : 65 min.
 PESO DEL RESIDUO SOLIDO : 3.4 kg.
 PRESION AMBIENTAL : 759 mm Hg.
 TEMPERATURA AMBIENTAL : 24 ° C
 HORA INICIAL : 12:40
 FECHA : 23/06/92

TIEMPO [min]	TEMPERATURAS [° C]					COMPONENTES GAS POBRE Sw% vol.]		FLUJO AIRE [m3/h]
	Ts	Tp	Tc	Tr	Tg	O2	CO2	Qa
0								
10	100	143	193	50	34	--	--	22.3
20	99	232	566	239	405	4.5	6	26.7
30	160	296	677	599	432	4	5	26.7
40	173	331	699	608	462	4.5	7	24.4
50	209	382	703	615	471	4.5	5	25.2
60	161	379	707	510	501	4	5	24.8
70	215	360	699	570	493	4.5	4	24.8
80	228	367	693	600	512	4	4	24.8
85	199	360	527	483	255	--	--	24.8

% GASES Vs. TIEMPO
Distancia Tobera Garganta 10 cm

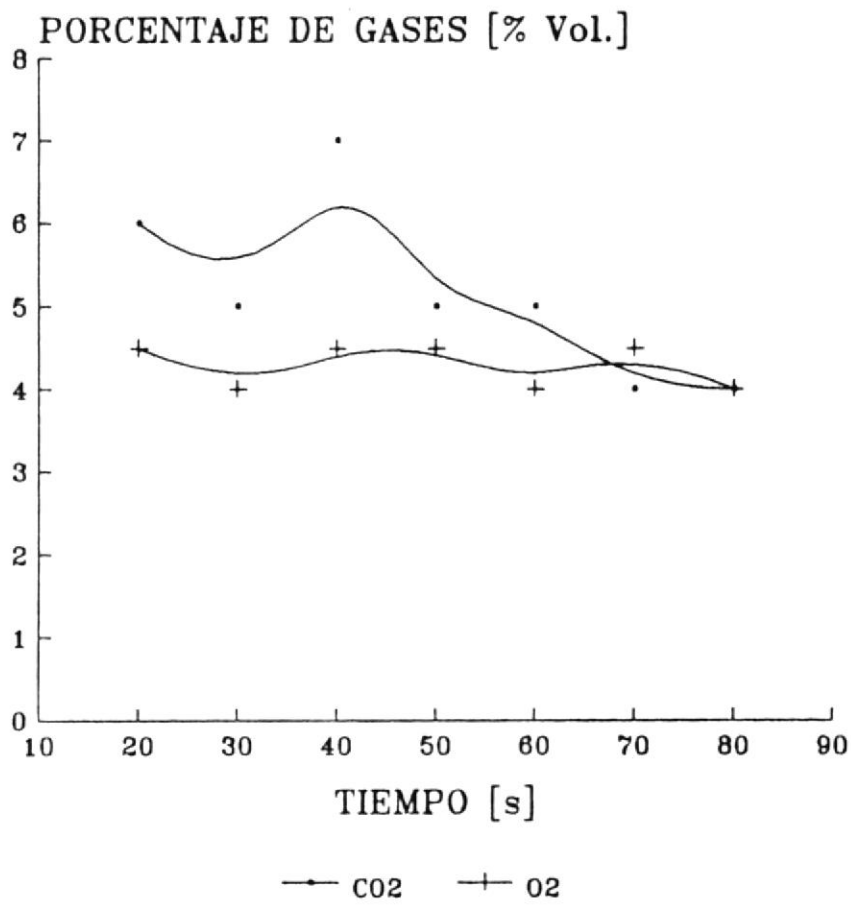


Figura 5:3.2

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 10 cm

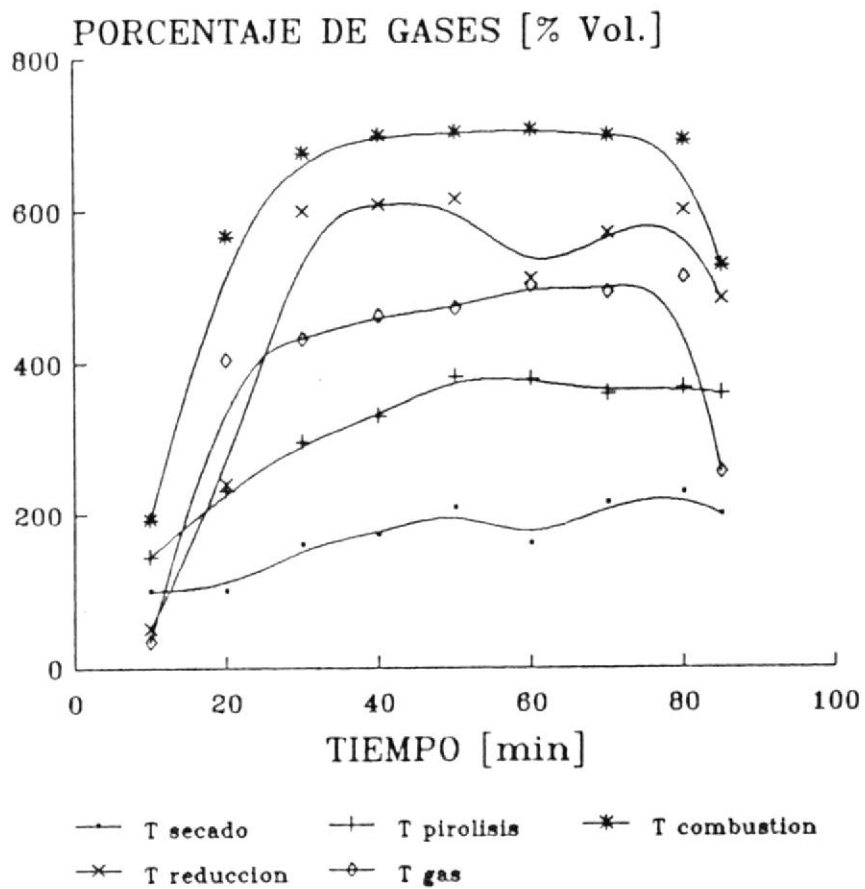


Figura 5:3.3

TABLA # 5:3.2

PRUEBAS EXPERIMENTALES

PRUEBA # 2

DISTANCIA TOBERA - GARGANTA : 14 Cm.
 NUMERO DE ORIFICIOS : 1
 PESO DE LA LEÑA : 18.6 kg.
 PESO DEL CARBON : 1.8 kg.
 TIEMPO DE OPERACION : 75 min.
 TIEMPO DE LLAMA : 72 min.
 PESO DEL RESIDUO SOLIDO : 3.5 kg.
 PRESION AMBIENTAL : 758 mm Hg.
 TEMPERATURA AMBIENTAL : 27 \circ C
 HORA INICIAL : 12:53
 FECHA : 09/07/92

TIEMPO [min]	TEMPERATURAS [\circ C]					COMPONENTES GAS POBRE [% vol.]		FLUJO AIRE [m ³ /h]
	Ts	Tp	Tc	Tr	Tg	O2	CO2	Qa
0								
10	141	107	216	208	146	4.5	5	23.8
20	152	157	363	271	249	5	6	39.9
30	195	234	631	474	315	5.5	7	40.7
40	183	269	706	657	412	5.5	6	44.8
50	198	352	770	707	435	6	6	44.8
60	181	379	810	703	489	4	2	44.8
70	188	395	813	688	501	5.5	5	44.5
80	187	409	818	709	511	5.5	4	47
85	189	395	797	720	525	--	--	44.5

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 14 cm

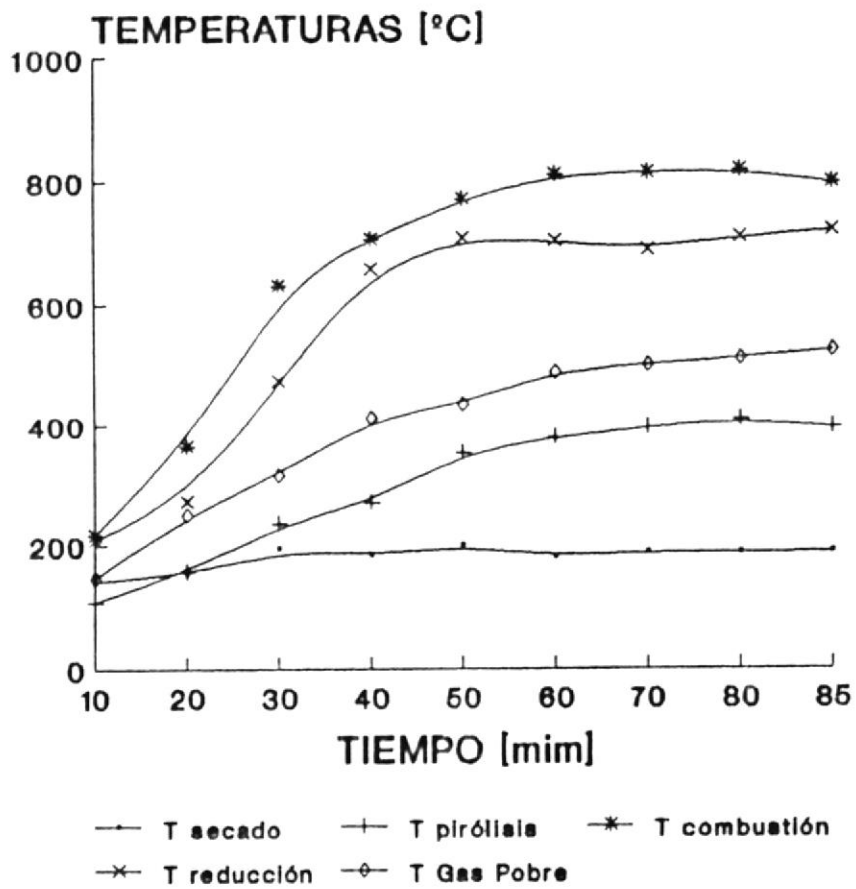


Figura 5:3.4

% GASES Vs. TIEMPO
Distancia Tobera Garganta 14 cm

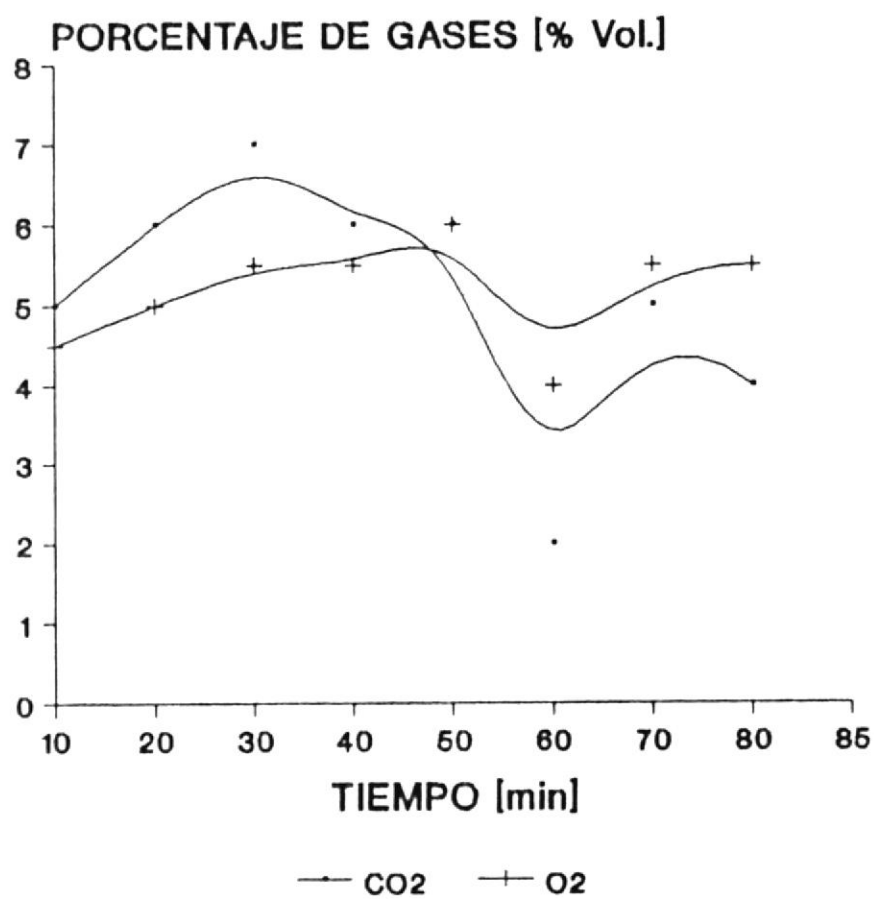


Figura 5:3.5



TABLA # 5:3.3

PRUEBAS EXPERIMENTALES

PRUEBA # 3

DISTANCIA TOBERA - GARGANTA	:	20 Cm.
NUMERO DE ORIFICIOS	:	1
PESO DE LA LENA	:	45 kg.
PESO DEL CARBON	:	5 kg.
TIEMPO DE OPERACION	:	120 min.
TIEMPO DE LLAMA	:	84 min.
PESO DEL RESIDUO SOLIDO	:	5.5 kg.
PRESION AMBIENTAL	:	758 mm Hg.
TEMPERATURA AMBIENTAL	:	28 °C
HORA INICIAL	:	13:50 min.
FECHA	:	22/07/92

TIEMPO [min]	TEMPERATURAS [° C]			COMPONENTES GAS POBRE [% vol.]		FLUJO AIRE [m3/h]
	T _s	T _c	T _g	O ₂	CO ₂	Q _a
36	105	670	195	4	4	24.1
48	117	890	249	5	5	24.1
55	121	1005	290	5	4	24.1
60	143	958	305	5	4	24.1
70	138	1131	308	4	4	24.1
77	146	997	301	5	5	24.1
90	125	875	347	4	4	24.1
120	115	851	395	3.5	4	24.1

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 20 cm

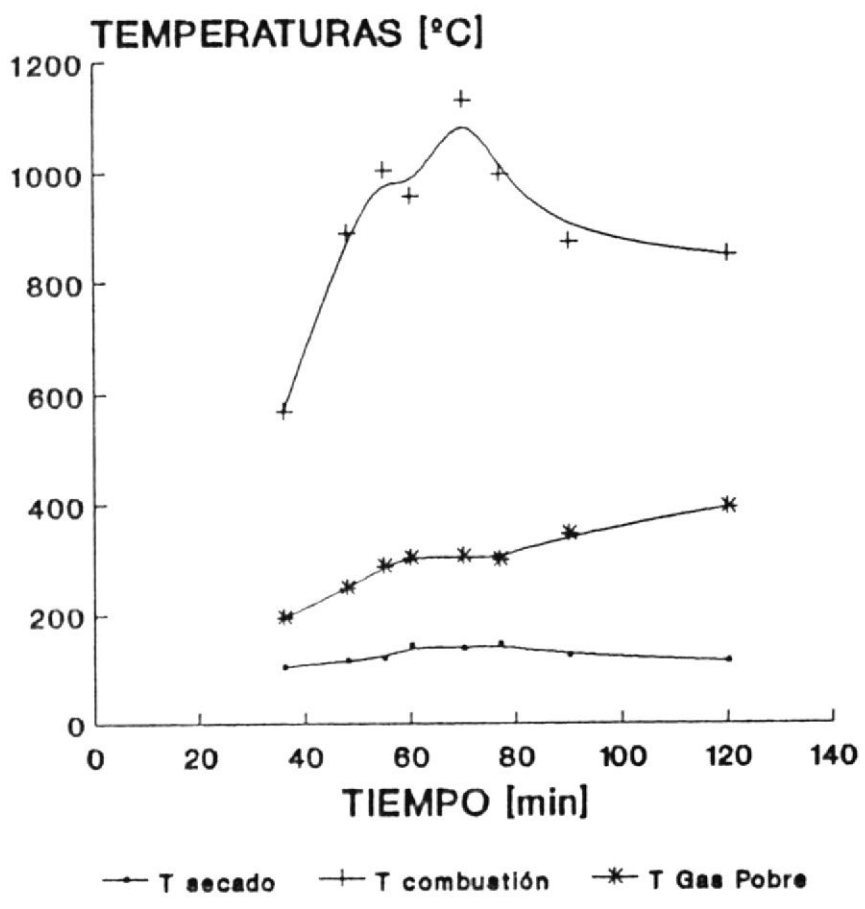


Figura 5:3.6

% GASES Vs. TIEMPO
Distancia Tobera Garganta 20 cm

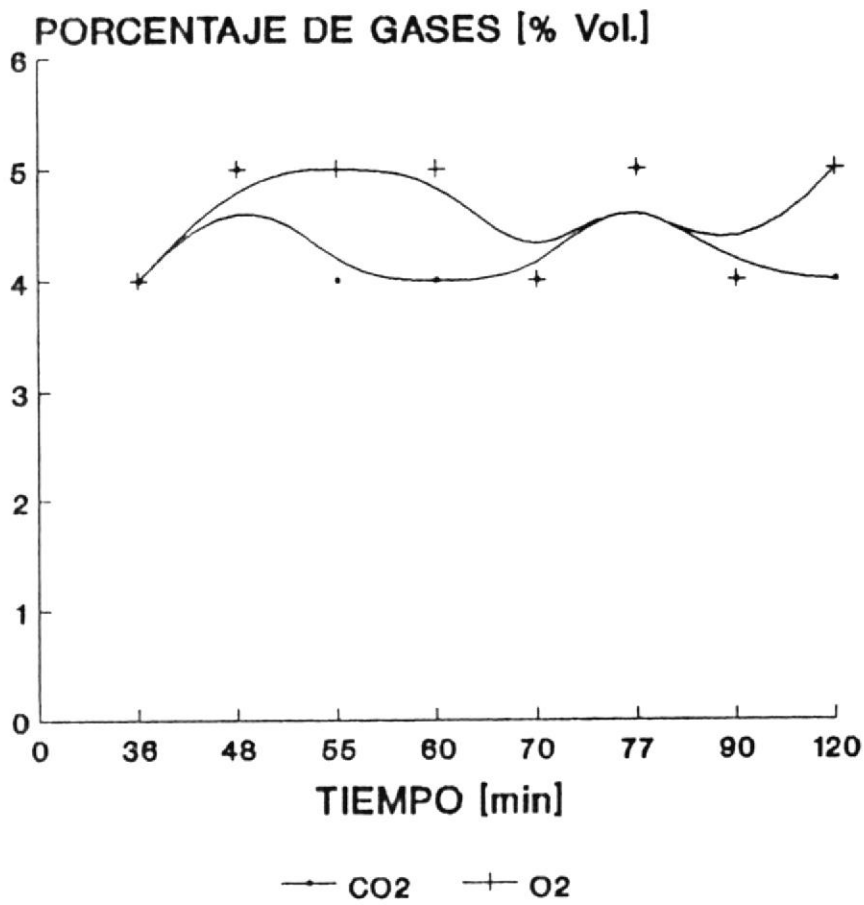


Figura 5:3.7

TABLA # 5:3.4

PRUEBAS EXPERIMENTALES

PRUEBA # 4

DISTANCIA TOBERA - GARGANTA : 24 Cm.
 NUMERO DE ORIFICIOS : 1
 PESO DE LA LEÑA : 42 kg.
 PESO DEL CARBON : 5 kg.
 TIEMPO DE OPERACION : 110 min.
 TIEMPO DE LLAMA : 90 min.
 PESO DEL RESIDUO SOLIDO : 8 kg.
 PRESION AMBIENTAL : 759 mm Hg.
 TEMPERATURA AMBIENTAL : 29 °C
 HORA INICIAL : 10:30
 FECHA : 07/08/92

TIEMPO [min]	TEMPERATURAS [° C]			COMPONENTES GAS POBRE [% vol.]		FLUJO AIRE [m ³ /h]
	T _s	T _c	T _g	O ₂	CO ₂	Q _a
20	141	---	61	5.5	5	80.3
32	171	1081	78	4	2	85.3
60	---	---	85	4.5	2	85.3
65 *	---	---	---	---	---	---
66	135	862	144	4.5	4	82.4
75	133	1003	155	5.5	4	82.4
90	168	1148	185	4	2	82.4
91 *	---	---	---	---	---	---
92	122	974	187	4	3	82.4
110	103	1175	232	3	3	82.4

* RECARGUE DE LEÑA

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 24 cm

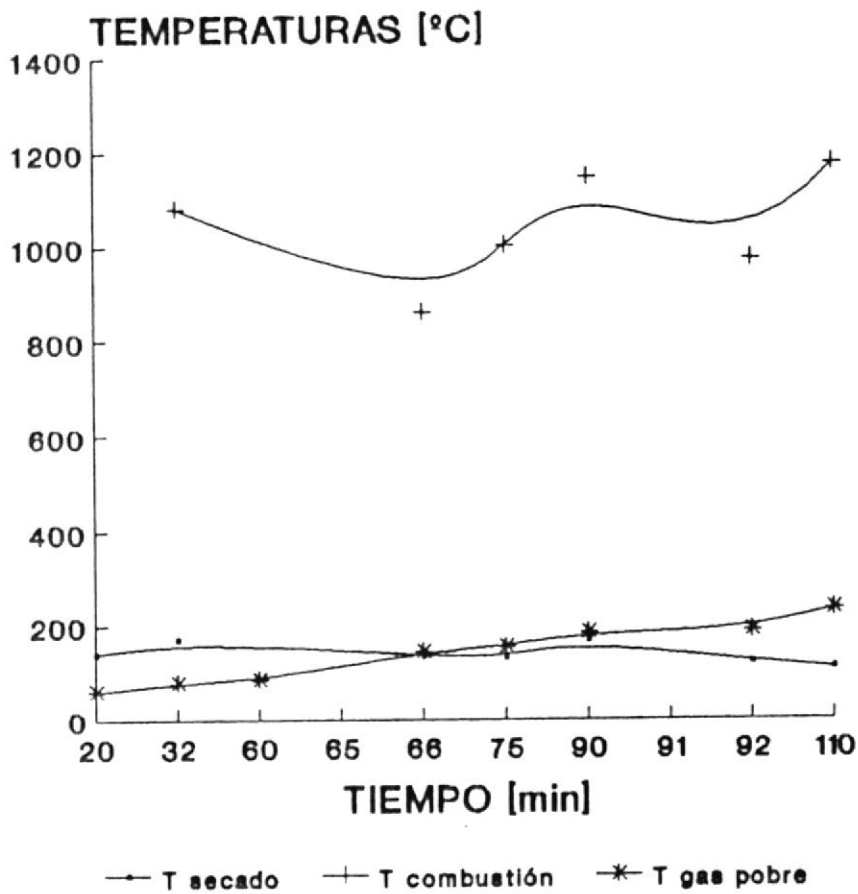


Figura 5:3.8

% GASES Vs TIEMPO
Distancia Tobera Garganta 24 cm

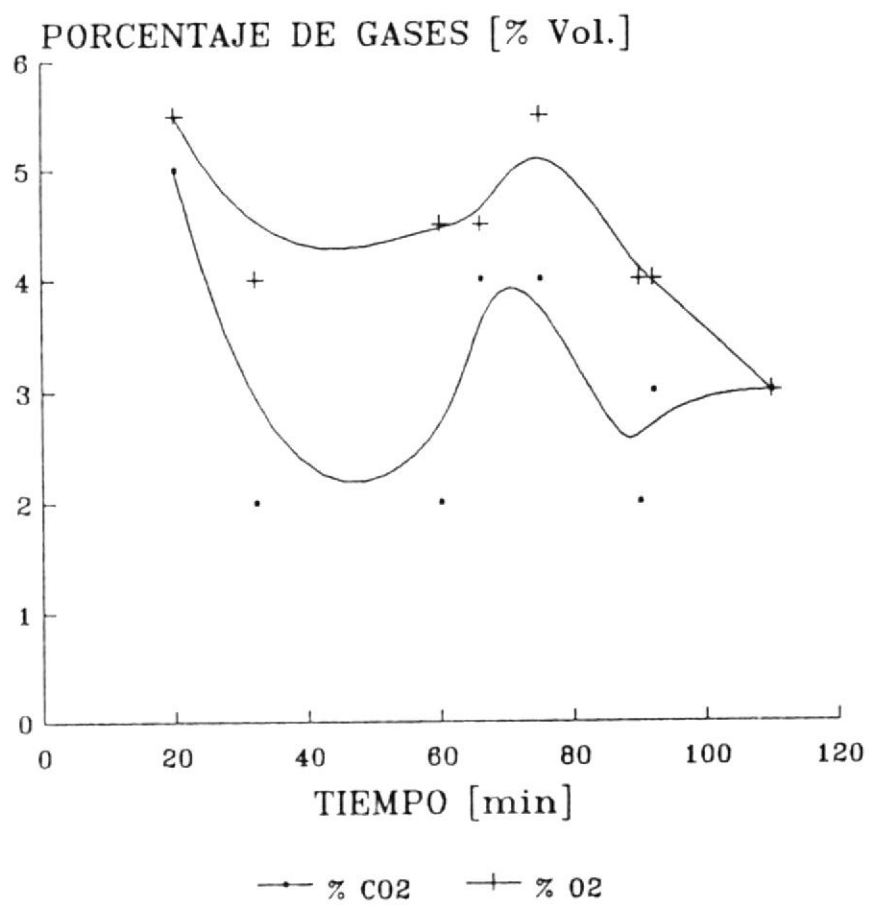


Figura 5:3.9

TABLA # 5:3.5

PRUEBAS EXPERIMENTALES

PRUEBA # 5

DISTANCIA TOBERA - GARGANTA : 28 Cm.
 NUMERO DE ORIFICIOS : 1
 PESO DE LA LEÑA : 43.5 kg.
 PESO DEL CARBON : 6 kg.
 TIEMPO DE OPERACION : 130 min.
 TIEMPO DE LLAMA : 106 min.
 PESO DEL RESIDUO SOLIDO : 6.5 kg.
 PRESION AMBIENTAL : 759 mm Hg.
 TEMPERATURA AMBIENTAL : 26 °C
 HORA INICIAL : 11:40
 FECHA : 03/09/92



TIEMPO [min]	TEMPERATURAS [° C]			COMPONENTES GAS POBRE [% vol.]		FLUJO AIRE [m3/h]
	Ts	Tc	Tg	O2	CO2	Qa
0	---	---	---	---	---	77.4
12	106	438	60	3	4	77.4
28	165	1052	115	3.5	6	85.9
29	---	---	---	---	---	---
40	87	722	108	2.5	6.5	87.1
60	113	962	248	2.5	7	87.1
72	131	1058	307	3	8.5	87.1
90	145	954	352	1.5	8.5	87.1
110	142	985	376	2	8	87.1
130	148	1102	401	2.5	7.5	87.1

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 28 cm

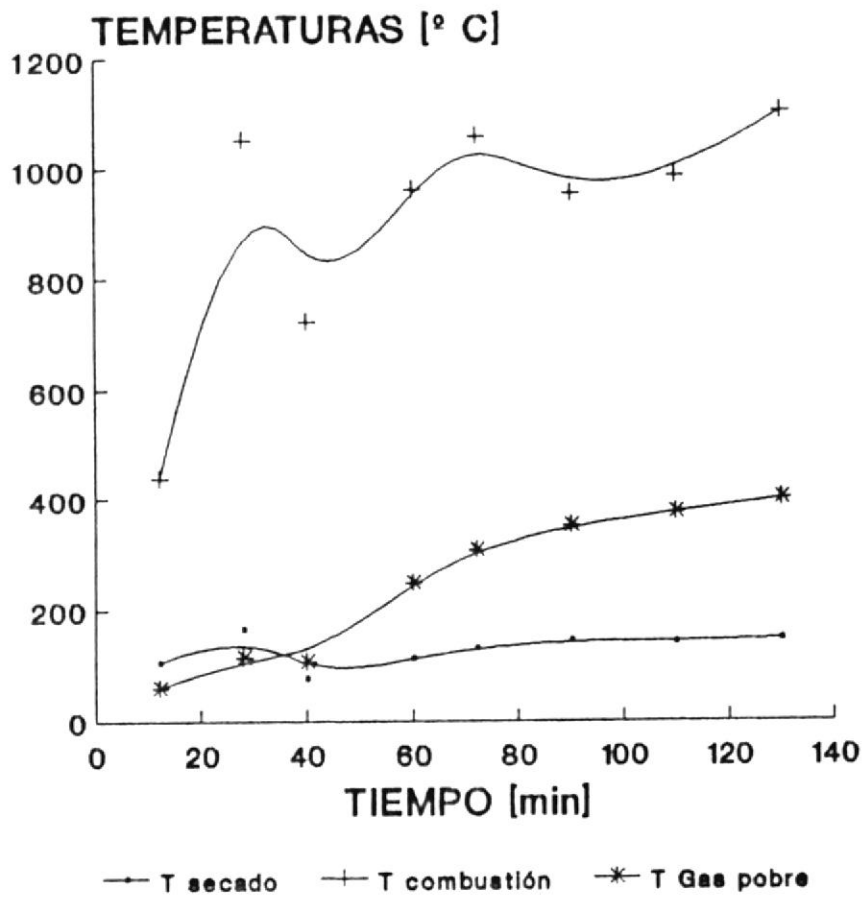


Figura 5:3.10

% GASES Vs TIEMPO
Distancia Tobera Garganta 28 cm

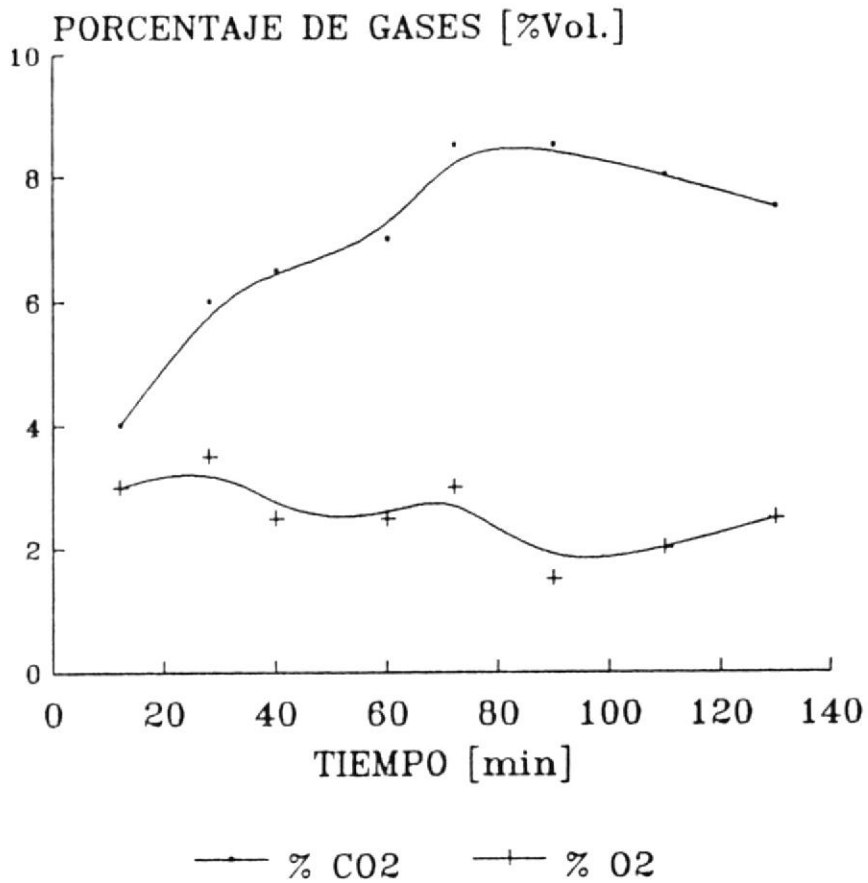


Figura 5:3.11

5:4 OPERACION CON SUMINISTRO DE AIRE POR MEDIO DE UNA BOQUILLA CENTRAL CON VARIOS ORIFICIOS.

En esta parte experimental se procedió a variar la distribución del aire realizando seis orificios en la tobera de alimentación de aire (cuatro en dirección perpendicular al flujo y dos en dirección paralela al flujo de gases, es decir vertical descendente. El diámetro de cada uno de los orificios es media pulgada (12.7 mm) . Realizando tres pruebas para este caso, variando para cada una la distancia vertical Tobera - Plato garganta.

Se muestran también en cada caso, graficos de la temperatura Vs. el tiempo y del porcentaje de los gases medidos en función del tiempo.

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 14 cm

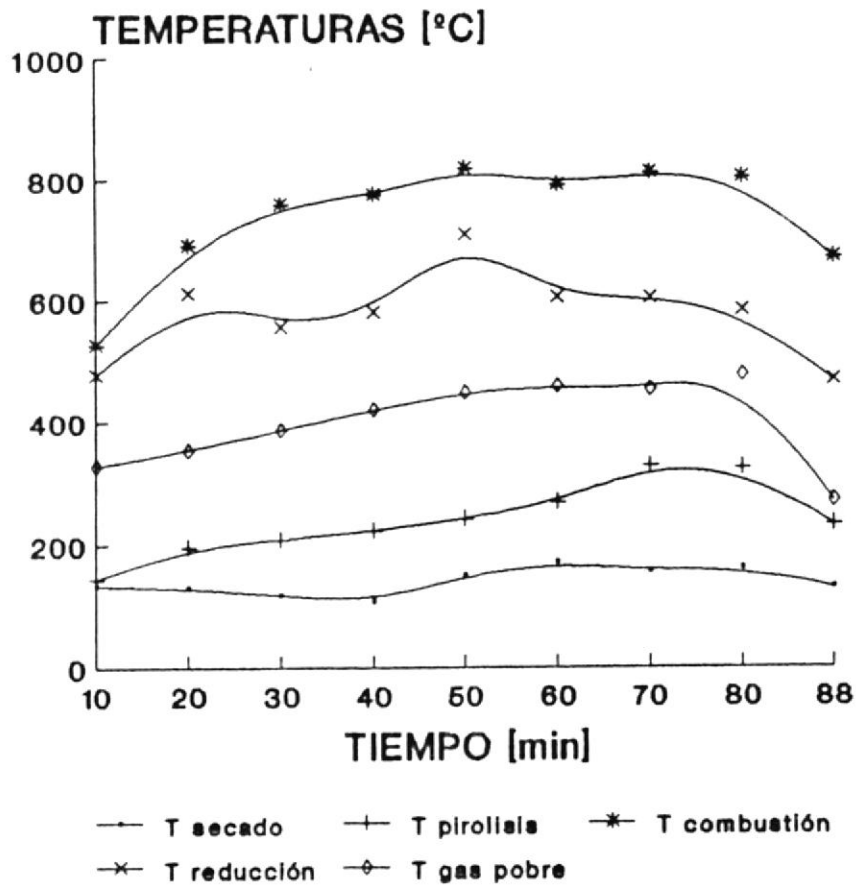


Figura 5:4.1

TABLA # 5:3.6

PRUEBAS EXPERIMENTALES

PRUEBA # 6

DISTANCIA TOBERA - GARGANTA	:	14 Cm.
NUMERO DE ORIFICIOS	:	6
PESO DE LA LENA	:	18.18 kg.
PESO DEL CARBON	:	2.3 kg.
TIEMPO DE OPERACION	:	88 min.
TIEMPO DE LLAMA	:	75 min.
PESO DEL RESIDUO SOLIDO	:	3.6 kg.
PRESION AMBIENTAL	:	758 mm Hg.
TEMPERATURA AMBIENTAL	:	28 ° C
HORA INICIAL	:	11:45
FECHA	:	26/06/92

TIEMPO [min]	TEMPERATURAS [° C]					COMPONENTES GAS POBRE [% vol.]		FLUJO AIRE [m3/h]
	Ts	Tp	Tc	Tr	Tg	O2	CO2	Qa
0								
10	132	143	527	477	327	--	5	23.7
20	129	196	690	611	352	4	5	24.4
30	116	208	758	555	386	2.5	5	22.3
40	106	223	774	580	420	3	4	22.6
50	148	241	818	707	448	4	5	22.6
60	170	268	791	604	459	3	4	22.6
70	155	327	810	603	453	4	5	22.6
80	160	323	802	528	477	3	4	22.6
88	129	232	669	468	271	--	--	22.6

% GASES Vs. TIEMPO
Distancia Tobera Garganta 14 cm

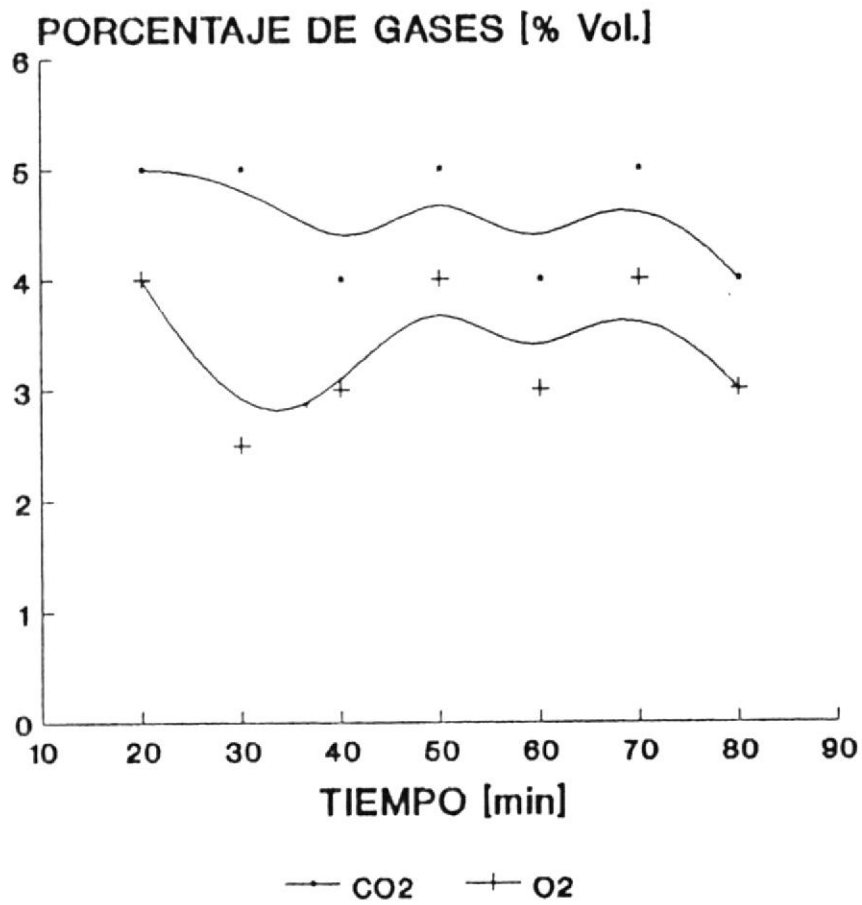


Figura 5:4.2

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 20 cm

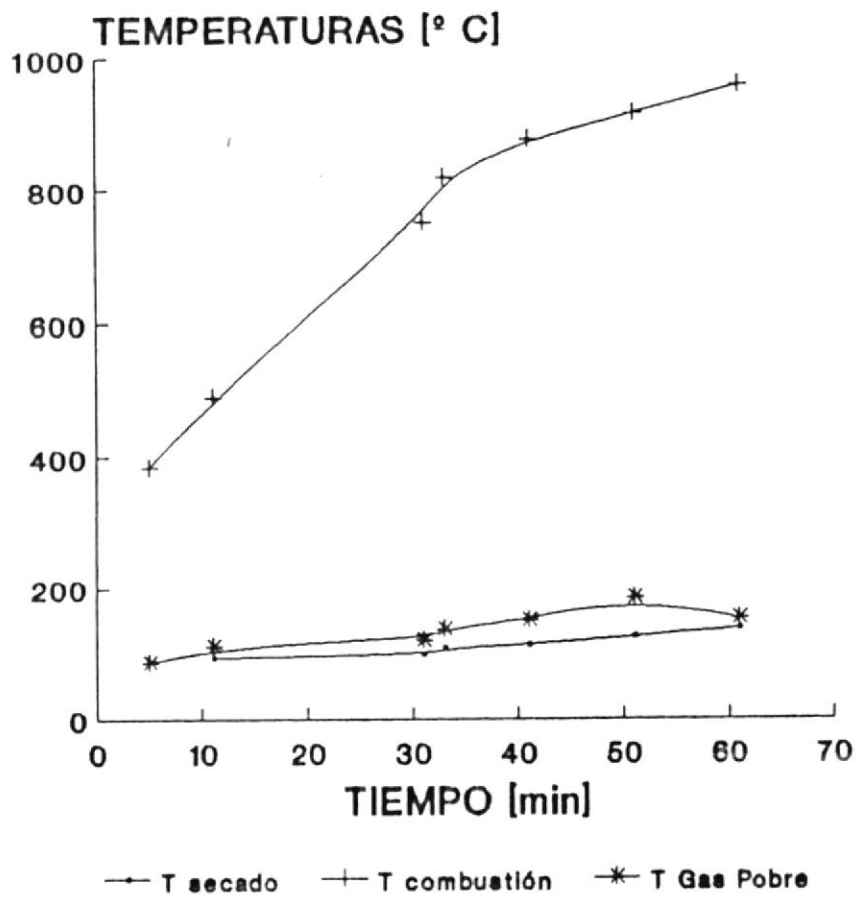


Figura 5:4.3

% GASES Vs. TIEMPO
Distancia Tobera Garganta 20 cm

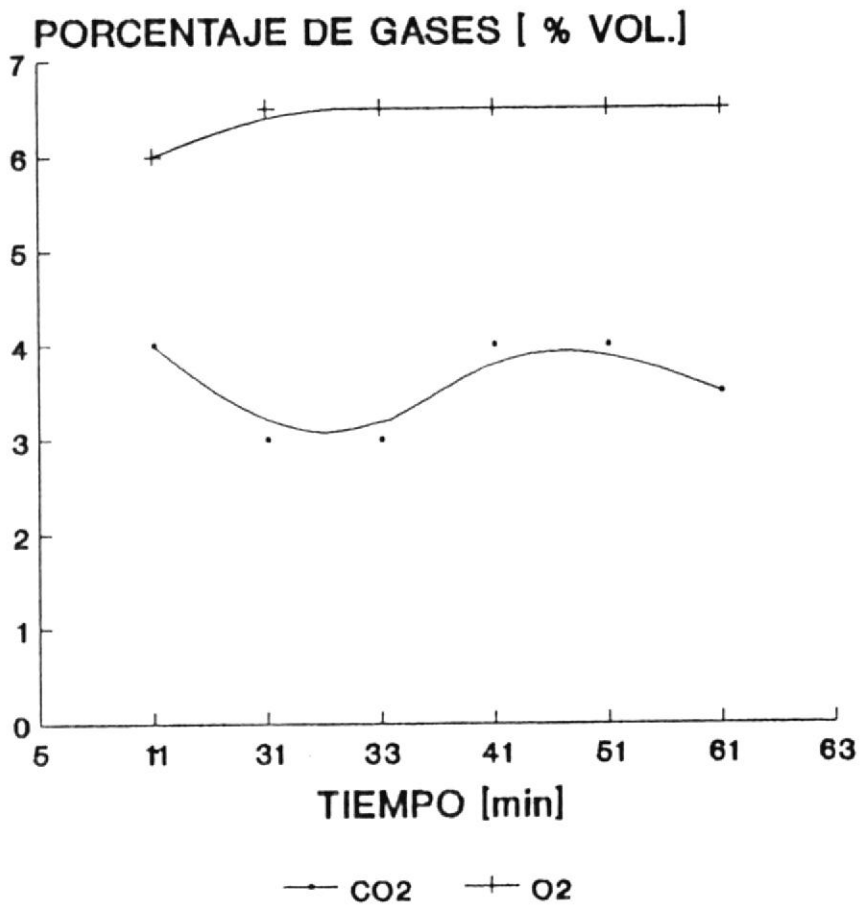


Figura 5:4.4



TABLA # 5:3.8

PRUEBAS EXPERIMENTALES

PRUEBA # 8

DISTANCIA TOBERA - GARGANTA : 24 Cm.
 NUMERO DE ORIFICIOS : 6
 PESO DE LA LENA : 127 kg.
 PESO DEL CARBON : 5.5 kg.
 TIEMPO DE OPERACION : 192 min.
 TIEMPO DE LLAMA : 175 min.
 PESO DEL RESIDUO SOLIDO : 8.5 kg.
 PRESION AMBIENTAL : 758 mm Hg.
 TEMPERATURA AMBIENTAL : 28 °C
 HORA INICIAL : 09:45
 FECHA : 25/08/92

TIEMPO [min]	TEMPERATURAS [° C]			COMPONENTES GAS POBRE [% vol.]		FLUJO AIRE [m ³ /h]
	T _s	T _c	T _g	O ₂	CO ₂	Q _a
15	---	50	41	---	---	73.4
20	83	403	58	5.5	3	73.4
30	91	913	66	4	3.5	73.4
45	100	932	115	4.5	4	73.4
60	87	935	140	---	---	73.4
75	---	903	---	4	2	73.4
110	78	857	197	5	2.5	73.4
125	85	856	196	4.5	2	94.7
150	75	838	243	4	2	94.7
180	85	858	256	4.5	2	94.7

Temperatura Vs Tiempo Distancia Tobera Garganta 24 cm

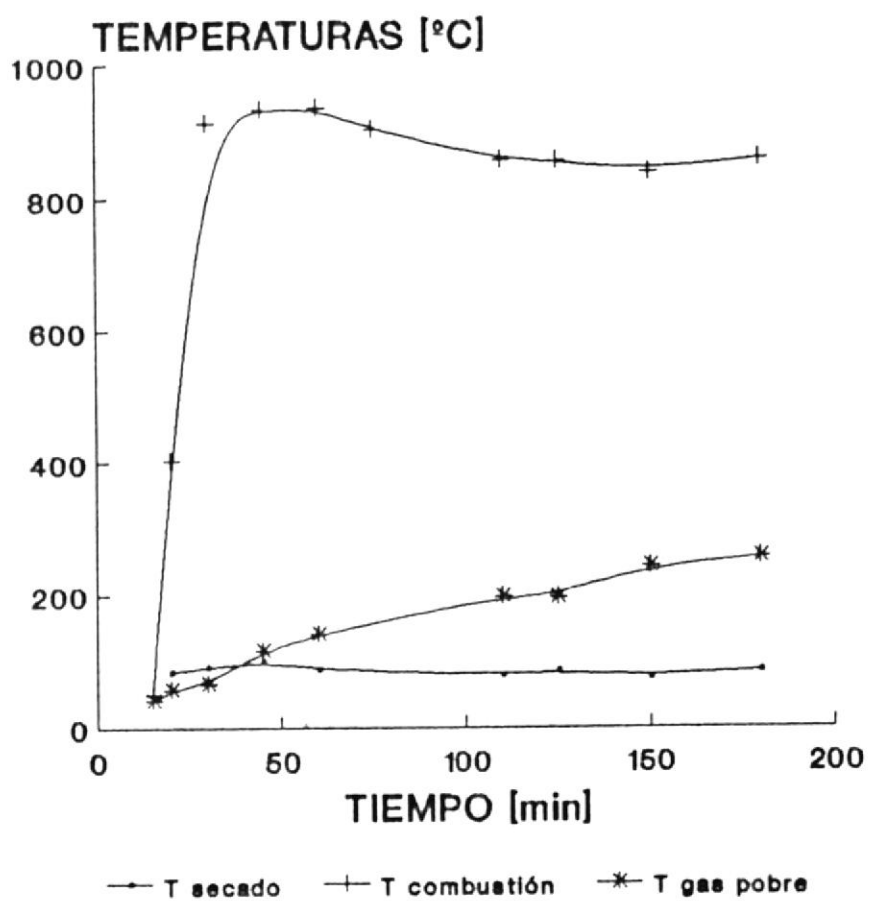


Figura 5:4.5

% GASES Vs TIEMPO

Distancia Tobera Garganta 24 cm

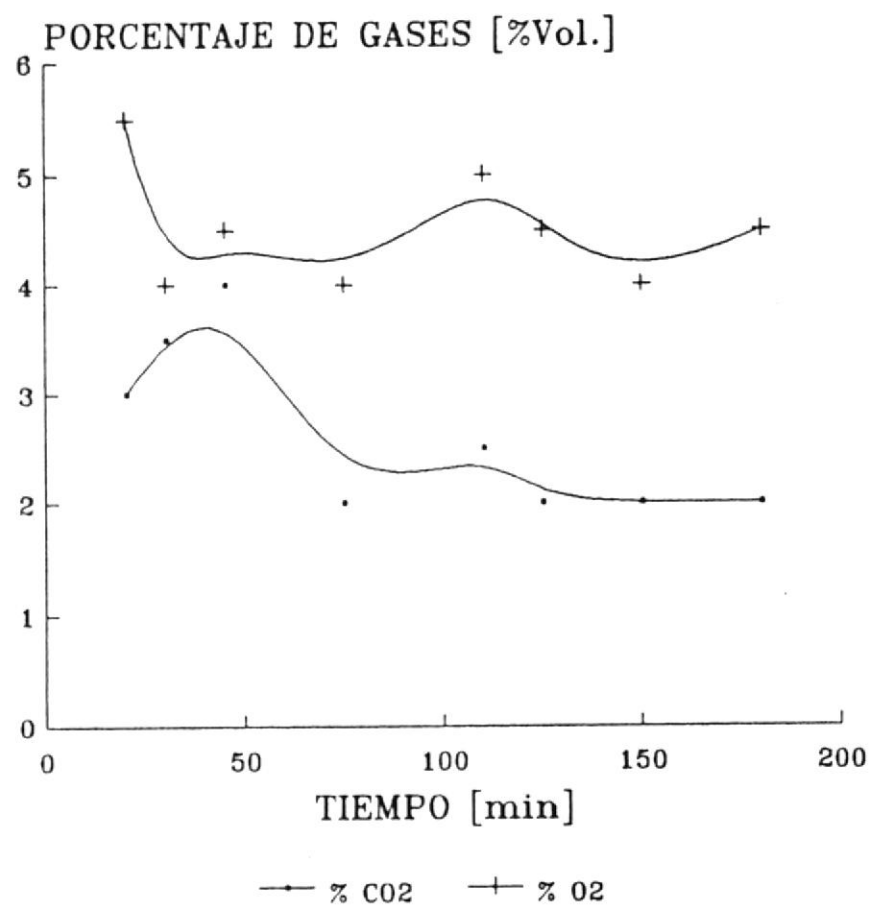


Figura 5:4.6

5:5 RESULTADOS

COMPONENTES DEL GAS POBRE
VALORES EXPERIMENTALES [% Vol]

PRUEBA #	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂	H ₂ O
1	17.2	5	4.3	57.4	6.7	9.3
2	15	5.1	5.9	59.5	6.5	8
3	18.4	4	4	57.3	5.4	10.8
4	18.3	3.1	4.4	58.8	3.4	12
5	17	7	2.6	56.1	7.8	9.5
6	18.1	4.6	3.4	57.6	4.8	11.6
7	16.6	3.6	6.4	58.8	6.5	8.1
8	17.3	5.6	4.5	56.1	9.1	7.4

Tabla # 5:9



CAPITULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

6:1 ANALISIS DE RESULTADOS

CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GASIFICADOR

Un parámetro de importancia para estimar el funcionamiento de un gasificador es la eficiencia de gasificación tanto en frío como en caliente, para determinar la eficiencia en frío, es decir cuando el gas pobre será utilizado en para fuerza motriz en donde la temperatura del gas debería ingresar al motor de combustión interna a una temperatura en el orden de los 40 °C, se utilizó la siguiente definición:

$$n_g = \frac{PC_{gp} * Q_g}{PC_b * Q_b} * 100$$

Cuando el gas pobre se utilizará en quemadores, hornos y otras aplicaciones térmicas directas se determina otro parámetro denominado eficiencia en caliente.

$$n_{gc} = \frac{PC_g * Q_g + Q_g * D * c_{pg} * DT}{PC_f * Q_f} * 100$$

Donde;

PCgp	: Poder calorífico del gas pobre	[kJ/m ³]
Qg	: Flujo de gas pobre	[m ³ /h]
D	: Densidad del Gas Pobre	[kg/m ³]
cp _g	: Calor específico del Gas Pobre	[kJ/kg °K]
PCf	: Poder calorífico del combustible biomásico	[kJ/kg]
Qf	: Flujo del combustible biomásico	[kg/h]
DT	: Diferencia de temperatura entre la salida del Gas Pobre y la temperatura de entrada de la leña	[°K]

La densidad del Gas Pobre se la determinó según la siguiente relación:

$$D = 1.977 * \%CO_2 + 1.429 * \%O_2 + 1.25 * \%CO + 0.09 * \%H_2 + 1.251 * \%N_2.$$

Fuente referencia # 3.

El valor del calor específico del gas pobre según la referencia # 3, es 1.17 kJ/kg °C

Se consideró que la temperatura de entrada de la leña es igual a la temperatura ambiental.

PROPIEDADES DEL GAS POBRE
VALORES EXPERIMENTALES

PRUEBA #	PC _{gp} [kJ/m ³]	n _g [%]	Q _g [m ³ /h]	Q _f [kg/h]
1	2895.6	29.4	32.9	17.5
2	2596.0	45.6	55.3	17.0
3	2907.6	14.6	33.2	35.7
4	2679.7	50.4	111.4	32.0
5	2988.8	69.6	120.6	28.0
6	2805.1	29.1	31.4	16.4
7	2798.3	23.8	78.8	50.0
8	3166.6	42.7	113.4	45.5

Tabla # 6:1

RELACION AIRE/COMBUSTIBLE PARA
GASIFICACION DE LENA

PRUEBAS EXPERIMENTALES



PRUEBA #	CAUDAL DE AIRE [m ³ /h]	AIRE / COMBUSTIBLE [kg/kg]
1	24.9	1.83
2	41.8	3.18
3	24.1	0.87
4	82.9	3.35
5	85.7	3.95
6	22.9	1.83
7	58.7	1.52
8	80.5	2.29

Tabla # 6:2

PROPIEDADES DEL GAS POBRE
VALORES EXPERIMENTALES

PRUEBA #	DENSIDAD [kg/m ³]	PRODUCCION DE DE GAS [m ³ /kg]	EFICIENCIA EN CALIENTE [%]
1	1.099	1.88	35.7
2	1.123	3.25	57.2
3	1.087	0.93	17.0
4	1.092	3.48	55.3
5	1.097	4.30	80.8
6	1.090	1.92	34.7
7	1.112	1.58	25.6
8	1.101	2.49	46.6

Tabla # 6:3

RELACION AIRE - COMBUSTIBLE CON RESPECTO AL VALOR ESTEQUIOMETRICO

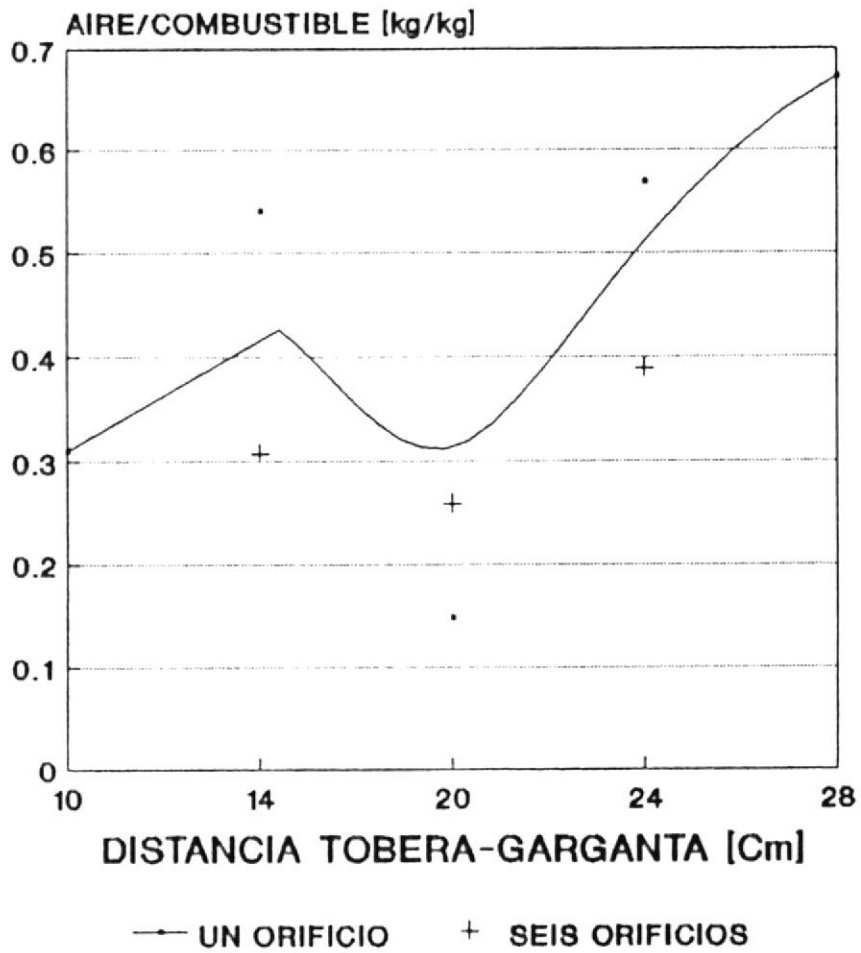


FIGURA # 6:1

PROPIEDADES DEL GAS POBRE

Eficiencia en Frio

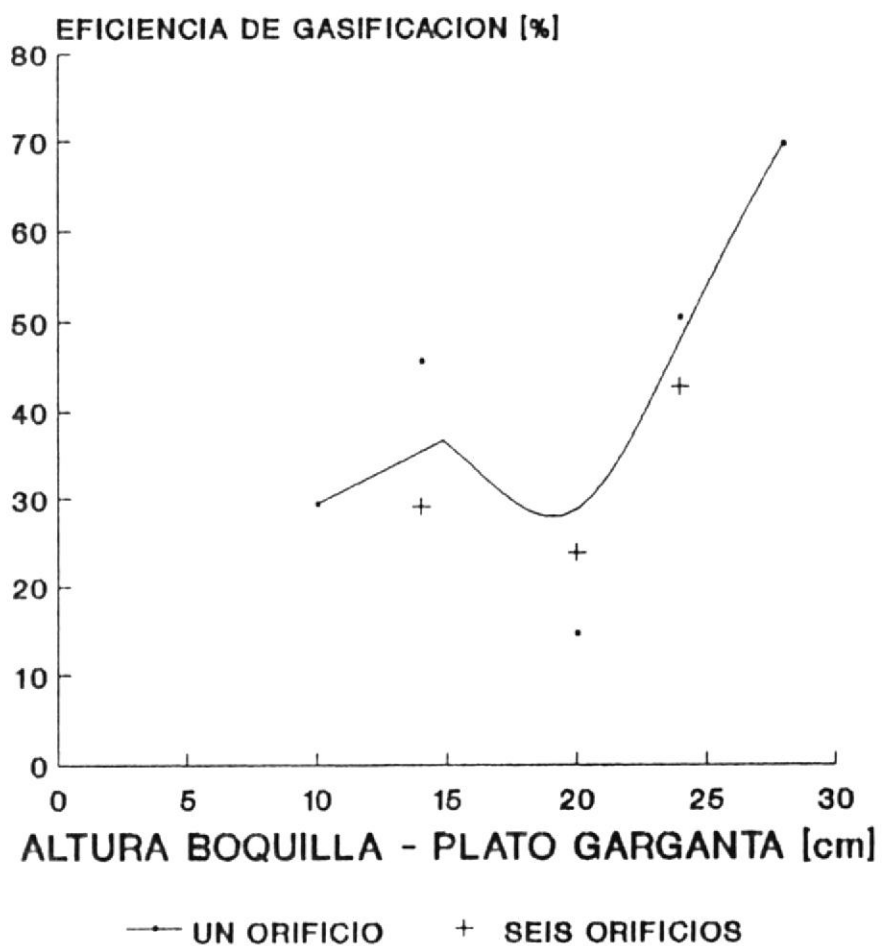


Figura # 6:2

PRODUCCION DE GAS POBRE VALORES EXPERIMENTALES

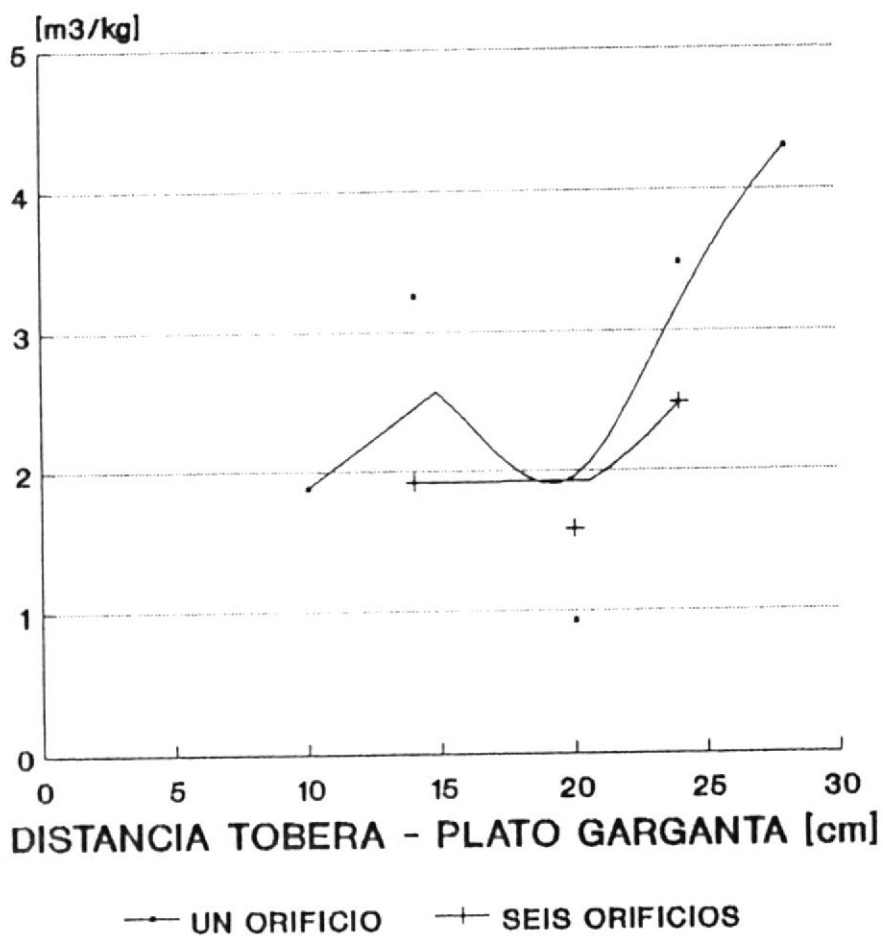


Figura 6:3



PROPIEDADES DEL GAS POBRE VALORES EXPERIMENTALES

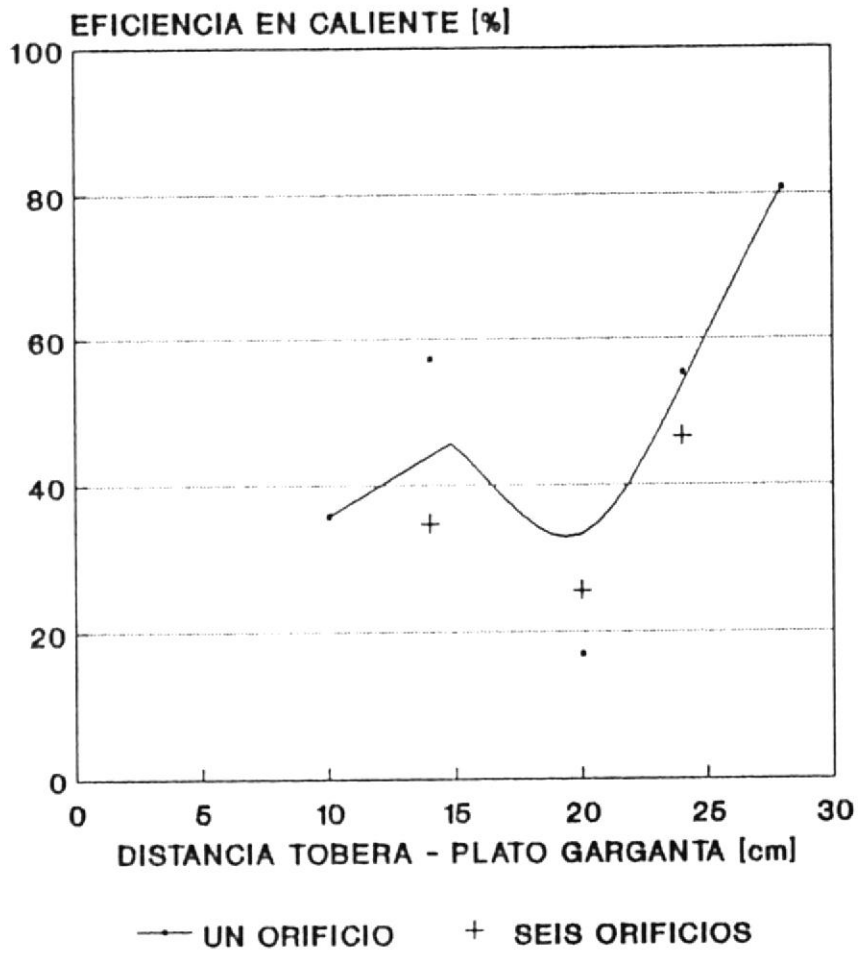


Figura 6:4

PROPIEDADES DEL GAS POBRE VALORES EXPERIMENTALES

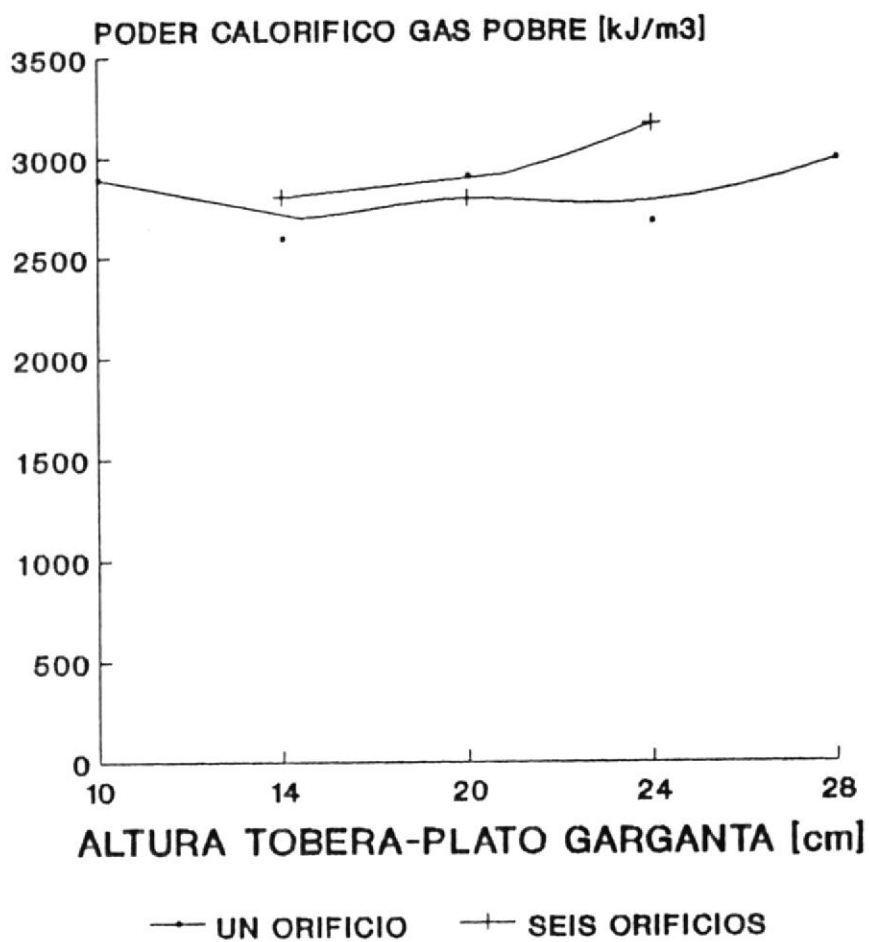


Figura # 6:5

ANALISIS DE RESULTADOS

Para cada una de las geometrías probadas se determinaron directamente dos de los componentes del gas pobre (CO_2 y O_2) utilizando para ello el fyrite, luego con estos dos valores en el diagrama de Ostwald se encontró el valor correspondiente al porcentaje de CO , asumiendo que en el reactor ocurre la combustión incompleta de la leña con la siguiente fórmula química $\text{C}_4.16 \text{H}_6 \text{O}_2.75$, observando que para gasificación los puntos caen en la zona de defecto de aire en el diagrama de Ostwald.

Con estos tres componentes del gas pobre en porcentajes volumétricos se procedió a plantear la ecuación de combustión para la leña teniendo en los productos de la combustión además de los mencionados los siguientes gases: H_2 , H_2O y N_2 .

Los cuales se determinaron realizando el análisis descrito en el capítulo 5, en el análisis realizado no se consideró la presencia de CH_4 y alquitranes presentes en pequeños porcentajes (2 - 4%).

Una vez conocidos los porcentajes correspondientes a los componentes del gas producido, se calcularon los siguientes parámetros; poder calorífico y densidad, eficiencia en frío y en caliente, además los factores de producción de gas y

relación aire/combustible real para gasificación en las ocho pruebas realizadas.

Los resultados muestran un incremento en el valor de la eficiencia de gasificación tanto en frío como en caliente a mayor distancia Tobera - Plato garganta hasta el borde superior del crisol de combustión, también se observó la mejor calidad y estabilidad de la llama en el quemador de pruebas.

El requerimiento de aire para la gasificación tiende a aumentar a medida que aumenta la distancia Tobera - Plato garganta. Este incremento en el flujo de aire necesario para la gasificación podría deberse a que al alejar la tobera del plato garganta aumenta también el lecho de trozos de biomasa a la cual el aire debe proporcionar la suficiente presión para vencer esa mayor resistencia al flujo de gases causada por el lecho activo de biomasa, esto es la parte del lecho que se encuentra en el crisol. Además al tener mayor masa de leña en la zona de combustión se requerirá más oxígeno del aire para formar el monóxido y dióxido de carbono, lo cual redundará positivamente incrementando la producción de gas pobre.

La producción de gas pobre muestra valores en su mayoría alrededor de $2 \text{ m}^3/\text{kg}$, con un promedio para las ocho pruebas de $2.48 \text{ m}^3/\text{kg}$. Notandose así mismo un incremento en la

producción de gas cuando la distancia tobera - plato garganta es incrementada hasta el borde del crisol.

En las pruebas practicadas con seis orificios en la tobera se aprecia un mayor valor en el poder calorífico que en el caso de orificio único en la tobera, lo cual indica que la distribución del aire influye positivamente en el poder calorífico del gas resultante.

La temperatura del gas pobre a la salida del gasificador tiende a incrementarse con el tiempo y al iniciar la operación este valor es relativamente bajo (alrededor de 50 °C), pero a medida que se incrementa la temperatura de la masa térmica formada por ladrillos refractarios y por ladrillos de arcilla la temperatura del gas pobre también aumenta hasta un valor alrededor de 500 °C. El incremento de la temperatura favorece las reacciones de oxidación y de reducción en la zona de crisol.

6:2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Es de mucha importancia para el Ecuador investigar sobre fuentes de energía renovables que puedan ser aplicables en el medio, una de estas fuentes es la gasificación de residuos agrícolas y forestales, esta tecnología permitiría el aprovechamiento con fines energéticos del residuo de las industrias transformadoras de madera y de las industrias agrícolas como las piladoras.

El posicionamiento de la tobera de aire con respecto al plato garganta influye en la producción de gas pobre en este tipo de gasificadores y utilizando leña como combustible biomásico.

Se debería operar el gasificador con la mayor distancia tobera plato garganta posible por las características constructivas de los componentes del gasificador principalmente del crisol, ya que este tiene sus dimensiones de diseño que son las que limitan se siga aumentando la distancia antes mencionada.

La humedad relativa de la leña debe ser lo más baja posible ya que este parámetro causa la inestabilidad del sistema en la producción del gas pobre. Además cuando el gas se utilizará para fuerza motriz la humedad saldrá del equipo en forma de vapor de agua lo cual podría causar problemas

para el funcionamiento del motor.

El tamaño promedio de la leña utilizada debe guardar cierta relación con el diámetro del plato garganta, la relación mínima debe ser 4:1 (diámetro de la garganta igual a cuatro veces la longitud promedio de la biomasa). Un diámetro de la garganta muy grande podría originar la mayor presencia de alquitranes en el gas pobre.

El flujo de aire suministrado al gasificador debe ser el adecuado como se indica en la sección 3:1.1, ya que al utilizar un flujo de aire menor se reducirá la producción de gas pobre.

Al operar el gasificador se debe controlar que el lecho de biomasa se encuentre mínimo a 20 centímetros por encima del nivel de la boquilla de alimentación de aire, en caso contrario es decir si el lecho de biomasa desciende por debajo de este nivel, habrá un incremento en la temperatura en el gasificador principalmente en la zona de crisol, lo cual produciría la destrucción parcial o total de los principales componentes debido a la elevada temperatura.

RECOMENDACIONES

Para la gasificación en general se recomienda el uso de un soplador de aire de tiro inducido, principalmente cuando el gas se utilizará para combustión directa ya que de esta forma se reduce el riesgo de contaminación por CO.

Es muy importante minimizar las fugas en el gasificador ya que si este es de tiro forzado el peligro es para el operador del equipo en caso contrario, es decir de tiro inducido existe el peligro de explosión como se indica en el apéndice 2.

Se recomienda utilizar la biomasa con el menor porcentaje de humedad relativa.

Para iniciar la operación del gasificador se recomienda encender el lecho de leña durante unos 20 minutos hasta que el este se encuentre al rojo, para posteriormente recargar con la cantidad de leña que se desea gasificar como se indica en el apéndice 5.

Al encontrarse operando el gasificador se recomienda ubicarse en una posición que el viento no atraiga los gases producidos en el gasificador.

APENDICE 1

DETERMINACION DE LA HUMEDAD RELATIVA DE LA LEÑA

SEGUN NORMAS DE LA ASTM (D - 2016)**METODO A: SECADO AL HORNO****PESAJE DE LAS MUESTRAS**

- Pesar cada una de las muestras más representativas inmediatamente después de su corte y protegiéndolas de un cambio de humedad antes de ser introducidas al horno.
 - Pesar cada muestra con una precisión de $\pm 0.2\%$, por ejemplo si la muestra pesa más de 250 g, se debe obtener un peso lo más cercano a 0.5 g.
 - Anotar el peso de cada muestra en una hoja de datos que será ordenada convenientemente con el número de la muestra.
 - Si una demora entre el corte de la muestra y su pesaje no puede ser evitada, se debe colocar la muestra en un recipiente a prueba de evaporación hasta que pueda ser pesada; envolturas apropiadas pueden ser hechas de hojas de aluminio o de películas de polietileno.
 - La demora entre el corte de la muestra y su pesaje deberá ser lo más corta posible y en ningún caso exceder las 2 horas.
- Obteniendo su peso en gramos en vez de libras u onzas.

SECAMIENTO:

- Después de que las muestras han sido pesadas, colocar la muestra en un horno que haya sido convenientemente calentado a 103 ± 2 °C hasta que las muestras tengan un peso constante
- Colocar las muestras en el horno de tal manera que se pueda proveer un libre acceso de aire calentado a cada uno de ellos con la finalidad de realizar las mediciones de peso hasta o tener un valor constante

DETERMINACION DE LA HUMEDAD RELATIVA DE LA LEÑA

Se tomaron ocho muestras representativas de la leña disponible, la misma que corresponde al eucalipto, tipo más utilizado en la sierra del Ecuador.

Los valores inicial y final del peso de las diferentes muestras son los siguientes:

HR BS: Humedad relativa en base seca

HR BH: Humedad relativa en base húmeda

mi = 22,7	mf = 19,3	HR BH 15 %	HR BS 17,6 %
29,9	25,1	17 %	19,1 %
6,6	5,4	18 %	22,2 %
20,3	16,8	17 %	20,8 %
9,2	7,6	17 %	21,0 %
20,6	17,6	15 %	17,0 %
30,1	26,3	13 %	14,5 %
15,3	13,3	12 %	15,0 %

BASK SECA :

$$\text{HR BS} = \frac{\text{mi} - \text{mf}}{\text{mf}} * 100$$

BASK HUMEDA :

$$\text{HR BH} = \frac{\text{mi} - \text{mf}}{\text{mi}} * 100$$

APENDICE 2

PRECAUCIONES EN LAS OPERACIONES CON GAS POBRE

El gas pobre es una alternativa atractiva para sustituir los combustibles fosiles tales como el Diesel o la Gasolina en los motores de combustión interna, por razones economicas y escasez de estos ultimos. Debe tenerse en cuenta los peligros que entraña la utilización de esta tecnologia.

- * PELIGROS DE TOXICIDAD
- * PELIGROS DE INCENDIOS
- * PELIGROS DE EXPLOSION
- * RIESGOS DE QUEMADURAS EN LA PIEL
- * CONTAMINACION AMBIENTAL EN EL AIRE

PELIGRO DE TOXICIDAD

La intoxicación con monóxido de carbono es debida a la absorción de este gas por la hemoglobina de la sangre lo que a su vez suprime la absorción del O₂ por la hemoglobina la tendencia a absorber CO es 250 veces más que el O₂, lo que significa que el gas pobre suprime la absorción del oxígeno aún en concentraciones relativamente bajas de CO en el aire, por lo que riesgo de intoxicación dependerá de la concentración del CO en el aire inhalado y del tiempo de intoxicación

Es necesario observar que las concentraciones tan bajas como el 1% pueden producir inconsciencia; rapidamente la intoxicación puede ser identificado por el color rosado

pronunciado en los labios y mejillas, manchas rojas en varias partes de la piel y una mirada vacía y fija, se puede conseguir una recuperación inhalando aire fresco o mejor aún se puede conseguir una recuperación más rápida inhalando oxígeno.

PELIGROS DE INCENDIO:

Las principales causas de los peligros de un incendio son:

- Las altas temperaturas superficiales del gasificador y los tubos que conducen el gas (entre 200-300 °C).
- Riesgos de chispas durante la reposición de combustible y la eliminación de la ceniza, por lo tanto es importante en el diseño del gasificador tener en cuenta el encendido del equipo así mismo como la recarga de combustible y la eliminación de cenizas. Las cuales son operaciones particularmente arriesgadas, desde el punto de vista de incendios.

Muchos incendios pueden producirse por recargar el combustible demasiado tarde esto lleva a temperaturas elevadas en la parte superior del gasificador. cuando el operador abra la tapa superior para poner combustible, el gas se extenderá y explotará al hacer contacto con las altas temperaturas. Pudiendo ser grandes las llamas resultantes.

PELIGROS DE EXPLOSION:

Durante la operación normal la tubería de salida del gasificador y el quemador está llena de gas pobre, sin embargo este gas no se quema por falta de oxígeno. La posibilidad de que el gas se encienda radica en el hecho de que por alguna razón ingrese aire al sistema estando al mismo tiempo la temperatura lo suficientemente alta para encenderlo (entre 500 - 600 °C). lo cual podría suceder por varias razones.

- Una fuga que permita el ingreso de aire al sistema de gas pobre.
- Ingreso de aire al gasificador durante la alimentación de combustible.
- Introducción de aire a un gasificador lleno con gas y su encendido simultáneo.

El último caso tendrá el carácter de una explosión. Es por esto que no se debe encender un gasificador en frío sin primero ventilarlo.

No se puede evitar que penetre aire en el gasificador durante la realimentación de combustible, sin embargo si se acostumbra a quemar el gas que se encuentra en la parte superior al abrir la tapa, el riesgo que se corre será mínimo. El aire que ha ingresado al gasificador producirá la combustión rápida de los gases en la zona de pirólisis lo que lleva hacia la presurización del

gasificador. Para desfogar la presión en forma inofensiva sería conveniente diseñar una tapa superior con resorte.

Por otro lado puede haber un encendido espontáneo con combustión rápida de los gases durante la realimentación si se permite que el nivel del combustible baje demasiado en el gasificador, la parte superior se sobrecalentará y esto encenderá el gas.

La rápida combustión del gas puede ocurrir también durante los primeros minutos luego de encender el gasificador cuando el gas combustible entra en contacto con el aire que quedó.

También puede ocurrir una explosión si se enciende el gasificador con un sistema de succión utilizando un trapo humedecido en el líquido inflamable y luego de fallar en encender el gasificador se hace un nuevo intento sin ventilarlo adecuadamente, entonces se puede encender de modo explosivo el líquido vaporizado, por lo tanto no es un procedimiento recomendado el uso de trapos empapados en líquidos inflamables para encender el gasificador.

APENDICE 4
FOTOGRAFIAS



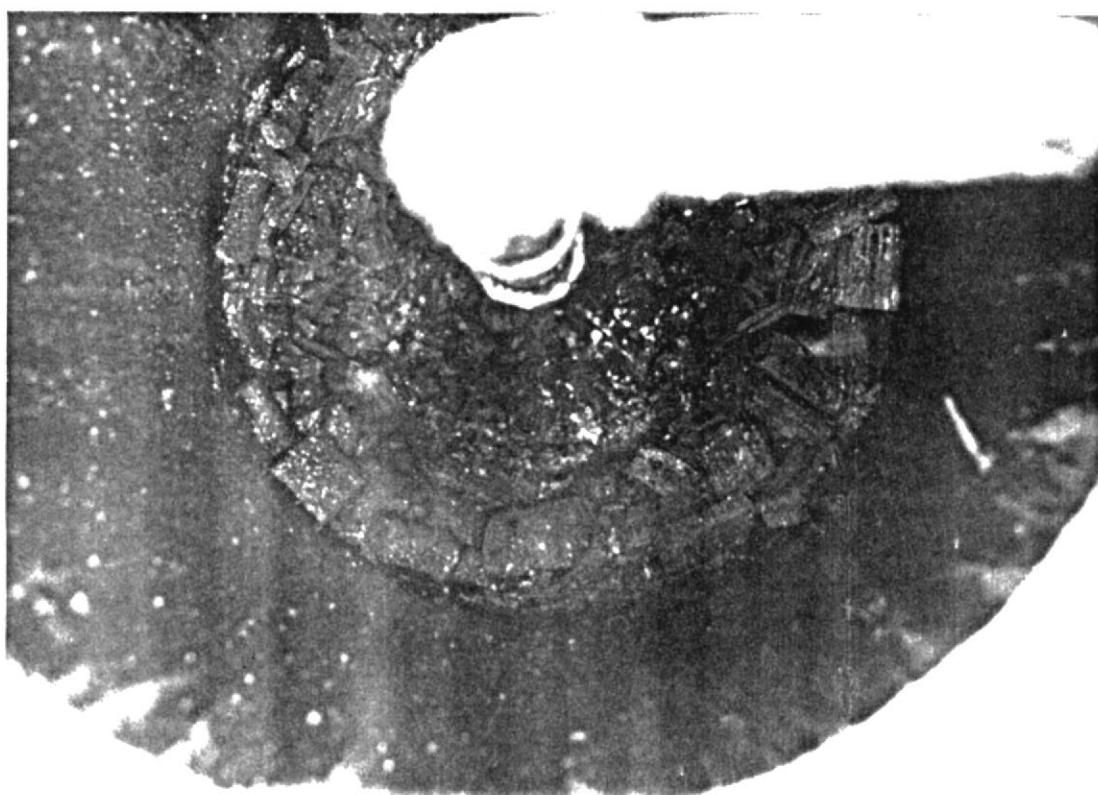
GASIFICADOR DE LEÑA TROCEADA DE DOBLE GARGANTA PARA USO TERMICO

CAPACIDAD ENERGETICA : 200 kW *térmicos*

CONSUMO DE LEÑA : 60 kg/h.

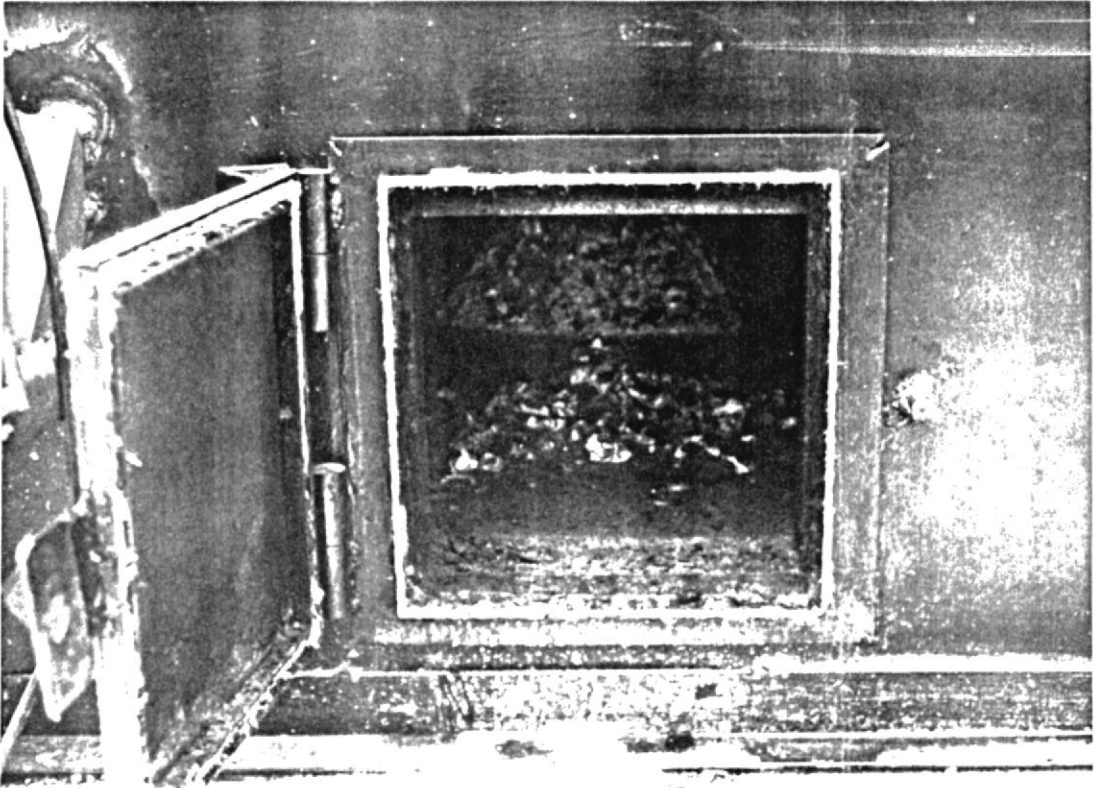
EFICIENCIA DE GASIFICACION : 65 %

FOTOGRAFIA # 1

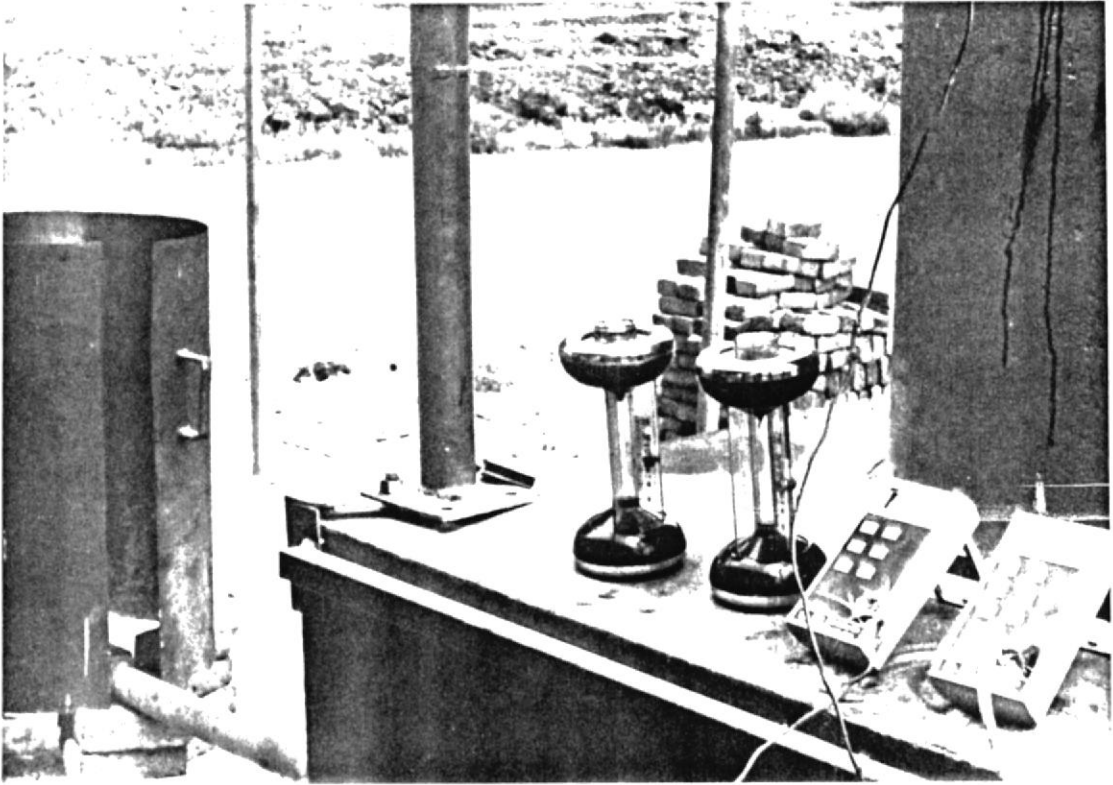


PARTE INTERIOR DEL GASIFICADOR DESPUES DE REALIZADA LA PRUEBA

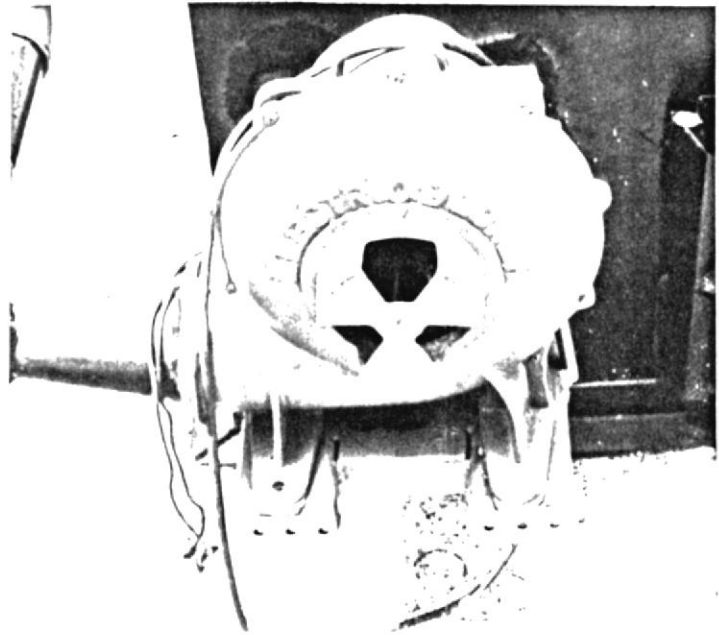
FOTOGRAFIA # 2



VENTANA LATERAL PARA MANTENIMIENTO DEL GASIFICADOR
FOTOGRAFIA # 3



GASIFICADOR EN OPERACION E INSTRUMENTOS DE MEDICION
DE TEMPERATURA Y COMPOSICION DE GASES.
FOTOGRAFIA # 4.



SOPLADOR DE AIRE
FOTOGRAFIA # 5



FOTOGRAFIA # 6

PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACION DEL GASIFICADOR

APENDICE 5
PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACION
DEL GASIFICADOR

PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACION DEL GASIFICADOR

Luego de tener la leña troceada (5 cm de lado promedio), con una humedad relativa entre el 15 y 25 % en base seca se procedió de la siguiente manera.

- 1.- Se cargó la parte inferior del gasificador con carbón vegetal en trozos hasta la altura del plato garganta.
- 2.- Se cargó parcialmente la leña troceada hasta la altura del crisol (zona de combustión).
- 3.- Manteniendo abiertas las ventanas laterales y la compuerta superior se procedió a iniciar la combustión utilizando para ello un combustible líquido (diesel) por un tiempo de 15 a 25 minutos hasta que se el lecho de leña se encuentre encendido en la zona de combustión.
- 4.- Se completó la carga de leña hasta la cantidad de biomasa a gasificar.
- 5.- Se cerraron las ventanas laterales y la compuerta superior, arrancando el soplador para un flujo menor o igual al de trabajo controlando éste con una válvula de compuerta en la tubería de admisión de aire.
- 6.- Luego de arrancar el soplador se comprobó la presencia de gas pobre en el quemador de prueba.
- 7.- Una vez estabilizada la llama, se procedió a tomar datos de temperatura, flujo de gas y composición porcentual volumétrica del mismo en los puntos de medición como se indican en las figuras correspondientes.



8.- En caso de ser necesario recargar el equipo se procederá ha apagar el soplador y cerrar la válvula de paso de aire, luego abrir la compuerta superior y con un mechero quemar el gas pobre que tiende a salir por la carbonera, luego recargar el gasificador con la cantidad deseada de leña .

9.- Cerrar la compuerta superior, arrancar el soplador y abrir la válvula del paso de aire. Normalmente cuando el gasificador se encuentra trabajando (caliente) tardará unos pocos minutos para seguir produciendo Gas Pobre.

Ver fotografia # 6.

BIBLIOGRAFIA

1. **OLADE/GATE**, Manual del primer curso de gasificación de la madera en Centroamerica y el caribe, Costa Rica, Noviembre de 1983.
2. **BARRIGA A.** Informe final del proyecto "Uso racional de leña y residuos agroforestales como combustibles directos; aplicaciones domesticas , rurales y agroindustriales de pequeña y mediana escala" , Guayaquil, 1987.
3. **BJORN KJELLSTROM** , Biomass Gasifiers for energy supply to Agriculture and small Industry , Sweden, 1986.
4. **CALS J.**, Biomassa Biocombustíveis Bioenergia, Brasilia, 1982
5. **CHAO J.**, Pautas para el diseño y construcción de fogones eficientes para la combustión de cáscara de arroz, TESIS DE GRADO, Espol, 1987.
6. **FAO**, Wood gas and engine fuel, FAO forestry paper # 72 Roma, 1986.
7. **FAO**, A new approach to domestic fuel wood conservation, guidelines for Research, Roma, 1986.
8. **GIULIANO SALVI**, La Combustión, Teoria y Aplicaciones, España 1970.

9. **HASLAM ROBERT**, Fuels and their combustion, New York and London, 1926.
10. **INSTITUTO NACIONAL DE ENERGIA**, Balances energéticos nacionales, 1990.
11. **OLADE**, III Seminario Latinoamericano de bioenergía, Guatemala, 1983.
12. **PATINO M.**, Diseño, Construcción y Pruebas de un termogasificador experimental para residuos forestales y agrícolas, TESIS DE GRADO, Espol, 1985.
13. **PATINO M.** Combustión y contaminación industrial, Espol, Facultad de Ingeniería en Mecánica, Guayaquil, 1988.
14. **RODRIGUEZ F.**, Pruebas experimentales de gasificación y operación con gas pobre de un motor encendido por chispa, TESIS DE GRADO, Espol, 1990.
15. **STASSEN H.**, Producer gas from wood and coconut residues the seychelles integrated energy project, Twente University of technology, the Netherlands, Junio de 1982.
16. **THE BEIJER INSTITUTE**, Generator gas the Swedish experience from 1939 - 1945, Golden, Colorado, 1979.

17. ZURITA M. y RUALES R. Estudio de los gasógenos diseño y construcción de un prototipo, TESIS DE GRADO, Universidad central del Ecuador; Facultad de Ingeniería Química, 1984.